

ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

3.1. ТРЕХФАЗНОЕ КЗ в простейшей цепи, питаемой шинами неизменного напряжения

В переходном режиме происходят как количественные, так и качественные изменения параметров режима системы.

Симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активными сопротивлениями и индуктивностями при отсутствии в ней трансформаторных связей назовем простейшей цепью. Количественные соотношения электромагнитного переходного процесса в трехфазной электрической цепи установим сначала для условий, когда источником питания являются *шины неизменного напряжения* ($U_{\max} = \text{const}$), которые принято называть *шинами бесконечной мощности* (ШБМ). Рассмотрим составляющие тока и закономерности их изменения при трехфазном КЗ в простейшей схеме (рис. 3.1). В ней отсутствует емкость, что исключает возможность возникновения колебательных контуров, а это значительно упрощает характер протекания переходного процесса в цепи. В силу сохранения симметрии фаз, как в нормальном, так и переходном режимах, расчетные выражения приводим для одной фазы – «А».

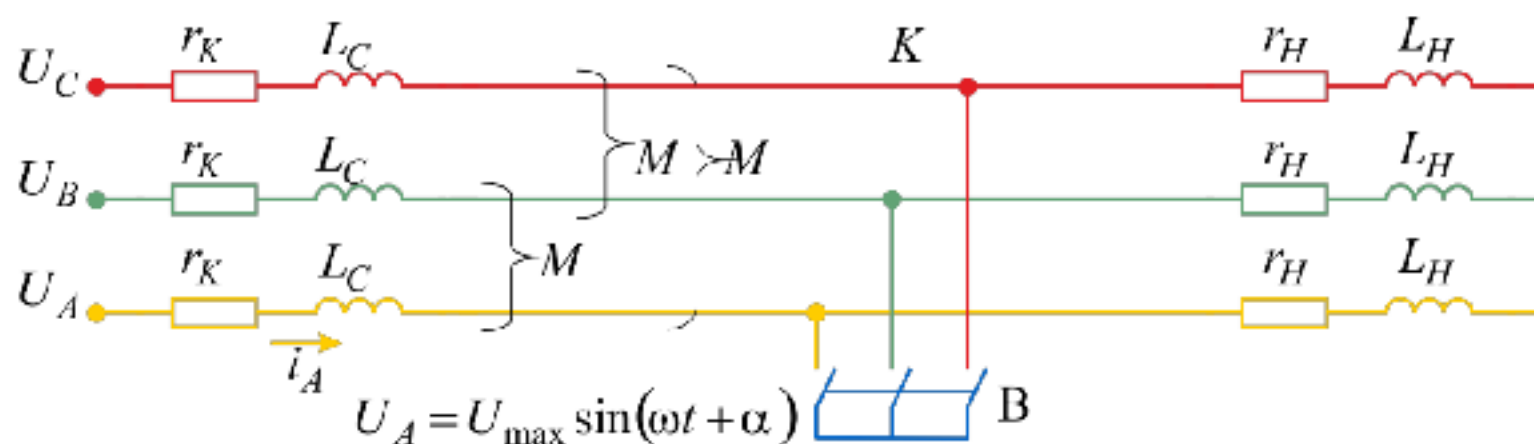


Рис. 3.1. Схема простейшей электрической цепи

В нормальном режиме по схеме протекает ток, определяемый напряжением источника питания и результирующим сопротивлением цепи,

$$i_A = \frac{U_{A\max}}{Z_{\Sigma}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) = I_{A\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi), \quad (3.1)$$

Где $U_A = U_{A\max} \sin(\omega t + \alpha)$ – закон изменения напряжения фазы «А»;

$Z_{\Sigma} = Z_K + Z_H$ – суммарное сопротивление схемы в нормальном режиме; φ – аргумент этого сопротивления (Z_{Σ}); α – фаза напряжения.

Для облегчения восприятия излагаемого материала наряду с выводом необходимых расчетных выражений будем осуществлять их интерпретацию на векторной диаграмме (см. рис. 3.2). Ось +1 является осью отсчета углов, а вертикальная ось tt – неподвижной осью времени. Напомним, что любую синусоидальную величину можно представить вращающимся вектором. Проекция этого вектора на неподвижную ось времени дают мгновенные значения интересующей величины. Положению векторов напряжения и тока соответствует время $t = 0$.

Нормальный режим, предшествующий КЗ, характеризуется векторами напряжения (U_A, U_B, U_C) и тока (I_A, I_B, I_C). Положение вектора U_A для момента $t = 0$ определяется углом α , который называют **фазой включения** (возникновения) короткого замыкания. Положение вектора I_A связано с вектором на-

пряжения U_A углом φ . Вектора напряжений фаз «А,В,С» симметричны и имеют относительный сдвиг 120° ; равным образом это относится и к векторам токов.

Включением выключателя «В» создается режим КЗ в точке К, которая делит схему на две части: правую и левую. Правая часть не содержит источника питания и ток в ней с течением времени затухнет до нуля, а энергия, запасенная в индуктивности L_H , выделится в виде тепла в активном сопротивлении r_H . По этой причине указанная часть схемы не представляет интереса.

Левая часть схемы содержит источник питания, поэтому наряду с вынужденной (периодической) составляющей тока в цепи возникает свободный (апериодический) ток. Получим расчетные выражения для тока КЗ и рассмотрим особенности протекания переходного процесса.

Дифференциальное уравнение равновесия ЭДС по второму закону Кирхгофа для фазы «А» этой части схемы имеет вид

$$U_A = r_K i_A + L_c \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}, \quad (3.2)$$

где L_c – собственная и M – взаимная индуктивности фаз.

Учитывая, что в симметричном режиме мгновенные значения токов трех фаз связаны соотношением $i_B + i_C = -i_A$, дифференциальное уравнение переходного процесса (3.2) можно представить как функцию одной переменной – тока фазы «А»:

$$U_A = r_K i_A + (L_c - M) \frac{di_A}{dt} = r_K i_A + L_K \frac{di_A}{dt}. \quad (3.3)$$

Здесь $L_K = L_c - M$ представляет результирующую индуктивность фазы. Уравнение (3.3) справедливо для любой фазы; его решение представляет закон изменения тока КЗ в переходном режиме (упускаем индекс фазы «А»), который запишется так:

$$i_K = i_n + i_a \quad (3.4)$$

где i_n – **вынужденная периодическая** составляющая тока;

i_a – **свободная (апериодическая)** составляющая тока.

Эти составляющие тока короткого замыкания определяются следующими функциями времени:

$$i_n = \frac{U_{\max}}{Z_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) = I_{n\max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K); \quad (3.5)$$

$$i_a = i_{a(0)} e^{-t/T_a} \quad (3.6)$$

где Z_K – сопротивление короткозамкнутого участка цепи;

φ_K – аргумент сопротивления Z_K ;

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

$$T_a = \frac{L_K}{r_K} = \frac{x_K}{\omega r_K} \quad (3.7)$$

– **постоянная времени затухания апериодического тока.**

Как видно, T_a определяется параметрами короткозамкнутой цепи и численно равна времени, в течение которого апериодический ток уменьшается в $e = 2.72$ раз, или до 0.368 своего начального значения. Подкасательная к любой точке экспоненты (см. рис. 3.4) в принятом для оси времени масштабе дает значение постоянной времени T_a . Это свойство используется при ее экспериментальном определении.

В выражении (3.6) неопределённым пока является начальное значение апериодической слагаемой $i_{a(0)}$. Его расчет основан на первом законе коммутации – в цепи с индуктивностью в момент внезапного нарушения режима мгновенное значение тока остается неизменным. Применительно к рассматриваемым условиям имеем: мгновенное значение тока нормального режима (i_0) равно сумме начальных мгновенных значений периодической и апериодической составляющих тока КЗ

$$i_0 = i_{п(0)} + i_{a(0)}$$

Из этого соотношения можно определить $i_{a(0)}$, используя выражения (3.1) и (3.5), для времени $t = 0$:

$$i_{a(0)} = i_0 - i_{п(0)} = I_{\max} \sin(\alpha - \varphi) - I_{п\max} \sin(\alpha - \varphi_K), \quad (3.8)$$

т. е. начальное значение апериодической слагаемой определяется разностью мгновенных значений периодических токов до и после КЗ.

С учетом изложенного выше закон изменения полного тока КЗ определяется выражением

$$i_K = I_{пm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{пm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{пm} \sin(\alpha - \varphi_K)] e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (3.9)$$

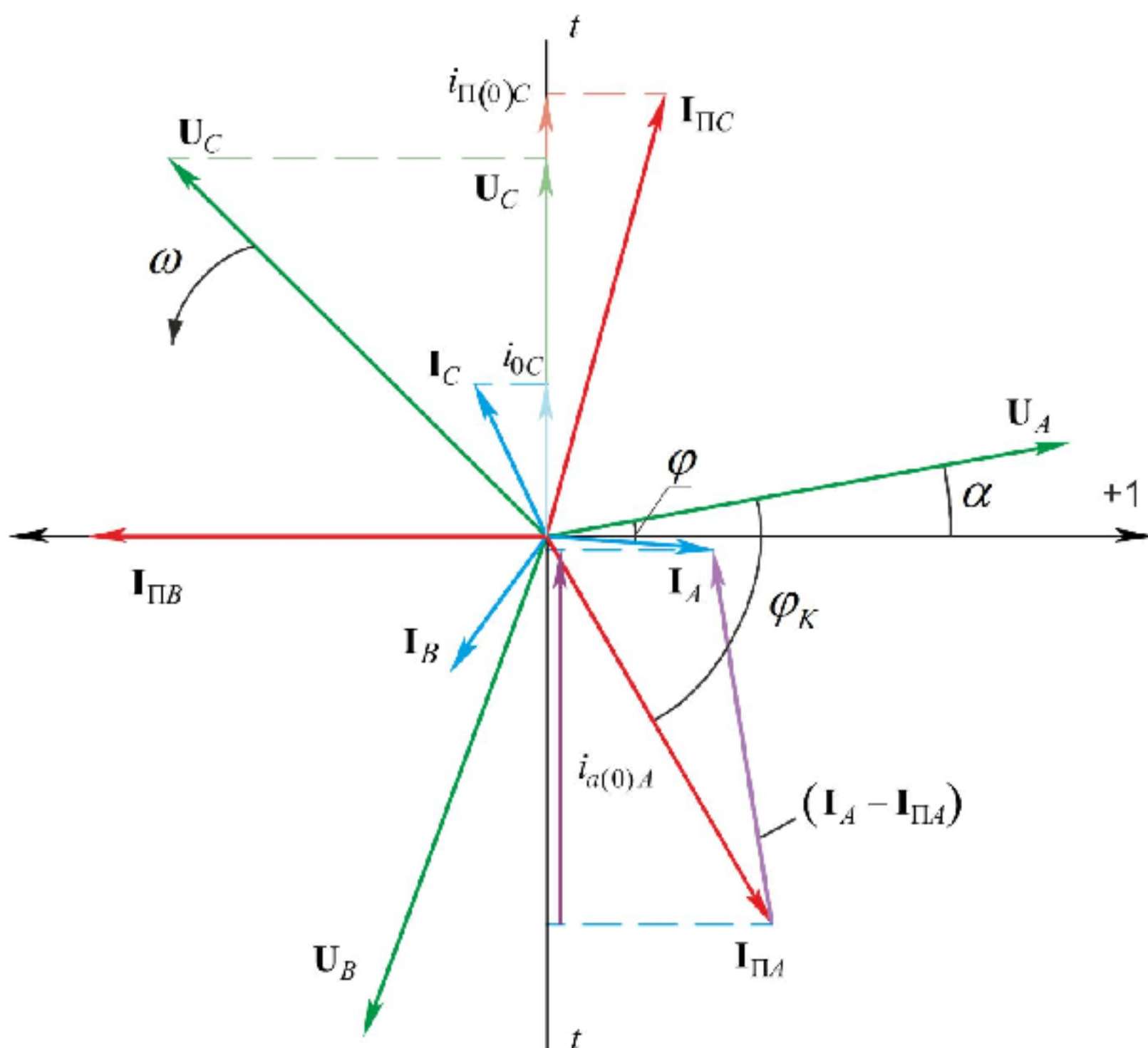


Рис. 3.2. Векторная диаграмма для начального момента трехфазного КЗ

При условии питания схемы источником неизменного напряжения амплитуда периодической слагаемой тока КЗ ($I_{Пm}$) также остается постоянной в течение всего переходного режима. Завершение переходного процесса определяется затуханием апериодической слагаемой и по времени составляет $(4 \div 5) T_a$, или $0.1 \div 0.3$ с.

Возвратимся к диаграмме (см. рис. 3.2), на которой векторы $I_{ПA}$, $I_{ПB}$, $I_{ПC}$ характеризуют периодические слагаемые тока нового режима. По величине они, естественно, больше векторов тока нормального режима и, в общем случае, имеют иную фазу (φ_K). Поскольку мгновенные значения периодических токов i_0 и $i_{П(0)}$ являются проекцией соответственно векторов I_m и $I_{Пm}$ на ось времени, то начальное значение апериодического тока $i_{a(0)}$ можно рассматривать как проекцию вектора

$(I_m - I_{Пm})$ на ту же ось (на рис. 3.2 показан только для фазы «А»). В зависимости от фазы включения α начальное значение тока $i_{a(0)}$ может изменяться от наибольшей величины, когда вектор $(I_m - I_{Пm})$ параллелен оси tt , до нуля, когда этот вектор перпендикулярен ей. Для трехфазной системы одно из этих условий возможно лишь в одной фазе.

Из выражения (3.8) следует, что наибольшее значение $i_{a(0)}$ зависит как от фазы включения (α), так и векторов периодического тока режима КЗ и предшествующего режима. Векторная диаграмма (рис. 3.2) наглядно показывает: при отстающем характере тока предшествующего режима по мере его уменьшения начальное значение свободного тока возрастает

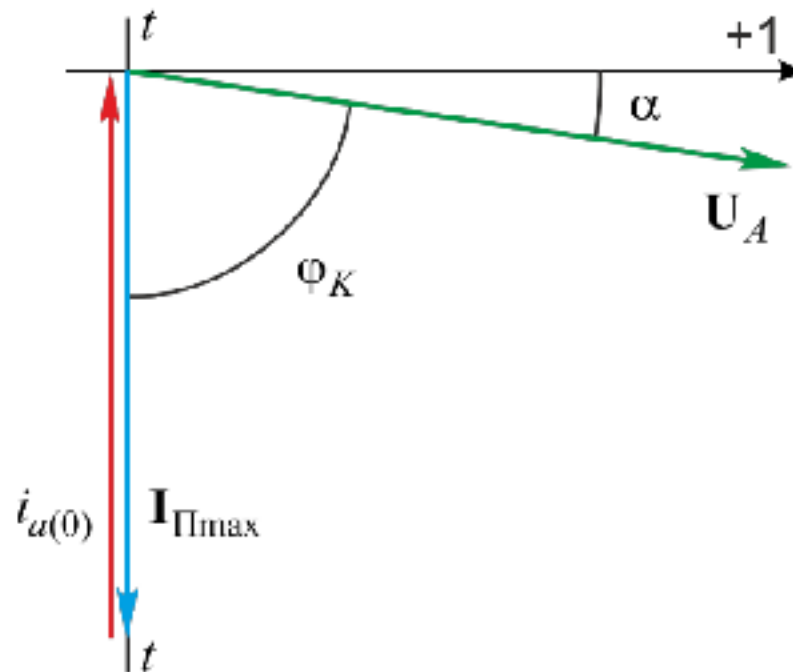


Рис.3.3.Условия возникновения $i_{a(0)}$ -макс при хх до КЗ

Наконец, при отсутствии предшествующего тока в цепи величина $i_{a(0)}$ может достигать амплитуды периодической слагающей нового режима ($I_{Пm}$), если в момент короткого замыкания эта слагающая проходит через свой максимум (положительный или отрицательный), что отражено на рис. 3.3. Режим холостого хода до короткого замыкания как возможный обычно на практике и принимают в качестве расчетного¹.

Важной характеристикой тока в переходном режиме является **ударный ток короткого замыкания** i_y . Он представляет максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания. Расчетное выражение для указанной характеристики тока обычно находят для условий отсутствия тока в предшествующем режиме и наибольшем значении апериодической составляющей².

¹ При опережающем токе нормального режима возможны частные случаи, когда начальное значение апериодической слагающей больше амплитуды периодического тока КЗ [11].

² В предварительно разомкнутой цепи максимум мгновенного значения полного тока КЗ наступает, когда в момент нарушения режима напряжение расчетной фазы источника проходит через ноль, т.е. при $\alpha = 0$. Учитывая, что в большинстве случаев у цепи короткого замыкания φ_K близко к 90° , условие возникновения наибольшей величины апериодической слагаемой и условие максимума мгновенного значения полного тока КЗ очень близки друг к другу. Поэтому в практических расчетах ударный ток КЗ обычно находят при наибольшем значении апериодической слагаемой, что дает более простое расчетное выражение.

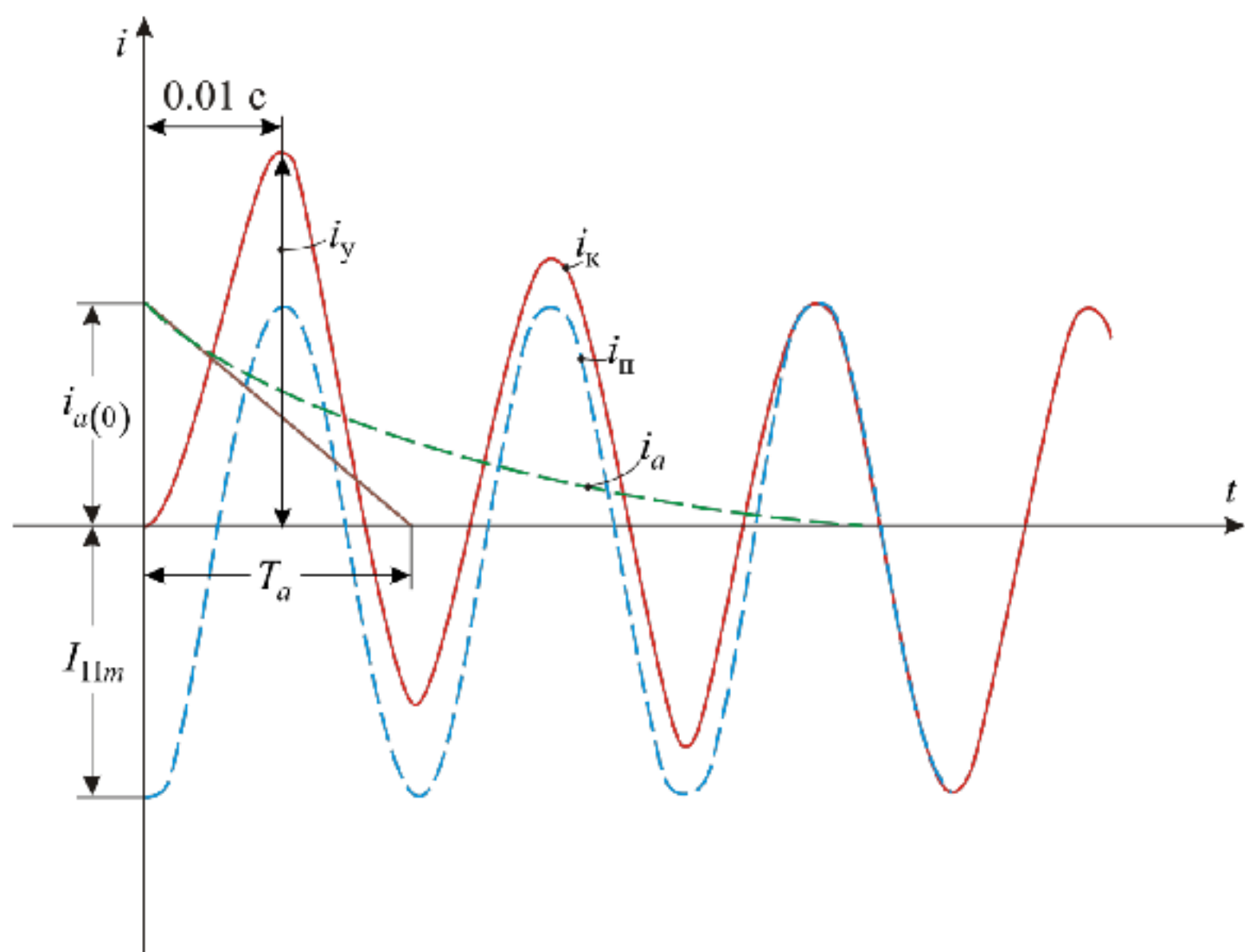


Рис. 3.4. Осциллограмма тока короткого замыкания при $i_{a(0)} = I_{пmax}$

Сказанное иллюстрирует волновая диаграмма токов (рис.3.4), отражающая описанные условия ($I_{max}=0, i_{a(0)} = I_{пmax}$). Из рис.3.4 следует, что ударный ток (i_y) наступает спустя пол периода ($T/2=0.01с$) после возникновения короткого замыкания и равен сумме амплитудного значения периодического тока и величине апериодического тока для времени $t=0.01с$. С учётом сказанного выражение для ударного тока КЗ запишется так:

$$i_y = I_{пmax} + I_{пmax} e^{-0.01/T_a} = I_{пmax} K_y = \sqrt{2} I_{п} K_y.$$

Или в окончательном виде:

$$i_y = \sqrt{2} I_{п} K_y \quad \text{где} \quad K_y = 1 + e^{-0.01/T_a} \quad (3.10)$$

– ударный коэффициент;

$I_{п}$ – действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания ($t = 0$).

Как следует из выражения (3.10), ударный коэффициент показывает превышение ударного тока КЗ над амплитудой периодической слагаемой. Его величина зависит от постоянной времени T_a (рис. 3.5) и находится в пределах $1 < K_y < 2$.

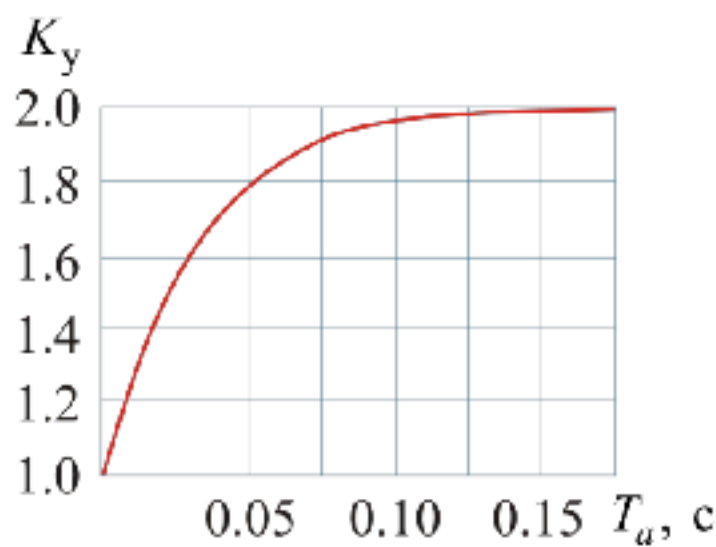


Рис. 3.5. Зависимость ударного коэффициента от постоянной времени T_a

Чем больше величина активного сопротивления цепи, тем быстрее затухает апериодический ток и тем соответственно меньше ударный коэффициент. Он достигает предельных значений при следующих условиях: при отсутствии в цепи реактивного сопротивления ($x_K = 0$) апериодический ток отсутствует и $K_y = 1$; при отсутствии активного сопротивления ($r_K = 0$) апериодический ток не затухает и $K_y = 2$. Параметр K_y по выражению (3.10) дает погрешность по отношению к точному выражению в пределах (0.1–1,4)% при $x_K / r_K \geq 3$ и до 2.5% при $x_K / r_K = 1.3$.

Ударный ток используется для проверки электротехнической аппаратуры на электродинамическую (механическую) прочность.

3.2. Действующее значение тока короткого замыкания

Действующим значением тока КЗ в произвольный момент времени t называют среднеквадратичное значение полного тока за один период T , в середине которого находится рассматриваемый момент, т. е.

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_k^2 dt}. \quad (3.11)$$

Выражение полного тока $i_k = f(t)$ в общем случае имеет сложную зависимость и в течение переходного процесса изменяется, следовательно, и действующее значение не остается постоянным во времени. Для упрощения вычисления I_t принимают, что действующее значение периодической и апериодической слагающих за рассматриваемый период T не изменяются и каждая из них равна своему значению в данный момент времени t , т. е.

$$I_{nt} = I_{nmt} / \sqrt{2}$$

$$I_{at} = i_{at} = \sqrt{2} I_{n(0)} e^{-t/T_a}$$

С учетом принятых допущений действующее значение полного тока КЗ в момент t после преобразования выражения (3.10) определится так:

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2} \quad (3.12)$$

Метод рас- чета I_{nt} , когда источником питания является генератор конечной мощности, изложен в разд. 5.3; для мощного источника, когда в момент КЗ его напряжение неизменно, периодическая слагаемая в переходном режиме остаётся постоянной, т. е. $I_{nt} = I_{n(0)}$.

Как правило, на практике рассчитывают *наибольшее действующее значение* полного тока КЗ – I_y . Оно имеет место в первый период переходного процесса, в середине которого находится момент времени $t = 0.01$ с. С учетом соотношения (3.10) выражению (3.12) можно придать вид

$$I_y = I_{n(0)} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2} \quad (3.13)$$

Здесь принято, что периодическая составляющая за время $t = 0.01$ с не изменяется. В соответствии с указанными выше пределами изменения K_y отношение I_y/I_n находится в пределах

$$1 < I_y / I_n < \sqrt{3}.$$

По параметрам I_t и I_y определяется термическое воздействие тока короткого замыкания на электротехническую аппаратуру.

Практические методы расчета токов Трехфазного короткого замыкания

5.1. Учет питающей энергосистемы и коэффициенты токораспределения

В зависимости от целей, для которых осуществляется расчёт режима КЗ, параметры тока переходного режима рассчитываются либо для момента времени $t = 0$, либо для произвольного момента τ . В качестве момента τ , как правило, понимают время отключения КЗ. Уточнение параметров тока с учетом фактора времени существенно усложняет процедуру расчета, т. к. требует индивидуального учета отдельных источников питания.

Расчет параметров энергосистемы. В качестве одного из источников подпитки места КЗ рассматриваемого энергорайона является энергосистема, которую представляют в виде эквивалентного источника с реактивностью (x_c), за которой приложена неизменная ЭДС (E_c).

Информацию по указанным параметрам внешнего источника питания может предоставить энергоснабжающая организация по официальному запросу. Возможен и косвенный способ их расчета. **Если известна величина начального тока I_c'' или мощности S_K при трехфазном КЗ в узле присоединения энергосистемы к рассматриваемому энергорайону (узел **K1** на рис.5.1), то реактивность системы можно определить по выражению:**

в именованных единицах

$$x_c = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}I_c''} = \frac{U_{cp}^2}{S_K} \text{ Ом} \quad (5.1)$$

или относительных базисных единицах

$$x_{c*} = \frac{I_6}{I_c''} = \frac{S_6}{S_K}, \quad (5.2)$$

где U_{cp} – среднее номинальное напряжение ступени, соответствующее току трехфазного замыкания (I_c'') в точке присоединения электрической системы;

I_6 – базисный ток для той же ступени, что и ток I_c'' .

За этой реактивностью считают подключенным источник бесконечной мощности, для которого $E_c = U_{cp}$.

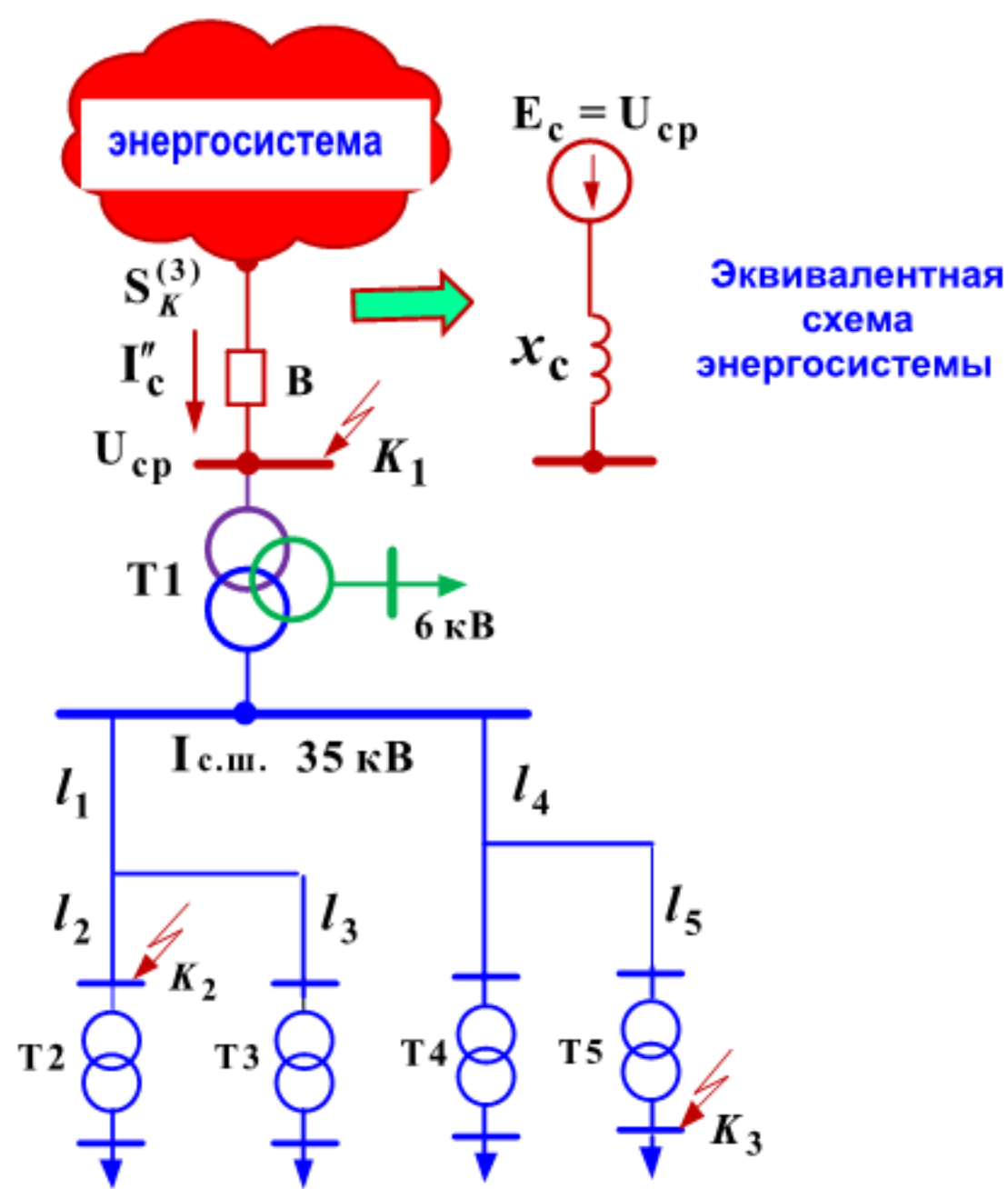


Рис. 5.1 Эквивалентирование энергосистемы

Реактивность системы можно также приближенно оценить, исходя из параметров выключателей, установленных на узловой подстанции. В расчетных выражениях (5.1) и (5.2) ток I''_c считают равным номинальному току отключения этих выключателей ($I_{отк.н}$), а S_K – номинальной отключающей способности выключателя по мощности ($S_{отк.н}$).



я Фото 5.

Калининская атомная электростанция



Фото 6.

Ровенская атомная электростанция



Фото 7.

Молдавская ГРЭС



Фото 8.

Сургутская ГРЭС



Фото 9. Открытое распределительное устройство Саяно-Шушенской ГЭС



Фото 10. Общий вид Саяно-Шушенской ГЭС



Фото 11. Панорамный вид на РЭС г. Бостон (США)

Коэффициенты токораспределения. Для учета в сложной схеме индивидуальных особенностей источников питания можно воспользоваться **коэффициентами токораспределения** (c).

Для схемы произвольной структуры считаем известными результирующий периодический ток I_{Σ} в месте КЗ и его распределение I_i по ветвям. **Тогда коэффициент токораспределения c_i произвольной ветви i определится по выражению**

$$c_i = I_i / I_{\Sigma} . \quad (5.3)$$

При этом I_i и I_{Σ} могут быть выражены как в относительных, так и в именованных единицах, приведенные к одной и той же ступени трансформации.

Следовательно, коэффициент токораспределения любой ветви численно равен току этой ветви в долях (относительных единицах) от тока I_{Σ} , который выступает в качестве базиса. Коэффициенты токораспределения ($c_{Гi}$) генерирующих источников питания (синхронных генераторов, синхронных и асинхронных двигателей, «системы») характеризуют их доленое участие в питании места короткого замыкания. Сумма этих коэффициентов для всей схемы или рассматриваемой части схемы равна единице:

$$\sum c_{Гi} = c_0 = 1. \quad (5.4)$$

Расчет коэффициентов распределения основан на общих законах электротехники. Схему с замкнутыми контурами рекомендуется предварительно упростить, приведя ее к сложно радиальному виду. Расчет коэффициентов c в такой схеме не представляет особых трудностей, поскольку предполагает использование формул токораспределения между параллельными ветвями (табл. 5.1).

С точки зрения практического приложения коэффициентов (C) можно указать на две задачи.

Непосредственно из формулы (5.3) при известных значениях I_{Σ} и c_i можно определить ток любой ветви схемы:

$$I_i = c_i I_{\Sigma} . \quad (5.5)$$

Вторая задача связана с преобразованием исходной многоконтурной схемы к многолучевой относительно узла КЗ (рис. 5.2, б).

Для любого генерирующего источника можно записать следующее равенство:

$$I_i = \frac{E_i}{x_{ik}} = c_i \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}}, \quad (5.6)$$

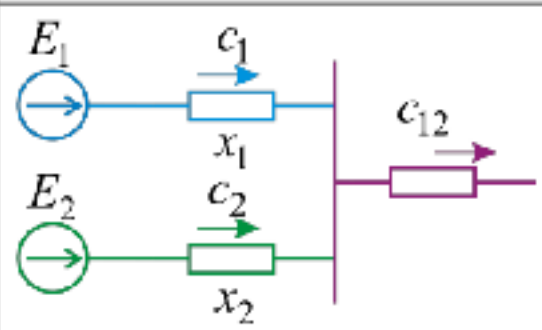
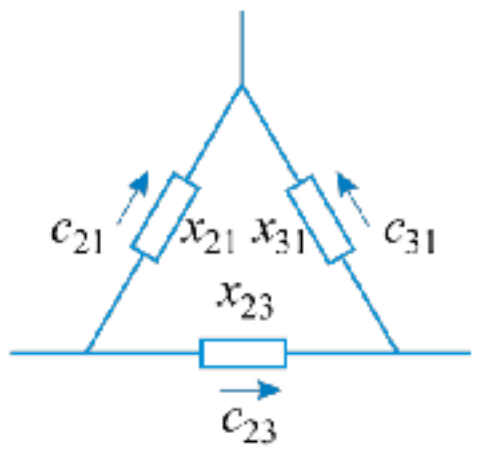
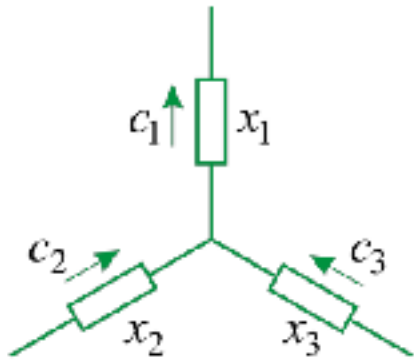
где E_i , x_{ik} – ЭДС источника и его сопротивление связи с точкой короткого замыкания в лучевой схеме (рис. 5.2, б);

E_{Σ} , x_{Σ} – эквивалентная ЭДС и реактанс исходной схемы относительно узла КЗ.

В частности, для схемы (рис. 5.2, а) имеем её результирующие параметры:

$$E_{\Sigma} = E_1 // E_2 // E_3, \quad x_{\Sigma} = x_0 + (x_1 // x_2 // x_3).$$

Основные формулы расчета коэффициентов токораспределения

Схема	Расчетные формулы
	$c_1 = \frac{c_{12}x_2 + (E_1 - E_2)/I_{\Sigma}}{x_1 + x_2};$ $c_2 = \frac{c_{12}x_1 + (E_2 - E_1)/I_{\Sigma}}{x_1 + x_2};$
	$c_1, c_2, c_3 \text{ — известные;}$ $c_{21} = \frac{c_1x_1 + c_2x_2}{x_{21}};$ $c_{31} = \frac{c_1x_1 + c_3x_3}{x_{31}};$ $c_{23} = \frac{c_2x_2 - c_3x_3}{x_{23}};$
	$c_{21}, c_{31}, c_{23} \text{ — известные;}$ $c_1 = c_{21} + c_{31};$ $c_2 = c_{21} + c_{23};$ $c_3 = c_{31} - c_{23}$

Примечание. I_{Σ} — результирующий периодический ток в месте КЗ в относительных или именованных единицах для той части схемы (или всей схемы), для которой $c_0 = 1$.

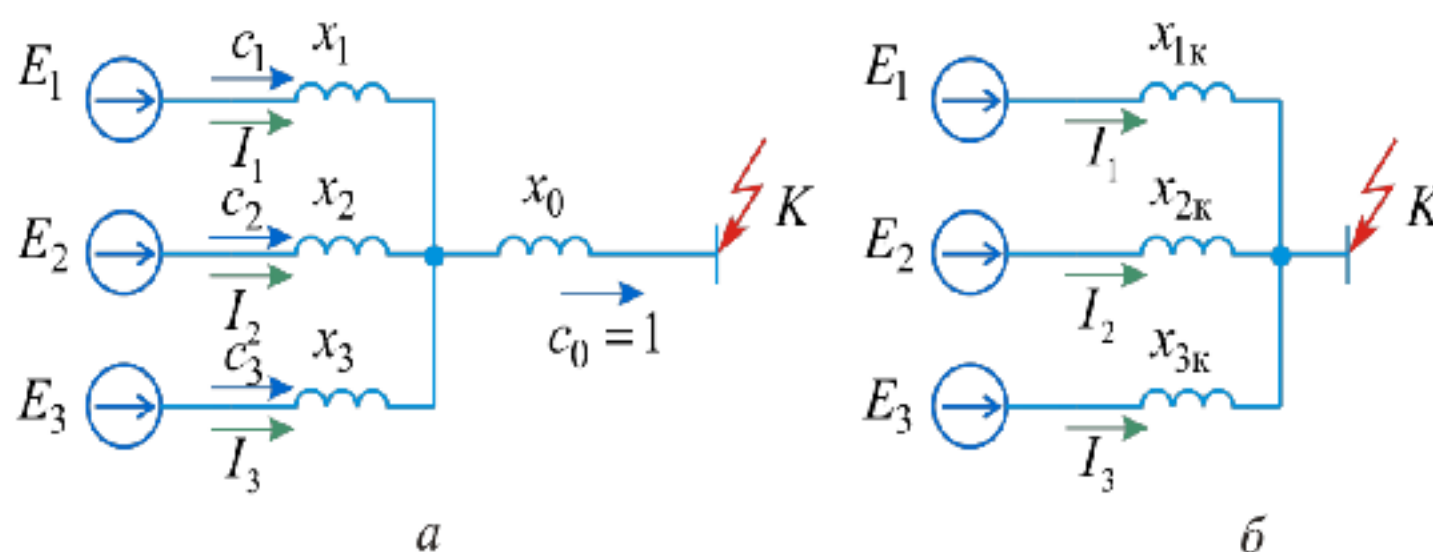


Рис. 5.2. Упрощение схемы замещения: **а** — исходная схема; **б** — многолучевая схема

Непосредственно из выражения (5.6) можно определить взаимный реактанс

между источником и точкой короткого замыкания. Это позволяет привести исходную схему (рис. 5.2, а) к лучевой (рис. 5.2, б) и приближенно учесть индивидуальные особенности источников питания.

$$x_{ik} = \frac{E_i x_{\Sigma}}{E_{\Sigma} c_i}. \quad (5.7)$$

5.2. Параметры синхронных машин в расчетах Режимов коротких замыканий



Фото 12.

Турбогенератор 500 МВА



Фото 13.

Монтаж ветроустановки



Фото 14.

Ветрогенераторы



Фото 15.

Машинный зал Саяно-Шушенской ГЭС

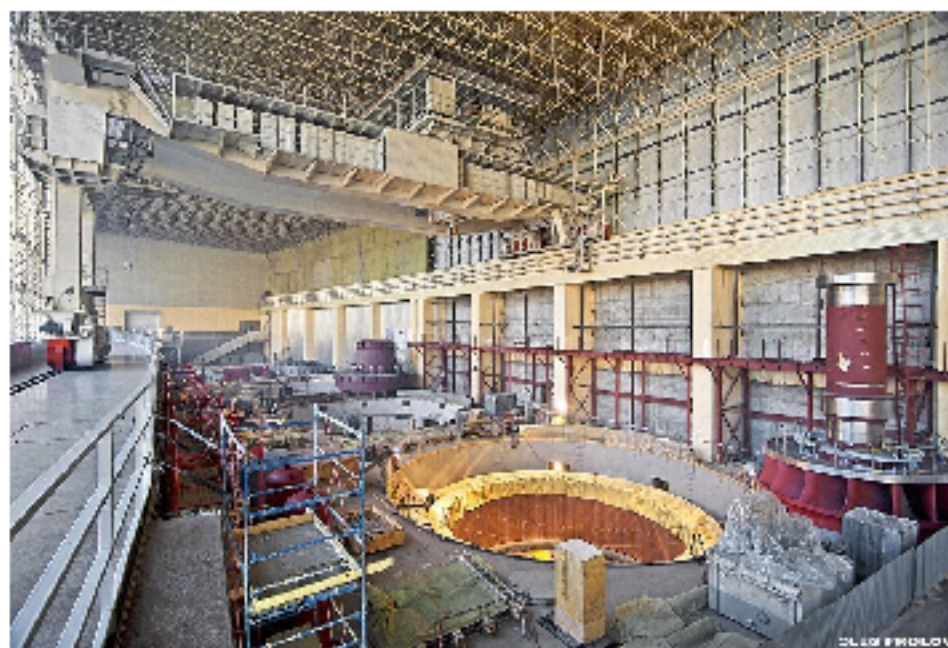


Фото 16.

Монтаж гидрогенератора Саяно-Шушенской ГЭС

1. Параметры СМ в нормальном установившемся режиме (синхронная ЭДС и синхронная реактивность)

В продольной оси СМ (d) взаимодействуют две магнитосвязанные обмотки (рис. 5.3, а): обмотка возбуждения (расположена слева) и обмотка статора.

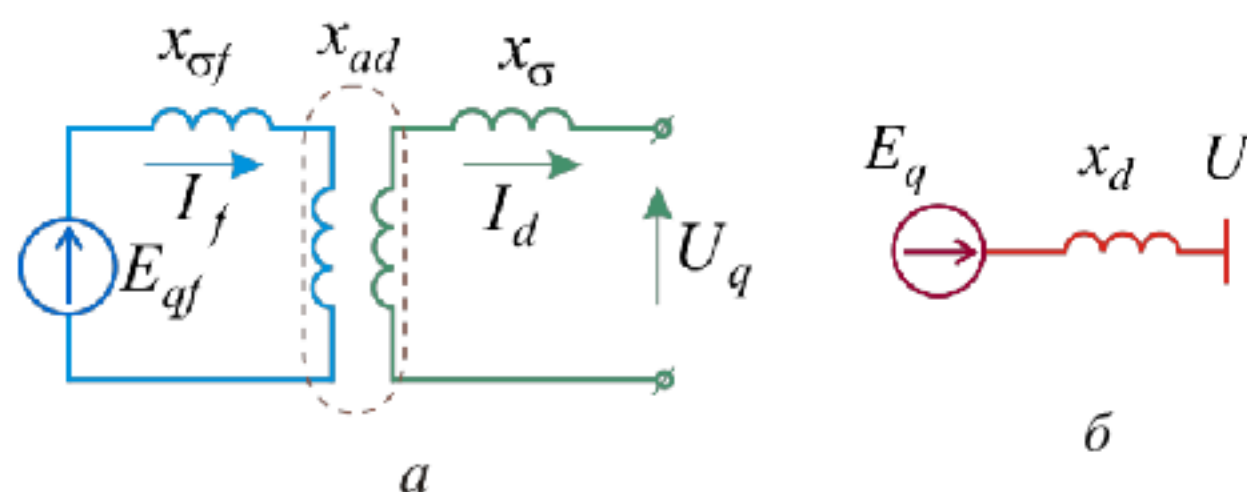


Рис. 5.3. Неявнополюсная СМ в продольной оси: **а** – обмотки статора и возбуждения; **б** – схема замещения

Реактивное сопротивление каждого контура в соответствии с физикой явлений представлено в виде двух составляющих: сопротивления рассеяния и сопротивления взаимоиндукции.

Для обмотки возбуждения имеем полное индуктивное сопротивление:

$$X_f = X_{\sigma f} + X_{ad},$$

где $X_{\sigma f}$, X_{ad} – сопротивление рассеяния обмотки возбуждения и реактивное сопротивление взаимоиндукции в продольной оси d .

Для обмотки статора имеем полное индуктивное сопротивление:

$$X_d = X_{\sigma} + X_{ad},$$

где x_{σ} , x_{ad} – реактивное сопротивление рассеяния и сопротивление взаимоиндукции в продольной оси статора.

В режиме холостого хода, равно как и в нагрузочном, ток обмотки возбуждения I_f создает *полезный поток* $\Phi_d = I_f X_{ad}$, который при вращении ротора индуцирует в обмотке статора **синхронную ЭДС**

$$E_q = \omega \Phi_d \quad \text{или в от.ед.} \quad E_{q^*} = \Phi_{d^*} \quad (5.8)$$

Неявнополюсный генератор можно представить эквивалентной схемой, приведенной на рис. 5.3, б. Вектор E_q располагается на оси q и согласно схеме замещения рассчитывается по выражению

$$E_q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2},$$

где U , I , φ – напряжение, ток и фазовый угол в нормальном режиме (или номинальные параметры СМ).

В заключение отметим, что **в установившемся режиме синхронные генераторы учитываются синхронной реактивностью x_d (паспортный параметр) и синхронной ЭДС E_q (расчетный параметр)**. Диапазон значений этих параметров в среднем составляет:

для неявнополюсных $x_{d*} = x_{q*} = 0,95 \div 2,55$; $E_q \approx 2,15$;

для явнополюсных $x_{d*} = 0,6 \div 1,45$; $x_{q*} = 0,4 \div 1,0$.

2. Параметры СМ без демпферных обмоток в режиме короткого замыкания (переходная ЭДС и переходная реактивность)

Обратимся к синхронной машине без демпферных (успокоительных) обмоток. В момент КЗ синхронная ЭДС (E_q) скачкообразно возрастает, напряжение – скачкообразно уменьшается. В силу этого при $t = 0$ параметры нормального режима (E_q , U) неизвестны и неприемлемы для расчета переходного режима, равным образом, как и x_d , связанная с E_q .

Выясним, какой ЭДС и реактивностью следует характеризовать синхронную машину в начальный момент переходного процесса с целью расчета периодической составляющей тока КЗ для $t = 0$.

В основу решения положим принцип **Ленца** т.е. неизменность результирующего потокосцепления обмотки возбуждения в момент внезапного нарушения режима (для $t = 0$ $\Psi_{f\Sigma} = \text{const.}$). Следовательно, ЭДС, созданная этим потокосцеплением, останется неизменной и такой же, что и в нормальном режиме. Для получения интересующих параметров (E'_q , x'_d) необходимо учесть взаимодействие статорной обмотки и обмотки возбуждения в момент внезапного нарушения режима. С этой целью следует осуществить преобразование двух магнитосвязанных контуров (**рис. 5.3, а**) в эквивалентную электрическую схему замещения. В результате этих преобразований получаем схемы (**рис. 5.4, в, г**), параметры которых и характеризуют СМ в начальный момент нарушения режима ($t = 0$).

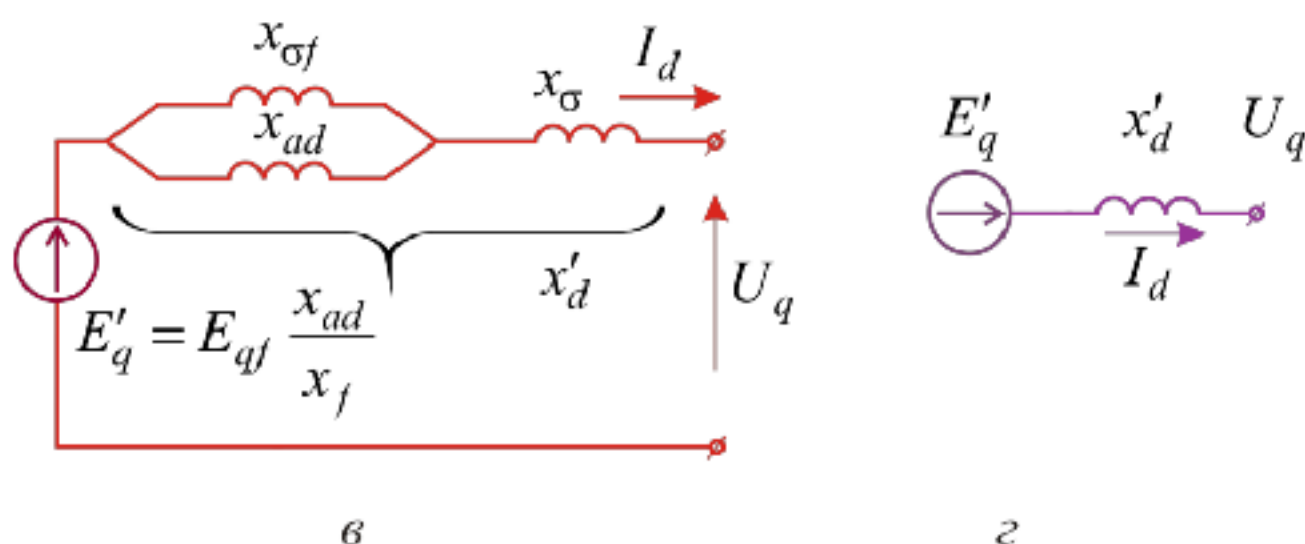


Рис. 5.4. К определению переходной ЭДС и реактивности СМ: **в** – двухконтурная схема замещения, **г** – эквивалентная одноконтурная схема замещения для расчета переходного режима

Они называются **переходными** и согласно схемам рис.5.4, **в**, **г** рассчитываются по выражениям

$$E' = \sqrt{(U_{(0)} \cos \varphi)^2 + (U_{(0)} \sin \varphi + I_{(0)} X'_d)^2} \quad (5.9)$$

– **переходная ЭДС;**

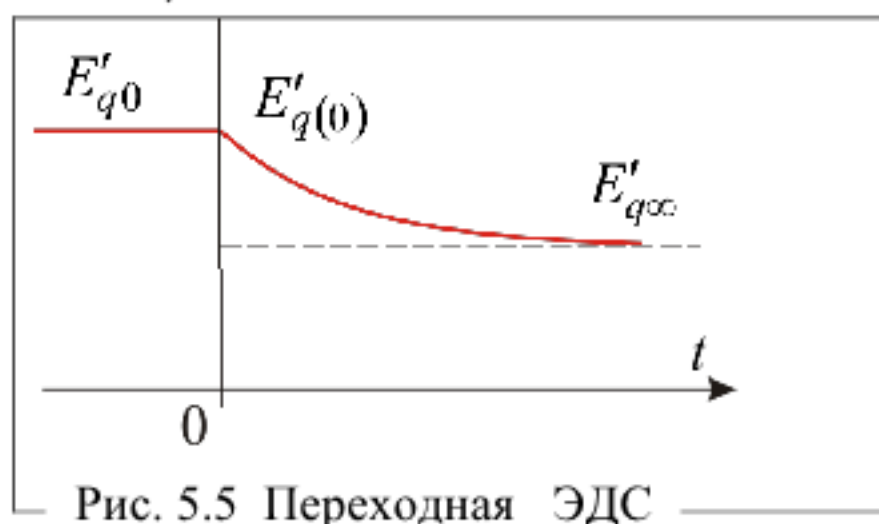
$$X'_d = X_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} = x_{\sigma} + x_{ad} // x_{\sigma f}$$

– **переходное сопротивление,**

где $U_{(0)}$ и $I_{(0)}$ – напряжение и ток до режима КЗ.

Переходная реактивность (X'_d) является паспортным параметром; в среднем на порядок меньше синхронной (X_d) и составляет: для неявнополюсных машин $X'_d = 0,15 \div 0,37$ и для явнополюсных $X'_d = 0,2 \div 0,5$.

Переходная ЭДС является расчетным параметром; в среднем составляет $E' \approx 1,09$.



Неизменность E'_q при $t=0$ определяет ее практическую ценность и позволяет рассчитывать начальное значение периодической слагаемой тока короткого замыкания. В дальнейшем, при $t > 0$, E' изменяется до значения, соответствующего новому установившемуся режиму машины (рис.5.5).

Рис. 5.5 Переходная ЭДС

3. Параметры СМ с демпферными обмотками в режиме короткого замыкания (сверхпереходная ЭДС и сверхпереходная реактивность)

Установим параметры, которыми характеризуются машины с демпферными обмотками в момент внезапного нарушения режима.

Полагаем, что помимо обмотки возбуждения на роторе имеется по одной демпферной обмотке в продольной и поперечной осях. В продольной оси (d) синхронного генератора располагаются три обмотки: статора, контура возбуждения и продольная демпферная. Для решения поставленной задачи, как и ранее, опираемся на принцип Ленца применительно к магнитно-связанным контурам. Для получения интересующих параметров воспользуемся возможностью замены таких цепей электрической схемой, аналогичной схеме трансформатора. В результате получаем интересующие параметры (E''_q, X''_d) эквивалентной схемы (рис. 5.6, в, г).

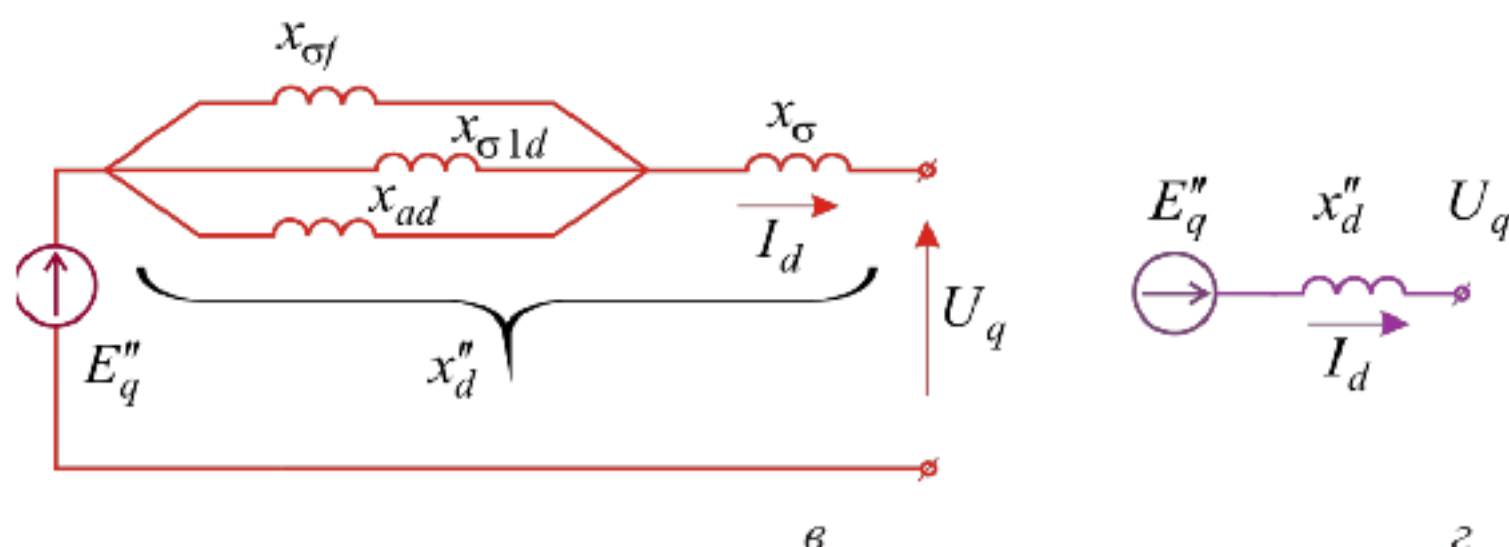


Рис. 5.6. К определению сверхпереходных ЭДС и реактивности СМ: в – трехконтурная схема, г – одноконтурная схема для расчета переходного режима

Они называются **сверхпереходными**; согласно схемам рис.5.6, в, г имеем

E'' – **сверхпереходная ЭДС** рассчитывается по выражению аналогичное (5.9), в котором X'_d заменено на X''_d ;

$X''_d = X_{\sigma} + X_{\sigma f} // X_{\sigma 1d} // X_{ad}$ – **сверхпереходная реактивность в продольной оси (паспортный параметр)**;

$X_{\sigma 1d}$ – **реактанс рассеяния продольной демпферной обмотки**.

Сверхпереходная ЭДС E'' в начальный момент переходного режима сохраняет свое значение неизменным, что и определяет ее практическую ценность.

Для современных генераторов сверхпереходная реактивность $X''_d \approx (0,14 \div 0,27)$ и несколько меньше X'_d . В практических расчетах токов короткого замыкания считают $X''_d \approx X''_q$.

4. Параметры СД и АД в режиме короткого замыкания (сверхпереходные ЭДС и сверхпереходные реактивности)

Синхронные и асинхронные двигатели (СД и АД), как и синхронные генераторы, в начальный момент КЗ характеризуются сверхпереходными параметрами

(E'', x'') . Сверхпереходная реактивность определяется пусковым током

$$x''_{*ном} = 1 / I_{пуск*ном} , \quad (5.10)$$

где $I_{пуск*ном} = I_{пуск} / I_{ном}$ – *кратность пускового тока*.

Характерными режимами работы СД является **режим перевозбуждения** и **режим недовозбуждения**. У перевозбужденного СД сверхпереходная ЭДС всегда выше подведенного напряжения ($E''_0 > U_0$). При КЗ напряжение U_0 снижается, что усиливает это неравенство и реактивный ток, посылаемый двигателем в сеть, возрастает. **Такой двигатель является дополнительным источником подпитки места КЗ.** У СД в режиме **недовозбуждения** сверхпереходная ЭДС меньше подведенного напряжения ($E''_0 < U_0$). Его влияние на ток КЗ зависит от удаленности точки КЗ. При удаленных КЗ, т. е. незначительном снижении напряжения, имевшийся знак неравенства $E''_0 < U_0$ сохраняется ($E''_0 < U_{(0)}$) и двигатель продолжает потреблять реактивный ток из сети.

При глубоком снижении напряжения, что характерно для близких КЗ, знак неравенства $E''_0 < U_0$ изменяется на противоположный,

$$E''_0 > U_{(0)}.$$

Двигатель переходит в генераторный режим, посылая реактивный ток в аварийную точку.

Асинхронный двигатель (АД) в нормальном режиме потребляет реактивный ток из внешней сети; его сверхпереходная ЭДС E''_0 меньше напряжения U_0 . По этой причине его влияние в начальный момент короткого замыкания аналогично влиянию синхронного двигателя в режиме недовозбуждения: при значительной удаленности КЗ он продолжает потреблять реактивный ток из сети и лишь при близких КЗ переходит в генераторный режим, являясь дополнительным источником подпитки места короткого замыкания. **Практическому учету при КЗ в распределительных устройствах 6, 10 кВ подлежат СД и АД мощностью 1000 кВт и более, которые связаны с местом КЗ непосредственно или через кабельную линию, тоководы, линейные реакторы, двухобмоточные трансформаторы.**

5.3. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Для подавляющего числа задач ограничиваются расчетом параметров тока КЗ для момента $t = 0$ с в силу их максимальных значений.

Ранее изложенный материал затрагивает основные аспекты расчета основных параметров тока КЗ, что позволяет здесь ограничиться порядком их выполнения и пояснениями общего характера.

Отметим, что основными параметрами режима КЗ являются:

$I''_{(0)}$ – **начальный (сверхпереходный) периодический тока КЗ;**

i_{at} – **апериодическая составляющая тока КЗ для произвольного момента времени t ;**

i_y – **ударный ток;**

I_y – **наибольшее действующее значение полного тока КЗ;**

S_K – **мощность КЗ.**

Порядок расчета этих параметров для начального момента переходного процесса состоит в следующем.

1. Выбирают систему исчисления: относительную или именованную. Независимо от системы исчисления вполне приемлемо пользоваться приближенным приведением параметров схемы замещения

(разд. 2.2.2). Для системы относительных единиц задают S_6 и принимают $U_{6i} = U_{срi}$ согласно ряду напряжений (2.28); базисные токи ступеней трансформации определяют по выражению

$$I_{6i} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{6i}}.$$

2. Для заданной системы электроснабжения составляют схему замещения, в которой все источники питания конечной мощности (генераторы, синхронные компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели, обобщенные нагрузки), подлежащие учету, вводят в схему замещения своими сверхпереходными сопротивлениями x'' и ЭДС E'' ; систему учитывают неизменным напряжением и реактивностью (см. 5.1). Учет двигательной нагрузки целесообразен при её активной мощности **1000 кВт** и более и непосредственной электрической связью с узлом КЗ (см. 5.2). Учет активных сопротивлений необходим при условии, когда для результирующего активного и реактивного сопротивлений схемы относительно точки КЗ выполняется неравенство $R_\Sigma > 0.3x_\Sigma$.

3. Рассчитывают параметры элементов схемы замещения. Сверхпереходные ЭДС E'' источников питания рассчитывают по параметрам нормального режима, предшествующего короткому замыканию. Для $E''_{(0)}$ соответствует выражение

$$E''_{(0)} = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 \pm I_0 x'')^2}.$$

В этой формуле для синхронных генераторов, компенсаторов, синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением, принимают знак «+»; для этих же машин, работающих с недовозбуждением, и асинхронных двигателей принимают знак «-».

При отсутствии данных приближенные значения сверхпереходных ЭДС и реактивностей (E''_0, x'') для генерирующих источников можно принимать согласно данных табл. 5.2.

Группу синхронных или асинхронных двигателей можно заменить одним эквивалентным.

Таблица 5.2

Средние значения x'' и E''_0
(в относительных единицах при номинальных условиях)

Элементы ЭС	x''	E''_0
1.Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0.125	1.08
2.То же мощностью 100 – 500 МВт	0.2	1.13
3.Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0.2	1.13
4.То же без демпферных обмоток	0.27	1.18
5. Синхронный двигатель	0.2	1.1
6. Синхронный компенсатор	0.2	1.2
7. Асинхронный двигатель	0.2	0.9
8. Обобщенная нагрузка	0.35	0.85

4. Упрощают схему. При наличии замкнутых контуров целесообразно на первом этапе упрощения привести схему к сложно - радиальному виду. Последующее упрощение состоит в нахождении эквивалентной ЭДС (E''_Σ) и реактивного сопротивления схемы (x_Σ) относительно узла КЗ. При преобразовании схемы рекомендуется ветви с двигательной нагрузкой не объединять с генераторными или системными ветвями. В общем случае конечная схема будет иметь лучевой вид (см. **рис. 5.2, б**). При такой схеме удаётся учесть индивидуальные особенности двигателей, генераторов и системы в расчете ударного тока короткого замыкания или периодического тока для произвольного времени t .

5. Рассчитывают основные параметры режима короткого замыкания.

5.1 Начальное (сверхпереходное) значение периодического тока короткого замыкания определяется по одному из следующих выражений:

при использовании системы именованных единиц

$$I''_{(0)\Sigma} \frac{E''_\Sigma}{\sqrt{3}x_\Sigma}, \text{ или } I''_{(0)\Sigma} = \sum \frac{E''_i}{\sqrt{3}x_i}; \quad (5.11)$$

при использовании системы относительных единиц

$$I''_{(0)\Sigma} = \frac{E''_{\Sigma*6}}{x_{\Sigma*6}} I_6, \text{ или } I''_{(0)\Sigma} = I_6 \sum \frac{E''_{i*6}}{x_{i*6}}, \quad (5.12)$$

где E''_Σ, x_Σ – результирующие параметры схемы относительно узла КЗ, приведенные к напряжению ступени КЗ;

E''_i, x_i – результирующие параметры отдельных ветвей в многолучевой схе-

ме, приведенные к $U_{кз}$;

I_6 – базисный ток, соответствующий напряжению $U_{кз}$.

5.2 Аперриодический ток короткого замыкания для времени t рассчитывается так:

$$i_{at} = \sqrt{2} I''_{(0)\Sigma} e^{-t/T_a}, \quad (5.13)$$

где T_a – эквивалентная постоянная времени для всей схемы.

При наличии нескольких генерирующих ветвей относительно точки КЗ и более детальном учете их постоянных времени имеем

$$i_{at} = \sqrt{2} \sum I''_{(0)i} e^{-t/T_{ai}}, \quad (5.14)$$

где T_{ai} – постоянная времени аперриодического тока i -й ветви схемы.

Значения T_a , T_{ai} , K_y принимаются по табл.5.3.

5.3 Ударный ток КЗ, рассчитываемый по общему ударному коэффициенту, определяется выражением

$$i_y = \sqrt{2} I''_{(0)\Sigma} K_y \quad (5.15)$$

или с учетом индивидуальных ударных коэффициентов для выделенных источников питания:

$$i_y = \sqrt{2} \sum I''_{(0)i} K_{y(i)}. \quad (5.16)$$

Значения K_y для синхронных двигателей можно принимать по табл. 4.3, для асинхронных – по табл. 4.4 или по рис. 4.20 (**раздел 4**), для эквивалентной ветви генераторы – система K_y можно принимать по данным табл. 5.3.

Таблица 5.3

Значения K_y и T_a для наиболее часто встречающихся элементов ЭЭС

Место короткого замыкания и Характеристика сети	T_a , с	K_y
1. Сборные шины 6–10 кВ станций с генераторами мощностью 30–60 МВт	0.127–0.254	1.92–1.96
2. За линейным реактором до 1000 А, Присоединенным к сборным шинам, по п. 1	0.0634–0.191	1.85–1.95
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше	0.0955–0.191	1.89–1.95
4. То же с трансформаторами 30–100 МВА	0.0634–0.159	1.85–1.94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВА и выше; сопротивление трансформаторов составляет 90 % и выше результирующего сопротивления до места КЗ	0.0634–0.127	1.85–1.92
6. То же с трансформаторами 30–100 МВА	0.048–0.0955	1.81–1.89

Место короткого замыкания и Характеристика сети	T_a, c	K_y
7. Распределительные сети 6–10 кВ	0.01	1.869
8. Ветви, защищаемые реактором с номинальным током 630 А и ниже	0.1	1.904
9. Турбогенераторы мощностью: 100–1000 МВт; 12–60 МВт	0.4–0.54; 0.16–0.25	1.975–1.98; 1.94–1.955
10. Блоки, состоящие из турбогенератора и повышающего трансформатора, 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
11. Система, связанная с шинами, где рас- сматривается КЗ, воздушными линиями, напряжением: 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; 1.717–1.78; 1.85–1.895

5.4 Наибольшее действующее значение полного тока КЗ допустимо определять с учетом единого для схемы ударного коэффициента, соответствующего лучу генераторы – система (табл. 5.3),

$$I_y = I''_{(0)\Sigma} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (5.17)$$

5.5 Мощность короткого замыкания определяется по формуле

$$S_K = I''_{(0)\Sigma} \sqrt{3} U_{cp}, \text{ или } S_K = I''_{(0)\Sigma} * S_6. \quad (5.18)$$

5.4. РАСЧЕТ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРОИЗВОЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

1. Влияние автоматического регулирования возбуждения генераторов на токи короткого замыкания

При трехфазном КЗ в цепи генератора без демпферных обмоток наряду с вынужденным периодическим током возникает **свободная переходная периодическая слагаемая**, которая затухает по экспоненциальному закону (рис.5.7). С целью поддержания напряжения в нормальном и аварийных режимах СГ снабжены автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ). Наиболее глубокое снижение напряжения происходит при близких КЗ. Для сокращения времени восстановления напряжения применяется **форсировка возбуждения** (кратковременное увеличением тока возбуждения с максимально возможной скоростью). Это приводит к появлению дополнительной слагаемой тока возбуждения, которая в свою очередь обуславливает дополнительную периодическую составляющую тока КЗ. Сказанное

позволяет написать закон изменения результирующего периодического тока КЗ с учетом действия АРВ в структурной форме:

$$I_{\Pi t} = I_{\infty} + \Delta I'_{(0)} e^{-t/T'_d} + \Delta I_{\text{пр}} F(t) \leq \frac{U_{\text{ном}}}{X_{\text{КЗ}}}, \quad (5.19)$$

где $I_{\infty} = E_{q0} / (X_d + X_{\text{КЗ}})$ – *установившийся ток КЗ без учета АРВ*;

$\Delta I'_{(0)}$ – *начальное значение свободной переходной составляющей*

тока КЗ;

T'_d – *переходная постоянная времени*;

$\Delta I_{\text{пр}}$ – *предельное приращение тока КЗ, обусловленное действием АРВ*;

$F(t)$ – *закон изменения вынужденной составляющей тока КЗ, обусловленного действием АРВ*;

Поставленное в формуле (5.19) ограничение соответствует прекращению действия АРВ при достижении напряжения генератора номинальной или иной величины.

Отметим, что в начальный момент КЗ ($t = 0$) в силу инерционности магнитных потоков в системе возбуждения АРВ (или форсировка возбуждения) не оказывает влияния на периодический ток статора. Аperiodическая слагаемая тока статора от АРВ вообще не зависят.

На рис. 5.7, в соответствии с выражением (5.19), графически изображены составляющие периодического тока короткого замыкания с учетом действия АРВ. В переходном режиме с одной стороны происходит затухание свободного переходного тока, с другой – возрастание вынужденной составляющей, обусловленной АРВ. Результирующая огибающая тока имеет сложную зависимость, которая определяется удаленностью КЗ.

2. Расчет периодической слагаемой тока КЗ в произвольный момент времени

На начальной стадии переходного процесса происходит затухание результирующего периодического тока КЗ в цепи генератора (рис. 5.8). Скорость этого затухания существенно зависит от типа источника и его электрической удаленности до места КЗ. Чем ближе источник, тем больше скорость затухания. В практических расчетах учет фактора времени и удаленности источника на суммарный периодический ток КЗ осуществляется по **расчетным кривым**. Они построены для различных типов генераторов, синхронных и асинхронных двигателей.

Расчетные кривые для генераторов представляют графическое изображение семейства зависимостей:

$$\gamma_{\Gamma t}(t) = \frac{I_{\Gamma t}}{I''_{\Gamma(0)}}, \quad (5.20)$$

где $I''_{\Gamma(0)}$ и $I_{\Gamma t}$ – *периодические слагаемые тока КЗ соответственно*

для момента $t = 0$ и произвольного времени t .

Они построены для различных удалённостей короткого замыкания (на рис. 5.8 кривые, обозначенные цифрами от 1 до 8), которые определяются параметром

$$I_{\Gamma(0)}^{**\text{ном}} = \frac{I_{\Gamma(0)}''}{I_{\Gamma(\text{ном})}} = var, \quad (5.21)$$

где $I_{\Gamma(\text{ном})}$ – номинальный ток генератора.

При близких КЗ ток генератора существенно возрастает по отношению к номинальному, так что параметр $I_{\Gamma(0)}^{**\text{ном}}$ велик. Его максимальному значению соответствует короткое замыкание на шинах генератора. Для средних значений сверхпереходной ЭДС ($E'' = 1.08$) и реактивности генератора ($X'' = 0.135$) имеем

$I_{\Gamma(0)}^{**\text{ном}} = E'' / X'' = 1.08 / 0.135 = 8$, что соответствует расчётной кривой под номером 8 на рис. 5.8.

По мере удаления точки КЗ кратность $I_{\Gamma(0)}^{**\text{ном}}$ снижается и в пределе стремится к 1. Это настолько удалённое КЗ, что напряжение на шинах генератора остаётся неизменным; ток короткого замыкания равен его номинальному току.

Типовые кривые определяют простой алгоритм их применения.

По условной электрической удалённости точки КЗ, характеризуемой параметром $I_{\Gamma(0)}^{**\text{ном}}$, выбирают соответствующую расчётную кривую. Для заданного времени t на оси абсцисс поднимаются вверх по вертикали до пересечения с выбранной расчётной кривой. С этой точки пересечения обращаются к оси ординат, на которой получают значение коэффициента затухания тока $\gamma_{\Gamma t}$, что позволяет рассчитать периодический ток для принятого времени t по выражению

$$I_{\Gamma t} = \gamma_{\Gamma t} I_{\Gamma(0)}'' \cdot \quad (5.22)$$

Приведенные на рис. 5.8 расчетные кривые являются унифицированными и применимы для турбогенераторов мощностью $12 \div 800$ МВт, гидрогенераторов мощностью до 500 МВт и синхронных компенсаторов мощностью $37.5 \div 100$ МВА. Они построены для машин с вентильной системой возбуждения. Нарастание напряжения на обмотке возбуждения при форсировке происходит скачкообразно, т. е. $T_e = 0$.

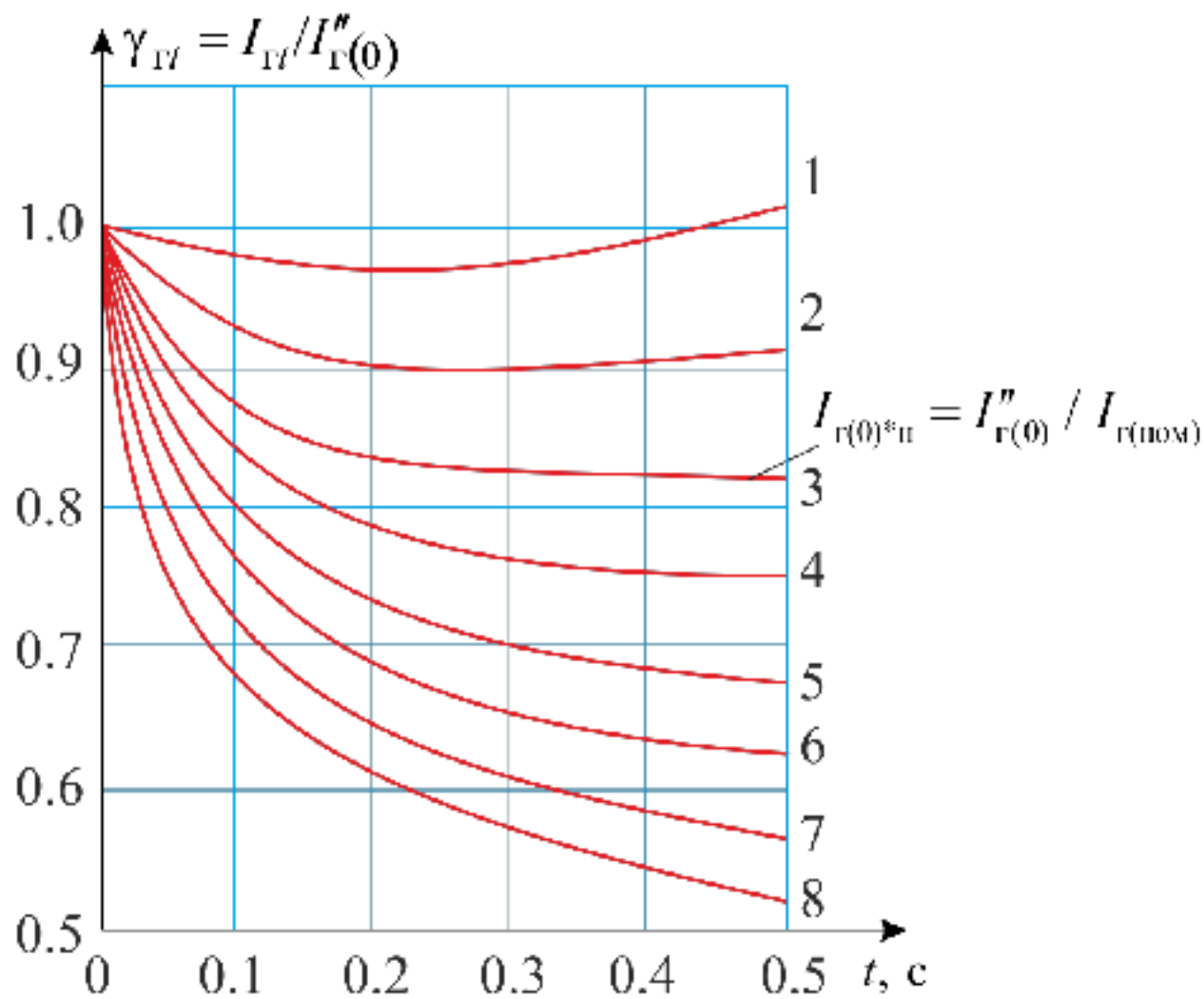


Рис. 5.8. Расчетные кривые изменения во времени периодической составляющей тока КЗ синхронных генераторов при различных удаленностях точки короткого замыкания

При расчете периодической слагаемой тока КЗ в произвольный момент времени t все этапы расчета, изложенные в разд. 5.3 для $t = 0$, остаются в силе. Применение типовых кривых предполагает индивидуальный учет источников питания (генераторов, двигателей, синхронных компенсаторов).

Этому требованию отвечает лучевая схема относительно узла КЗ. Для источников питания, связанных с узлом короткого замыкания через общие ветви, можно воспользоваться коэффициентами токораспределения C .

Для генераторов, синхронных и асинхронных двигателей определяется параметр их электрической удаленности ($I_{\Pi(0)i*ном}$) до узла короткого замыкания.

При связи машины с местом КЗ через индивидуальную реактивность этот параметр рассчитывается по формуле

$$I_{\Pi(0)i*ном} = \frac{I''_{\Pi(0)i}}{I_{iном}} = \frac{I_{\Pi(0)i*б} S_б}{S_{iном}}, \quad (5.23)$$

и при связи машин с местом КЗ через общие для них реактивности – по выражению

$$I_{\Pi(0)i*ном} = I''_{\Pi\Sigma(0)*б} \cdot c_i \frac{S_б}{S_{iном}}, \quad (5.24)$$

где $I''_{п(0)i}$ и $I_{iном}$ – периодическая слагаемая тока КЗ i -го генератора для момента $t = 0$ и его номинальный ток;

$I''_{п\Sigma(0)*6}$ – суммарное значение периодического тока короткого замыкания группы источников при $t = 0$ в относительных базисных единицах; коэффициент $c = 1$ соответствует ветви с током $I''_{п\Sigma(0)*6}$;

C_i – коэффициент токораспределения i -го источника.

По соответствующим расчетным кривым для найденного $I_{п(0)i*ном}$ и заданного времени t определяется коэффициент затухания γ_{it} периодического тока. При $I_{п(0)i*ном} < 2$ источник считается электрически удаленным, а периодическая слагаемая неизменной во времени, т. е. $\gamma_{it} = 1$. Для «системы», характеризуемой $U_c = const$, периодическая слагаемая во времени неизменна ($\gamma_c = 1$).

Искомое значение периодической составляющей тока короткого замыкания в заданный момент времени определяется по выражению

$$I_{п\Sigma t} = \sum I''_{п(0)i} \gamma_{it} \quad (5.25)$$

5.5. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КЗ

Установившейся стадией переходного процесса называется такой режим, при котором затухают все возникшие в начальный момент короткого замыкания свободные токи и прекращается действие АРВ. Регуляторы возбуждения, увеличивая ток возбуждения, вызывают рост напряжений и токов в электрической системе. Степень этого увеличения зависит от удаленности места короткого замыкания и параметров генераторов. Если для удаленных КЗ достаточно незначительное увеличение тока возбуждения для обеспечения номинального напряжения на шинах генератора, то по мере приближения короткого замыкания к шинам генератора увеличение тока возбуждения должно быть все больше и больше. Однако **рост тока возбуждения ограничен определенным пределом (потолком) $I_{fпр}$ (по условиям термической стойкости системы возбуждения) и зависит от конструктивных особенностей машины и применяемой системы возбуждения.** Для турбогенераторов можно считать $I_{*fпр} = 4$, для гидрогенераторов $I_{*fпр} = 3.2$. Следовательно, не при любой удаленности короткого замыкания напряжение на шинах генератора под воздействием АРВ может быть доведено до номинального значения.

Для каждого генератора можно установить такую внешнюю реактивность $X_{кр}$, что при коротком замыкании за этой реактивностью при предельном токе возбуждения на зажимах генератора обеспечивается номинальное напряжение. Реактивность $X_{кр}$ называется **критической** и для нее справедливо следующее соотношение:

$$I_{пр} = \frac{U_{ном}}{X_{кр}} = \frac{E_{qпр}}{X_d + X_{кр}},$$

из которого находим интересующую удаленность короткого замыкания

$$x_{кр} = x_d \frac{U_{ном}}{E_{qпр} - U_{ном}} . \quad (5.26)$$

Сравнивая фактическую удаленность короткого замыкания ($x_{кз}$) с критической ($x_{кр}$), можно характеризовать режим работы генератора в установившемся режиме КЗ. При малой удаленности КЗ, когда справедливо условие $x_{кз} < x_{кр}$, генератор работает в режиме **предельного возбуждения**. В этих условиях его синхронная ЭДС достигает предельного значения ($E_q = E_{qпр}$), соответствующего предельному току возбуждения. Напряжение на выводах генератора в этих условиях не достигает номинальной величины $U_r = U_{ном}$. В режиме предельного возбуждения установившийся ток КЗ определяется выражением

$$I_{пр} = E_{qпр} / (x_d + x_{кз}) . \quad (5.27)$$

При удаленном коротком замыкании ($x_{кз} > x_{кр}$) генератор работает в режиме **номинального напряжения**, т. е. $U_r = U_{ном}$; при этом ток возбуждения меньше своего предельного значения $I_f < I_{фпр}$. В этих условиях установившемуся току короткого замыкания соответствует расчетная формула

$$I_{\infty} = U_{ном} / x_{кз} . \quad (5.28)$$

В частном случае, когда $x_{кз} = x_{кр}$, **оба ранее рассмотренных режима существуют одновременно** и характеризуются тем, что

$I_f = I_{фпр}$, $E_q = E_{qпр}$, $U_r = U_{ном}$, а установившийся ток КЗ равен предельному значению $I_{\infty} = I_{пр}$. Он может быть рассчитан либо по выражению (5.27), либо – (5.28).

Продолжительность подъема напряжения машины под действием форсировки возбуждения до номинального значения называется **критическим временем** $t_{кр}$. Чем больше скорость подъема возбуждения, тем меньше критическое время. С увеличением удаленности короткого замыкания затухание и нарастание токов происходит медленнее. Однако, т. к. снижение напряжения при этом меньше, его восстановление под действием АРВ происходит в более короткий отрезок времени, и, следовательно, критическое время уменьшается с ростом удаленности короткого замыкания.