

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

7.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В данной главе рассматриваются три основных вида несимметричных коротких замыканий (**двухфазное, однофазное и двухфазное на землю**). С целью упрощения расчётных выражений считаем КЗ металлическим (отсутствует переходное сопротивление) и пренебрегаем активным сопротивлением силовых элементов.

Как уже отмечалось, для нахождения токов и напряжений по месту несимметричного короткого замыкания необходимо воспользоваться уравнениями (6.11, 6.12, 6.13), которые следует дополнить тремя уравнениями граничных условий.

$$U_{K1} = E_{\Sigma} - I_{K1} jX_{1\Sigma} ; \quad (6.11)$$

$$U_{K2} = 0 - I_{K2} jX_{2\Sigma} ; \quad (6.12)$$

$$U_{K0} = 0 - I_{K0} jX_{0\Sigma} . \quad (6.13)$$

Наиболее просто и наглядно граничные условия для любого несимметричного КЗ записываются в том случае, если предположить, что короткое замыкание происходит не в действительной точке заданной схемы, а на некоторых сверхпроводящих ответвлениях, подключенных по месту повреждения. Токи в этих ответвлениях являются действительными токами по месту КЗ. За положительное направление токов будем считать направление к месту КЗ.

При записи граничных выражений принимается, что фаза *A* находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз (*B* и *C*), т. е. она является **особой фазой**.

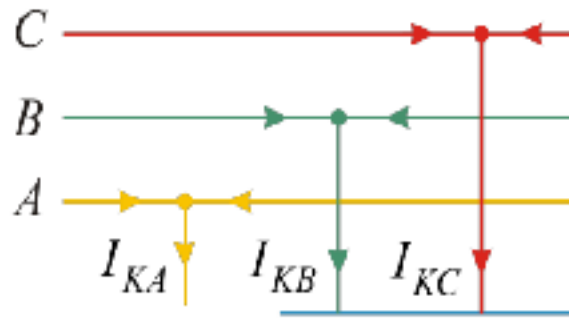
При выводе расчётных выражений считается, что отдельные последовательности представлены их эквивалентными схемами (**рис. 6.2; 6.10**) и найдены результирующие ЭДС (E_{Σ}) и реактивности ($X_{1\Sigma}, X_{2\Sigma}, X_{0\Sigma}$). Чтобы упростить запись, будем опускать индекс вида короткого замыкания, сохраняя его только в записи граничных условий.

Алгоритмически решение поставленной задачи предполагает в первую очередь нахождение симметричных составляющих токов и напряжений. Это позволяет на базе уравнений, аналогичных (6.2–6.4), определить несимметричные фазные величины токов и напряжений по месту КЗ. Приводимая далее последовательность решения системы уравнений является одной из возможных.

Второй путь решения задачи может быть основан на использовании так называемых комплексных схем замещения. Если априори считать, что они известны, то расчёт симметричных составляющих токов и напряжений существенно упрощается.

7.2. ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

При коротком замыкании $K^{(2)}$ между фазами *B* и *C* (рис.7.1) имеем граничные условия:



$$I_{KA} = 0; \quad (7.1)$$

$$I_{KB} = -I_{KC}; \quad (7.2)$$

$$U_{KB} - U_{KC} = 0. \quad (7.3)$$

Рис. 7.1. Токи в месте двухфазного

Отсутствие связи с землей дает дополнительные условия:

$$U_{K0} = 0, \quad I_{K0} = 0.$$

Граничное условие (7.1) через симметричные составляющие запишется так:

$$I_{KA} = I_{Ka1} + I_{Ka2} = 0,$$

Откуда

$$I_{Ka1} = -I_{Ka2}. \quad (7.4)$$

Выразим фазные напряжения в граничном условии (7.3) через симметричные составляющие фазы: A

$$a^2 U_{Ka1} + a U_{Ka2} - (a U_{Ka1} + a^2 U_{Ka2}) = (a^2 - a)(U_{Ka1} - U_{Ka2}) = 0.$$

Следствием этого тождества, с учетом того, что $(a^2 - a) \neq 0$, является равенство симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей

$$U_{Ka1} = U_{Ka2}. \quad (7.5)$$

Это соотношение позволяет приравнять правые части выражений (6.11) и (6.12), т. е.

$$E_{\Sigma} - I_{Ka1} jX_{1\Sigma} = -I_{Ka2} jX_{2\Sigma}.$$

Заменяя в этом выражении ток обратной последовательности через ток прямой согласно соотношения (7.4), получаем формулу для расчета тока прямой последовательности особой фазы A

$$I_{Ka1} = \frac{E_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}. \quad (7.6)$$

Токи поврежденных фаз B и C в месте КЗ вычисляются на основе выражений (6.3) и (6.4) через ток I_{Ka1} :

$$I_{KB} = a^2 I_{Ka1} + a I_{Ka2} = (a^2 - a) I_{Ka1} = -j\sqrt{3} I_{Ka1};$$

$$I_{KC} = -I_{KB} = j\sqrt{3} \cdot I_{Ka1}. \quad (7.7)$$

В практических расчетах, принимая $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$, модуль тока при $K^{(2)}$ можно выразить через ток трехфазного короткого замыкания в этой же точке:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E_\Sigma}{2X_{1\Sigma}} \approx 0,87 \cdot I_K^{(3)}.$$

Заменяя в выражении (6.12) ток обратной последовательности через ток прямой последовательности согласно (7.4), находим симметричные составляющие напряжений U_{Ka2} , U_{Ka1} :

$$U_{Ka1} = I_{Ka1}jX_{2\Sigma} = U_{Ka2} \quad (7.8)$$

и фазные напряжения в месте короткого замыкания:

$$U_{KA} = U_{Ka1} + U_{Ka2} = 2U_{Ka1} = 2I_{Ka1}jX_{2\Sigma}; \quad (7.9)$$

$$U_{KB} = U_{KC} = a^2U_{Ka1} + aU_{Ka2} = -U_{Ka1} = -\frac{U_{KA}}{2}. \quad (7.10)$$

Как отмечалось ранее, ряд приведённых выше соотношений можно получить на основе комплексной схемы замещения для двухфазного КЗ (см. разд. 7.7, рис. 7.8,а). Непосредственно из этой схемы следует: напряжение прямой и обратной последовательностей одинаковы, что соответствует выражению (7.5); ток прямой и обратной последовательностей равен по величине и противоположен по знаку [см. соотношение (7.4)]. Непосредственно из контура прямая – обратная последовательность определяется ток I_{Ka1} ; этому соответствует формула (7.6). Напряжение U_{Ka2} равно падению напряжения от тока I_{Ka1} на реактансе $X_{2\Sigma}$ [см. (7.9)].

Полученные соотношения для симметричных составляющих токов (7.4) и напряжений (7.5) позволяют построить векторные диаграммы по месту короткого замыкания (см. рис. 7.2).

Построение диаграммы токов (рис. 7.2, а). Принимая вектор ЭДС чисто мнимым ($E_\Sigma = jE_\Sigma$), согласно выражения (7.6) получаем вектор тока I_{Ka1} величиной вещественной. По оси (+1) откладываем в масштабе вектор I_{Ka1} и со сдвигом -120° строим вектор I_{Kb1} и 120° – вектор I_{Kc1} .

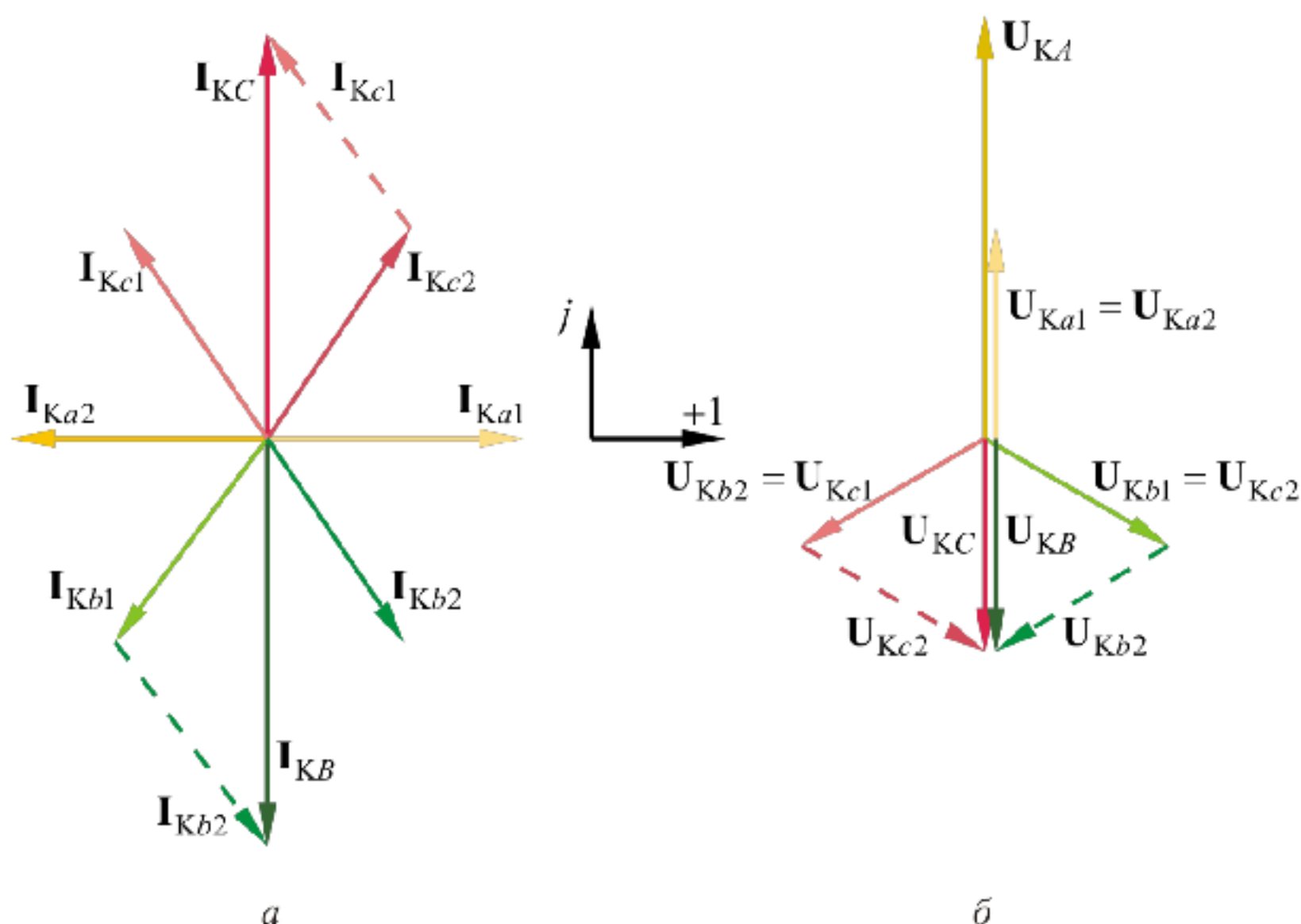


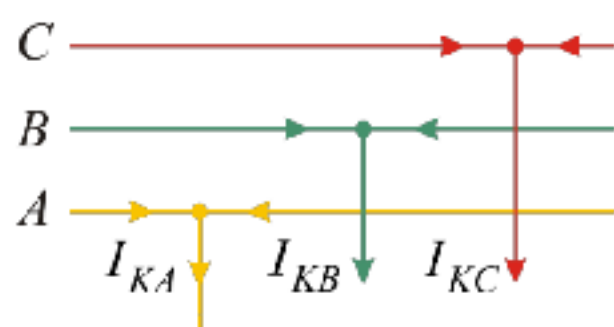
Рис. 7.2. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в месте двухфазного КЗ

С построенной системой токов прямой последовательности согласовываем систему токов обратной последовательности. Из соотношения (7.4) вектор I_{Ka2} по модулю равен току I_{Ka1} и сдвинут на 180° , что позволяет вектор I_{Ka2} согласовать с I_{Ka1} . Симметричные составляющие I_{Kb2} , I_{Kc2} по известному правилу ориентируются относительно вектора I_{Ka2} . Геометрическая сумма симметричных составляющих одноименной фазы дает результирующий вектор тока. Ток фазы А равен нулю; для получения тока I_{KB} вектор I_{Kb1} складываем с вектором I_{Kb2} (показан пунктиром).

Аналогично строится диаграмма напряжений, которая по своему расположению согласуется с токовой. Это согласование определяется соотношением (7.8), из которого следует, что вектор U_{Ka1} опережает вектор I_{Ka1} на 90° , т. е. вектор U_{Ka1} располагается в положительном направлении по мнимой оси. Дополняя прямую последовательность векторами U_{Kb1} , U_{Kc1} , переходим к построению обратной последовательности. Вектор $U_{Ka2} = U_{Ka1}$; это соотношение позволяет сориентировать вектор напряжения обратной последовательности особой фазы А по отношению к вектору напряжения прямой последовательности. Суммируя симметричные составляющие напряжений одноименной фазы, получаем несимметричную систему напряжений U_{KA} , U_{KB} , U_{KC} по месту короткого замыкания.

7.3. ОДНОФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ

При замыкании особой фазы A на землю (рис. 7.3), что соответствует $K^{(1)}$, граничные условия имеют вид:



$$U_{KA} = 0; \quad (7.11)$$

$$I_{KB} = 0; \quad (7.12)$$

$$I_{KC} = 0. \quad (7.13)$$

Рис. 7.3. Токи в месте однофазного КЗ на землю

Нетрудно убедиться, что при выполнении условий (7.12) и (7.13) симметричные составляющие токов в месте КЗ согласно формул (6.5) – (6.7) связаны простым соотношением:

$$I_{Ka1} = I_{Ka2} = I_{K0} = \frac{1}{3} I_{KA}. \quad (7.14)$$

Для напряжения фазы A , в соответствии с (7.11), можно записать:

$$U_{KA} = U_{Ka1} + U_{Ka2} + U_{K0} = 0. \quad (7.15)$$

Заменяя в уравнении (7.15) симметричные составляющие напряжений их выражениями из (6.11) – (6.13) и учитывая взаимосвязь симметричных составляющих токов согласно (7.14), получим уравнение

$$E_{\Sigma} - j I_{Ka1} (x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) = 0,$$

что позволяет записать расчетное выражение для тока прямой последовательности особой фазы A

$$I_{Ka1} = \frac{E_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (7.16)$$

Зная I_{Ka1} , можно рассчитать полный ток поврежденной фазы A в месте КЗ, используя условие (7.14):

$$I_{KA} = 3 I_{Ka1}; \quad (7.17)$$

он же является током, протекающим в земле, т. е.

$$I_z = 3 I_{K0} = I_{KA}.$$

Симметричные составляющие напряжений \mathbf{U}_{K0} , \mathbf{U}_{Ka2} на основе выражений (6.13), (6.12) и \mathbf{U}_{Ka1} на основе условия (7.15) вычисляются по следующим формулам:

$$\mathbf{U}_{K0} = -\mathbf{I}_{K0} j x_{0\Sigma} = -\mathbf{I}_{Ka1} j x_{0\Sigma}; \quad (7.18)$$

$$\mathbf{U}_{Ka2} = -\mathbf{I}_{Ka2} j x_{2\Sigma} = -\mathbf{I}_{Ka1} j x_{2\Sigma}; \quad (7.19)$$

$$\mathbf{U}_{Ka1} = -(\mathbf{U}_{Ka2} + \mathbf{U}_{K0}) = \mathbf{I}_{Ka1} j (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}). \quad (7.20)$$

Соотношение (7.14) позволило конечные выражения для симметричных составляющих напряжений записать через ток прямой последовательности особой фазы.

Остаточные напряжения неповрежденных фаз B и C в месте КЗ находим на основе симметричных составляющих \mathbf{U}_{Ka1} , \mathbf{U}_{Ka2} , \mathbf{U}_{K0} :

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{KB} &= a^2 \mathbf{U}_{Ka1} + a \mathbf{U}_{Ka2} + \mathbf{U}_{K0} = \mathbf{I}_{Ka1} j \left[(a^2 - a) x_{2\Sigma} + (a^2 - 1) x_{0\Sigma} \right]; \\ \mathbf{U}_{KC} &= \mathbf{I}_{Ka1} j \left[(a - a^2) x_{2\Sigma} + (a - 1) x_{0\Sigma} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

В комплексной схеме замещения (см. рис. 7.8, б) схемы 1, 2, 0 соединены последовательно, образуя один контур. Из этой схемы вытекает условие (7.14): равенство симметричных составляющих токов всех трёх последовательностей. Ток \mathbf{I}_{Ka1} представляет результат деления ЭДС \mathbf{E}_Σ на суммарный реактанс контура, что и отражает формула (7.16). Условие (7.15) и выражения для симметричных составляющих напряжений (7.18) – (7.20) также могут быть записаны непосредственно из схем 1, 2, 0 комплексной схемы для $K^{(1)}$.

Используя полученные соотношения между симметричными составляющими токов (7.14) и напряжений (7.18) – (7.20) по месту короткого замыкания, **можно построить векторные диаграммы, изображенные на рис. 7.4.** Вектора тока и напряжения нулевой последовательности прочерчены один раз и в последующем используются при построении векторной диаграммы каждой фазы.

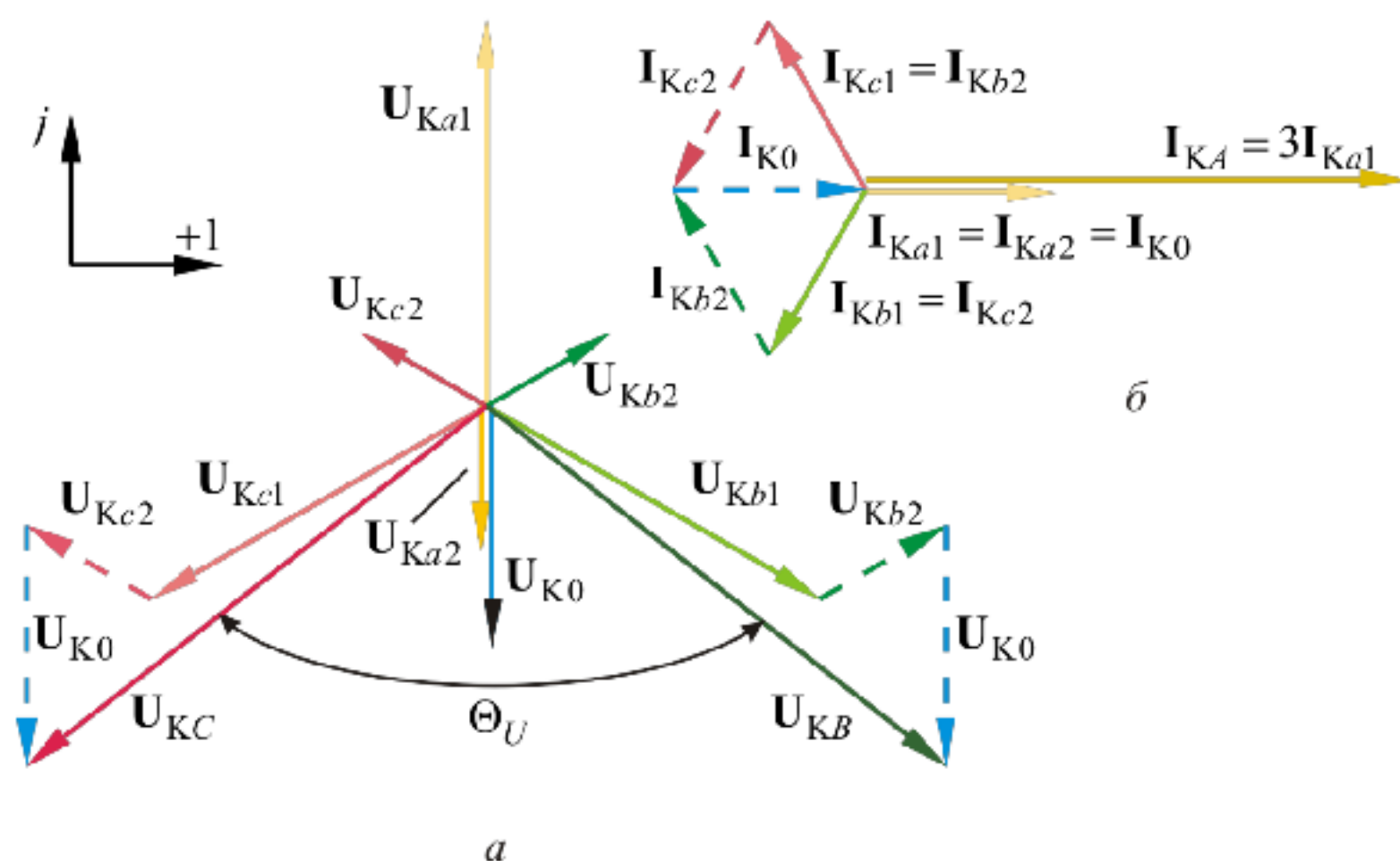
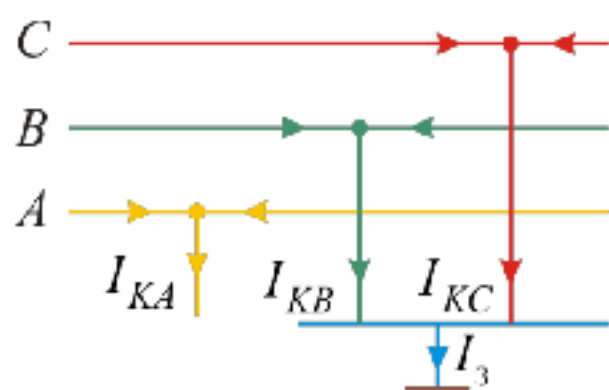


Рис. 7.4. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте однофазного КЗ

Угол Θ_U между напряжениями неповрежденных фаз (В и С) зависит от соотношения между $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$. Он изменяется в широких пределах: $60^\circ \leq \Theta_U \leq 180^\circ$. Нижний предел соответствует условию $X_{0\Sigma} = \infty$; к верхнему пределу угол Θ стремится при $X_{0\Sigma} \rightarrow \infty$. В частном случае, когда $X_{2\Sigma} = X_{0\Sigma}$, угол $\Theta_U = 120^\circ$.

7.4. ДВУХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

При одновременном замыкании фаз В и С на землю в одной точке (рис.7.5), что соответствует ($K^{(1,1)}$), граничные условия имеют вид:



$I_{KA} = 0;$	(7.22)
$U_{KB} = 0;$	(7.23)
$U_{KC} = 0.$	(7.24)

Рис. 7.5. Токи в месте двухфазного КЗ на землю

Условия (7.23), (7.24) дают простые соотношения между симметричными составляющими напряжений:

$$U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0} = \frac{1}{3} U_{KA}. \quad (7.25)$$

Ток неповрежденной фазы А, согласно граничному условию (7.22), запишем в развернутой форме:

$$I_{Ka1} + I_{Ka2} + I_{K0} = 0. \quad (7.26)$$

Разрешим уравнения (6.11) – (6.13) относительно симметричных составляющих токов, учитывая, что согласно (7.25) $U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0}$

$$I_{Ka1} = \frac{E_{\Sigma} - U_{Ka1}}{jX_{1\Sigma}}, \quad I_{Ka2} = -\frac{U_{Ka1}}{jX_{2\Sigma}}, \quad I_{K0} = -\frac{U_{Ka1}}{jX_{0\Sigma}}. \quad (7.27)$$

Замена в уравнении (7.26) токов I_{Ka2} и I_{K0} функциональными зависимостями (7.27) позволяет получить расчетную формулу для симметричных составляющих напряжений:

$$U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0} = I_{Ka1} j \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = I_{Ka1} j (X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}). \quad (7.28)$$

Рассчитаем симметричные составляющие токов. Для этого в каждом из выражений (7.27) заменим напряжение U_{Ka1} функциональной зависимостью (7.28). В результате получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{Ka1} &= \frac{E_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma})}; \\ I_{Ka2} &= -I_{Ka1} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}; \\ I_{K0} &= -I_{Ka1} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (7.29)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ в конечном итоге определяются через ток прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} I_{KB} &= a^2 I_{Ka1} + a I_{Ka2} + I_{K0} = I_{Ka1} \left(a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + a X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) = m^{(1,1)} \cdot I_{Ka1}; \\ I_{KC} &= I_{Ka1} \left(a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2 X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) = m^{(1,1)} \cdot I_{Ka1}. \end{aligned} \right\}$$

или

$$(7.30) \quad \boxed{I_{KB} = I_{KC} = m^{(1,1)} \cdot I_{Ka1}} \quad (7.30)$$

Модули комплексных коэффициентов $m^{(1,1)}$, представляющие собой выражения, заключенные в круглые скобки, одинаковы и записываются так:

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}. \quad (7.31)$$

В зависимости от соотношения между $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ значение коэффициента $m^{(1.1)}$ находится в пределах

$$1.5 \leq m^{(1.1)} \leq \sqrt{3}.$$

Нижний предел наступает при $X_{2\Sigma} = X_{0\Sigma}$, а верхний – при $X_{2\Sigma} / X_{0\Sigma}$, равном 0 или ∞ .

Полное напряжение неповрежденной фазы в месте короткого замыкания определяется из (7.25) и составляет

$$U_{Ka} = 3 \cdot U_{Ka1}. \quad (7.32)$$

напряжение других фаз (В и С) равно нулю. Ток, протекающий в земле, определяется суммой токов поврежденных фаз, которая равна утроенному току нулевой последовательности:

$$I_3 = (I_{KB} + I_{KC}) = 3 \cdot I_{K0}.$$

Отметим, что при $X_{0\Sigma} \rightarrow \infty$ двухфазное короткое замыкание на землю $K^{(1.1)}$ переходит в обычное двухфазное замыкание $K^{(2)}$. С точки зрения получения расчетных выражений двухфазное короткое замыкание на землю ($K^{(1.1)}$) является наиболее сложным видом повреждения.

Существенно проще основные соотношения для симметричных составляющих тока и напряжения можно получить из комплексной схемы замещения (рис. 7.8,в).

Она представляет параллельное соединение эквивалентных схем прямой, обратной и нулевой последовательностей. При таком соединении симметричные составляющие напряжений одинаковы ($U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0}$), что отражено в соотношении (7.25), и определяются выражением (7.28). Ток прямой последовательности (I_{Ka1}) представляет результат деления результирующей ЭДС (E_Σ) на эквивалентный реактанс схемы $X_{1\Sigma} + (X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma})$, что соответствует первому выражению (7.29). Токи I_{Ka2} и I_{K0} находим по формулам распределения тока I_{Ka1} между двумя параллельными ветвями с реактивностями $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ [см. (7.29)].

Векторные диаграммы токов и напряжений в месте $K^{(1.1)}$ представлены на рис. 7.6. При построении диаграммы напряжений учтено, что, согласно (7.25), симметричные составляющие напряжений равны между собой по величине и фазе.

Для построения векторной диаграммы токов используются соотношения (7.29), из которых следует, что сумма токов обратной и нулевой последовательностей по модулю даёт ток прямой последовательности; токи I_{Ka2} и I_{K0} по знаку противоположны току I_{Ka1} .

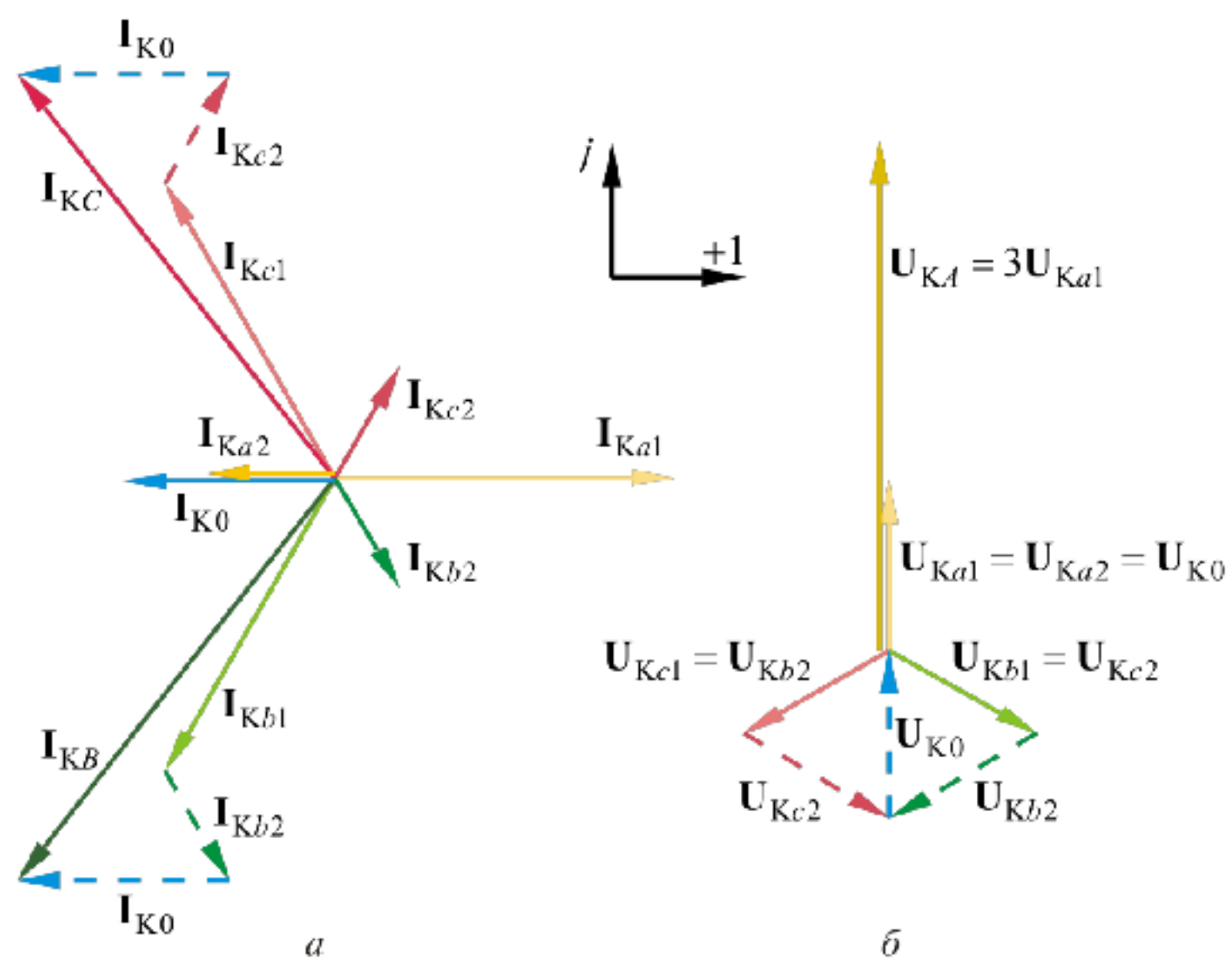


Рис. 7.6. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в месте двухфазного КЗ на землю

Отметим, что векторная диаграмма напряжений при $K^{(1,1)}$ по своему виду тождественна векторной диаграмме токов при $K^{(1)}$. Такая же аналогия имеет место между векторной диаграммой токов при $K^{(1,1)}$ и напряжений при $K^{(1)}$.

7.5. Обобщенные выражения для несимметричных Коротких замыканий

Анализ расчетных выражений, полученных в трех последних разделах, показывает, что все без исключения параметры, представляющие практический интерес при анализе несимметричных КЗ, выражаются через ток прямой последовательности. **При этом многие из этих параметров можно представить в обобщенном виде**, справедливом для любого несимметричного короткого замыкания. Поэтому при поперечной несимметрии в первую очередь необходим расчет тока прямой последовательности.

Структура выражений (7.6), (7.16), (7.29) позволяет записать универсальную формулу для расчета тока прямой последовательности при любом (n) виде несимметричного КЗ:

$$I_{K1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(n)})}, \quad (7.33)$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительная реактивность, которая для каждого вида короткого замыкания определяется сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей:

$$X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma}; \quad X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}; \quad X_{\Delta}^{(1,1)} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}.$$

В свою очередь, модуль тока при любом несимметричном коротком замыкании можно вычислить по выражению

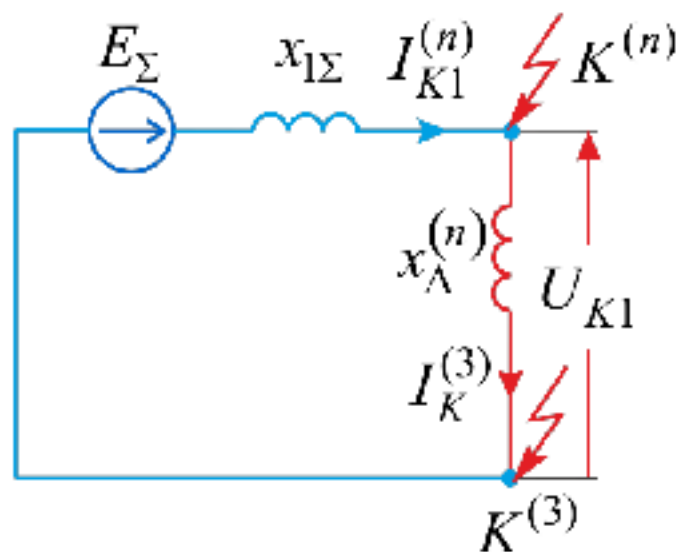
$$I_K^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{K1}^{(n)}, \quad (7.34)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, характеризующий рассматриваемый вид короткого замыкания, причем

$$m^{(2)} = \sqrt{3}; \quad m^{(1)} = 3; \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}.$$

Обобщенное выражение (7.33) отражает **правило эквивалентности прямой последовательности** (рис. 7.7): ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ в точке $K^{(n)}$ численно равен току трехфазного короткого замыкания в фиктивной точке $K^{(3)}$, удаленной от реальной точки несимметричного замыкания на дополнительное сопротивление $X_{\Delta}^{(n)}$, определяемое сопротивлениями обратной ($X_{2\Sigma}$) и нулевой ($X_{0\Sigma}$) последовательностей.

Расчетные выражения для симметричных составляющих напряжений любого несимметричного КЗ имеют универсальную запись (7.35):



$$\left. \begin{aligned} U_{K1} &= I_{K1} jx_{\Delta}; \\ U_{K2} &= -I_{K2} jx_{2\Sigma}; \\ U_{K0} &= -I_{K0} jx_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\} (7.35)$$

Рис. 7.7. Иллюстрация правила эквивалентности прямой последовательности

Установленная идентичность между токами прямой последовательности несимметричных коротких замыканий и током при некотором эквивалентном трехфазном замыкании указывает на то, что все полученные ранее выражения для тока трехфазного КЗ и практические методы его расчета можно распространить на случаи несимметричных коротких замыканий.

7.6. Сравнение токов различных видов короткого замыкания

Из всех рассмотренных видов коротких замыканий расчет токов при трехфазном коротком замыкании является наиболее простым. Из этих соображений практический интерес представляют примерные пределы, в которых могут быть величины токов при несимметричных КЗ по сравнению с величинами токов трехфазного короткого замыкания. В общем виде указанные соотношения могут быть определены на основе выражений (7.33), (7.34):

$$K_{(n-3)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = \frac{m^{(n)} E_{\Sigma} x_{1\Sigma}}{(x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}) E_{\Sigma}} = \frac{m^{(n)}}{1 + \frac{x_{\Delta}^{(n)}}{x_{1\Sigma}}}. \quad (7.36)$$

Найдем пределы этих отношений для каждого вида несимметричного короткого замыкания.

Для двухфазного КЗ имеем $m = \sqrt{3}$, $x_{\Delta} = x_{2\Sigma}$. Для начального момента короткого замыкания в любой точке реактанс прямой и обратной последовательностей практически одинаковы ($x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$).

В этих условиях $K_{(2-3)} = \sqrt{3} / 2$, т. е. ток двухфазного замыкания меньше тока трехфазного и они находятся в соотношении

$$I_K^{(2)} \approx 0,87 \cdot I_K^{(3)}.$$

При однофазном КЗ $m = 3$, $x_{\Delta} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$. Суммарное сопротивление нулевой последовательности изменяется в широких пределах ($0 < x_{0\Sigma} < \infty$). При этих условиях отношение токов составит

$$0 < K_{(1-3)} < 1.5.$$

Нижний предел наступает при $X_{0\Sigma} = \infty$, а верхний – при $X_{0\Sigma} = 0$.

Для двухфазного КЗ на землю

$$m = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad X_{\Delta} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}.$$

Принимая $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$, $X_{0\Sigma} = 0$, находим верхний предел $K_{(1.1-3)} = \sqrt{3}$. При разземлении всех нейтралей $X_{0\Sigma} = \infty$ и данный вид КЗ переходит в простое двухфазное, давая нижний предел отношения $K_{(1.1-3)} = \sqrt{3}/2$, равный $\sqrt{3}/2$. Следовательно,

$$X_{1\Sigma} \frac{\sqrt{3}}{2} < K_{(1.1-3)} < \sqrt{3}$$

С точки зрения изменения соотношений между токами $I_K^{(1)}$ и $I_K^{(1,1)}$, по сравнению с током трехфазного замыкания $I_K^{(3)}$, существует граничное условие: **при равенстве результирующих сопротивлений всех тр-х последовательностей ($X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = X_{0\Sigma}$) наблюдается равенство токов однофазного, двухфазного на землю и трехфазного коротких замыканий ($I_K^{(1)} = I_K^{(1,1)} = I_K^{(3)}$)**. По мере увеличения $X_{0\Sigma}$ значения токов $I_K^{(1)}$ и $I_K^{(1,1)}$ становятся меньше тока $I_K^{(3)}$ и, наоборот, при $X_{0\Sigma} < X_{1\Sigma}$ токи несимметричных замыканий $K^{(1)}$, $K^{(1,1)}$ превосходят ток трехфазного КЗ. Суммарное сопротивление нулевой последовательности зависит от количества заземленных нейтралей в системе. Увеличение межсистемных связей и трансформаторов с заземленной нейтралью приводит к снижению $X_{0\Sigma}$ и соответственно к росту токов несимметричных КЗ, усложняя условия работы выключателей.

7.7. Комплексные схемы замещения

Полученные в предшествующих разделах (7.2 – 7.4) соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в месте КЗ позволяют

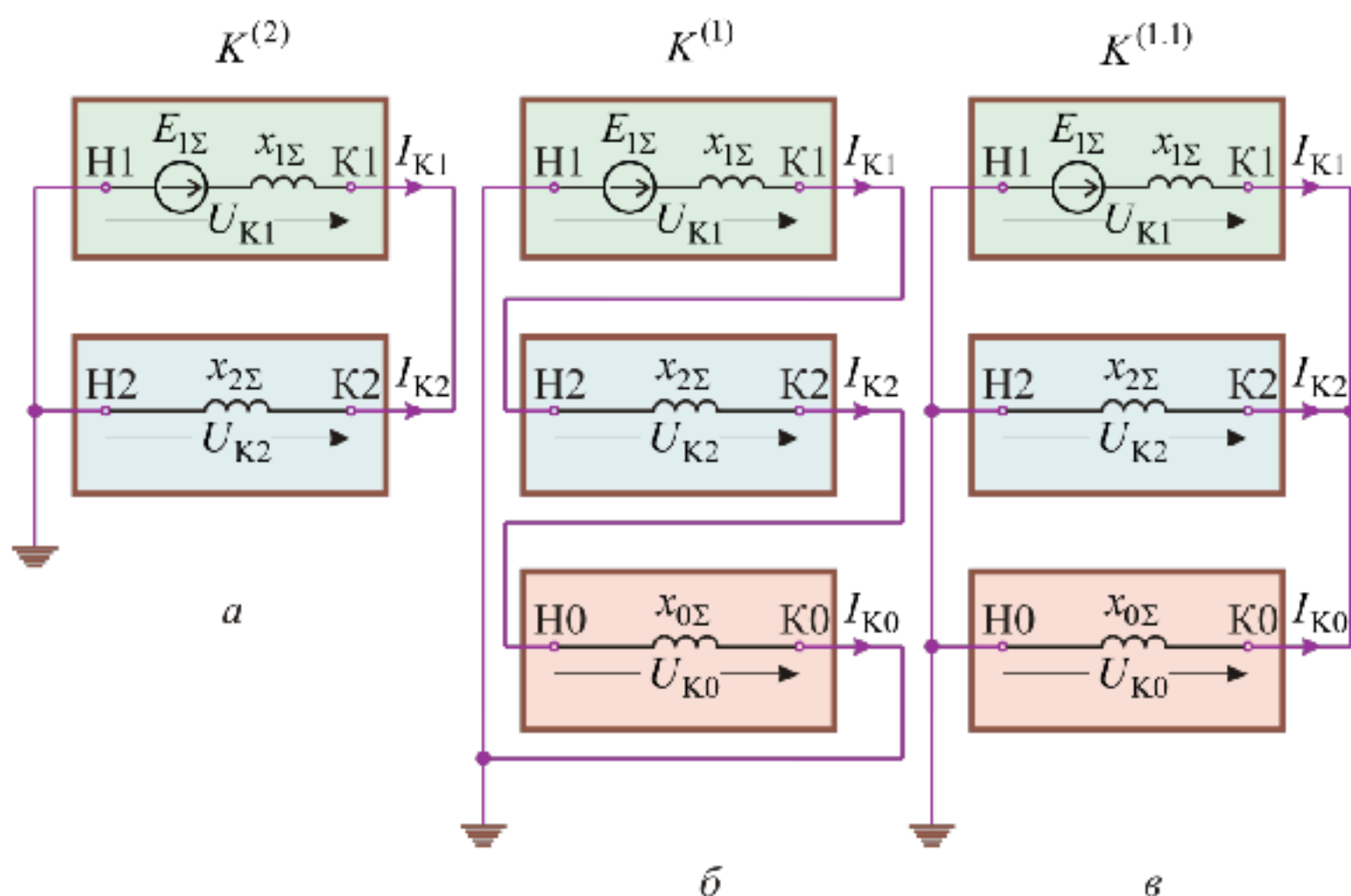


Рис.7.8. Комплексные схемы замещения при несимметричном КЗ:
а – двухфазном; **б** – однофазном; **в** – двухфазном на землю
 (Н – начало схемы, К – конец схемы)

для каждого вида несимметрии соединить между собой схемы отдельных последовательностей и **образовать комплексную схему замещения (рис. 7.8)**.

Соединение осуществляется сверхпроводниками; способ соединения зависит от вида КЗ. Здесь каждый прямоугольник представляет собой эквивалентную схему замещения определенной последовательности, окаймленную клеммами начала (Н) и конца (К), между которыми и осуществляются соединения.

Для двухфазного короткого замыкания $K^{(2)}$ были получены соотношения для симметричных составляющих тока ($I_{Ka1} = -I_{Ka2}$) и напряжения ($U_{Ka1} = U_{Ka2}$), которые соблюдаются и в комплексной схеме (рис. 7.8,а).

При $K^{(1)}$ имеем $I_{Ka1} = I_{Ka2} = I_{K0}$, что отвечает последовательному соединению схем прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом выполняется и условие для напряжения поврежденной фазы: $U_{Ka1} + U_{Ka2} + U_{K0} = 0$.

Двухфазному замыканию на землю соответствует параллельное соединение схем прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно клемм «Н» и «К», что отвечает равенству симметричных составляющих напряжений

$$(U_{Ka1} = U_{Ka2} = U_{K0}).$$

Комплексные схемы замещения хорошо иллюстрируют правило эквивалентности прямой последовательности и удобны при использовании вычислительной техники.

Для расчета тока прямой последовательности наряду со схемой прямой последовательности требуется знание дополнительного сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$. Его расчет для сложных схем затруднителен. Использование комплексных схем замещения при расчетах несимметричных режимов по компьютерным программам устраняет

указанное затруднение и позволяет дополнительно иметь картину распределения токов отдельных последовательностей на интересующих элементах.

На **рис. 7.9, а** приведена схема, для которой на **рис. 7.9, б** представлена комплексная схема замещения для случая двухфазного короткого замыкания $K^{(2)}$.

На ее базе несложно получить **схему (рис. 7.9, в), эквивалентную токам прямой последовательности**. Это осуществляется простыми преобразованиями. Для схемы прямой последовательности результирующая реактивность и ЭДС рассчитываются по таким выражениям:

$$X_{1A} = X_1 // X_2 + X_3 + X_4, \quad X_{1B} = X_5 + X_6, \quad X_{1\Sigma} = X_{1A} // X_{1B};$$

$$E_{\Sigma} = \frac{E_1 X_{1B} + E_2 X_{1A}}{X_{1A} + X_{1B}}.$$

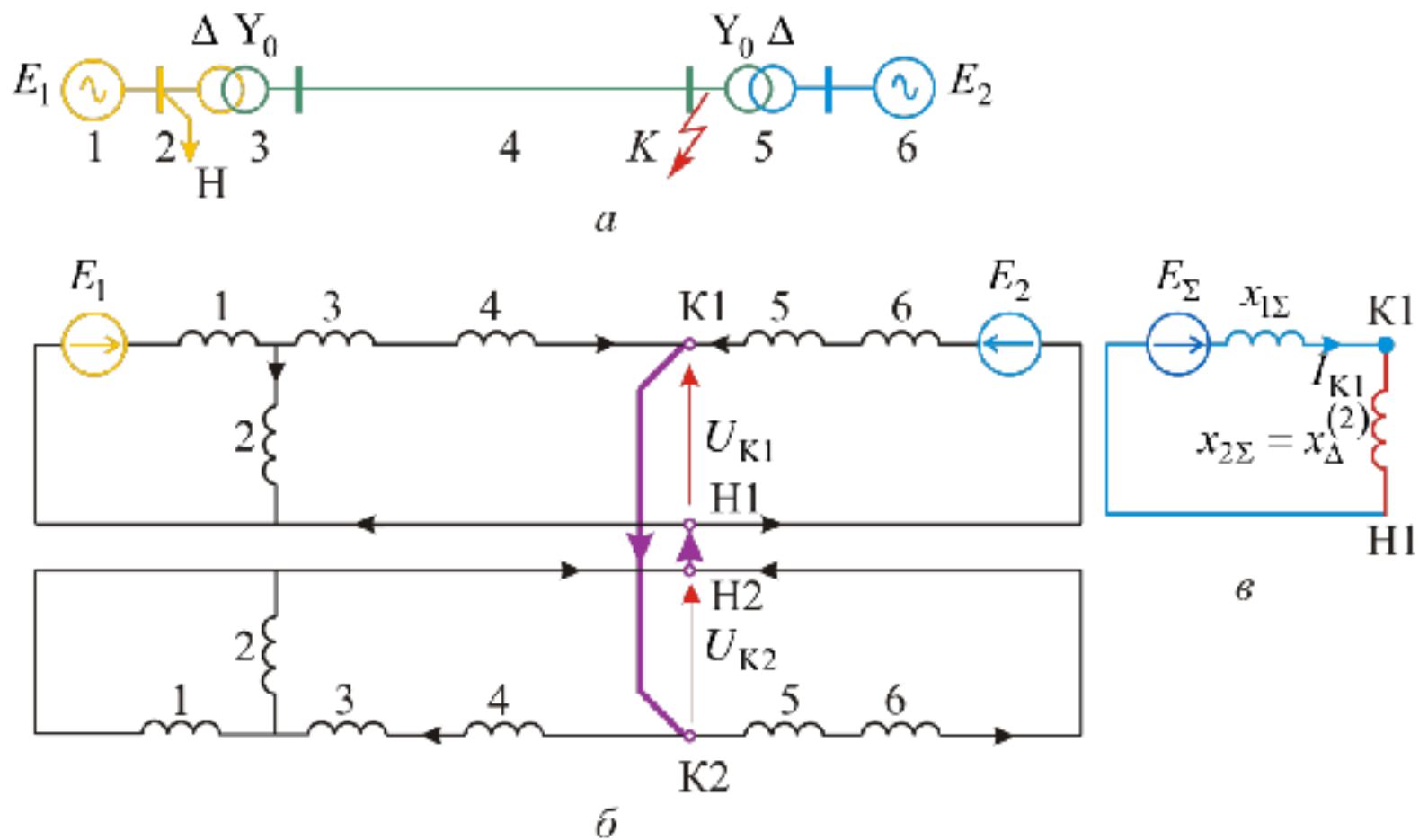


Рис.7.9. Принципиальная схема (а); комплексная схема (б), соответствующая $K^{(2)}$, и схема (в), эквивалентная току прямой последовательности

И для схемы обратной последовательности находим $X_{2\Sigma} = X_{\Delta}^{(2)}$.

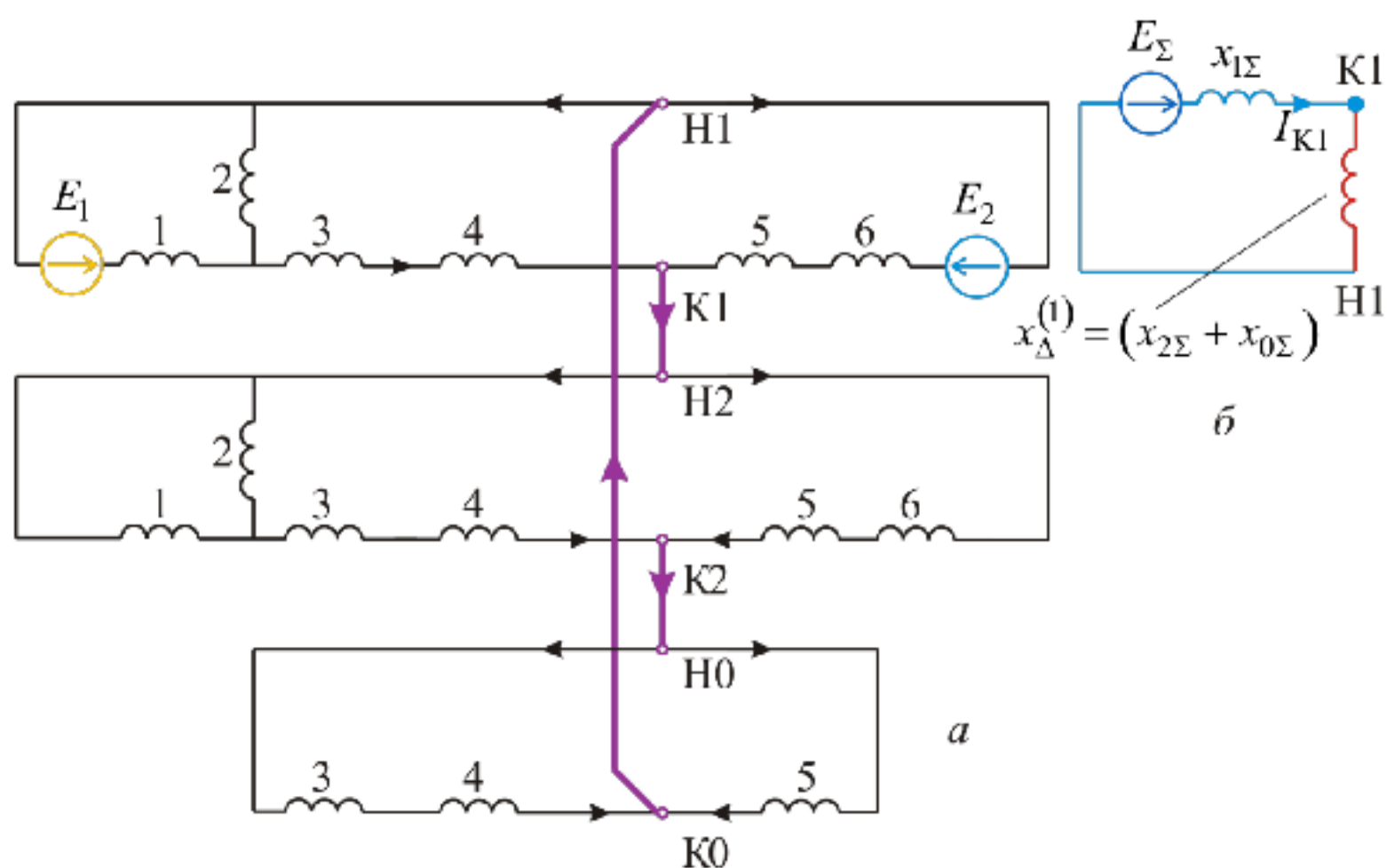


Рис. 7.10. Комплексная схема замещения (а) для $K^{(1)}$ и схема (б), эквивалентная току прямой последовательности

Комплексная схема замещения для однофазного замыкания на землю $K^{(1)}$ приведена на рис.7.10,а.

Соответствующая ей схема, эквивалентная току прямой последовательности, представлена на рис.7.10,б. Как и ранее (рис. 7.9, в), она представляет результирующую схему прямой последовательности, к концу которой подключен дополнительный реактанс $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$. На основе этой схемы можно рассчитать ток прямой последовательности $I_{K1}^{(1)}$.

7.8. Распределение и трансформация симметричных составляющих токов и напряжений в электрической системе

Полученные в предыдущих разделах расчетные выражения и векторные диаграммы для токов и напряжений дают полную картину соотношения параметров режима в точке КЗ. Но часто практический интерес представляют параметры в местах установки измерительных органов релейной защиты или коммутационной аппаратуры. Возникает задача оценки уровней токов и напряжений в точках, электрически удаленных от места КЗ.

Для расчета фазных токов в произвольной ветви схемы необходимо для этой ветви предварительно найти токи прямой, обратной и нулевой последовательностей. Далее, используя общие выражения (6.2) – (6.4), можно определить интересующие фазные токи. Как известно, каждую последовательность можно рассматривать независимо (автономно) от других последовательностей. Следовательно, для расчета симметричных составляющих тока в интересующей ветви необходимо поочередно развернуть схему каждой последовательности, руководствуясь известными правилами и законами распределения токов в линейных цепях. Распределение токов или коэффициентов токораспределения S между двумя параллельными ветвями с источниками E_1, E_2 зависит не от абсолютных значений E_1 и E_2 , а от их раз-

ности (см. формулы табл. 5.1). Это позволяет при нахождении токораспределения в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей условно принимать симметричные составляющие напряжений в месте КЗ равными нулю

($U_{K1} = 0, U_{K2} = 0, U_{K0} = 0$). Естественно, это недопустимо при расчетах остаточных напряжений в узлах схемы.

При использовании коэффициентов токораспределения токи прямой, обратной и нулевой последовательностей для любого участка «М» схемы можно представить как функции токов тех же последовательностей в месте КЗ, т. е.

$$I_{M1} = c_{M1} I_{K1}, \quad I_{M2} = c_{M2} I_{K2}, \quad I_{M0} = c_{M0} I_{K0}, \quad (7.37)$$

где c_{M1}, c_{M2}, c_{M0} – коэффициенты токораспределения ветви М в схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Коэффициенты c_{M1} схемы прямой последовательности зависят от вида несимметричного КЗ и являются функцией тока I_{K1} . В формулах табл. 5.1 значение I_{Σ} необходимо заменить током I_{K1} . Поскольку схемы обратной и нулевой последовательностей являются пассивными, то коэффициенты c_{M2}, c_{M0} не зависят от вида КЗ, т. е. от I_{K2} и I_{K0} .

Для нахождения фазных напряжений произвольного узла «М» схемы требуется предварительно определить симметричные составляющие напряжений этого узла. Последние находят как напряжение рассматриваемой последовательности в месте КЗ плюс сумму падений напряжения на участках, соединяющих рассматриваемый узел с местом КЗ той же последовательности, т. е.

$$\left. \begin{aligned} U_{M1} &= U_{K1} + \sum I_{i1} jx_{i1}; \\ U_{M2} &= U_{K2} + \sum I_{i2} jx_{i2}; \\ U_{M0} &= U_{K0} + \sum I_{i0} jx_{i0}. \end{aligned} \right\} \quad (7.38)$$

Чтобы в наглядной форме показать распределение остаточных напряжений отдельных последовательностей при различных видах КЗ, на **рис. 7.11, б, в, г** построены эпюры напряжений отдельных последовательностей вдоль элементов рассматриваемой схемы (**рис. 7.11, а**).

По мере удаления от точки короткого замыкания напряжения обратной (U_2) и нулевой (U_0) последовательностей по абсолютной величине уменьшаются. Остаточное напряжение $U_2 = 0$ в точке нулевого потенциала генератора; напряжение U_0 становится равным нулю на стороне обмотки трансформатора, соединенной в «треугольник». **Напряжение прямой последовательности (U_1) по мере удаления от точки короткого замыкания увеличивается**, принимая значение E'' за реактансом источника питания.

При переходе через трансформатор симметричные составляющие токов и напряжений изменяются не только по величине, но также и по фазе, в зависимости от группы соединения его обмоток. Для учета этого фактора пользуются **комплекс-**

ными коэффициентами трансформации прямой и обратной последовательностей соответственно для напряжения и тока:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{U_1} &= k e^{j30^\circ N}, & \mathbf{k}_{I_1} &= \mathbf{k}_{U_1} = k e^{-j30^\circ N}; \\ \mathbf{k}_{U_2} &= \mathbf{k}_{U_1} = k e^{-j30^\circ N}, & \mathbf{k}_{I_2} &= k e^{j30^\circ N}, \end{aligned} \quad (739)$$

где $k = \frac{U_Y}{U_\Delta}$ – модуль коэффициента трансформации;

N – номер группы соединения обмоток трансформатора в соответствии с известным правилом часового циферблата.

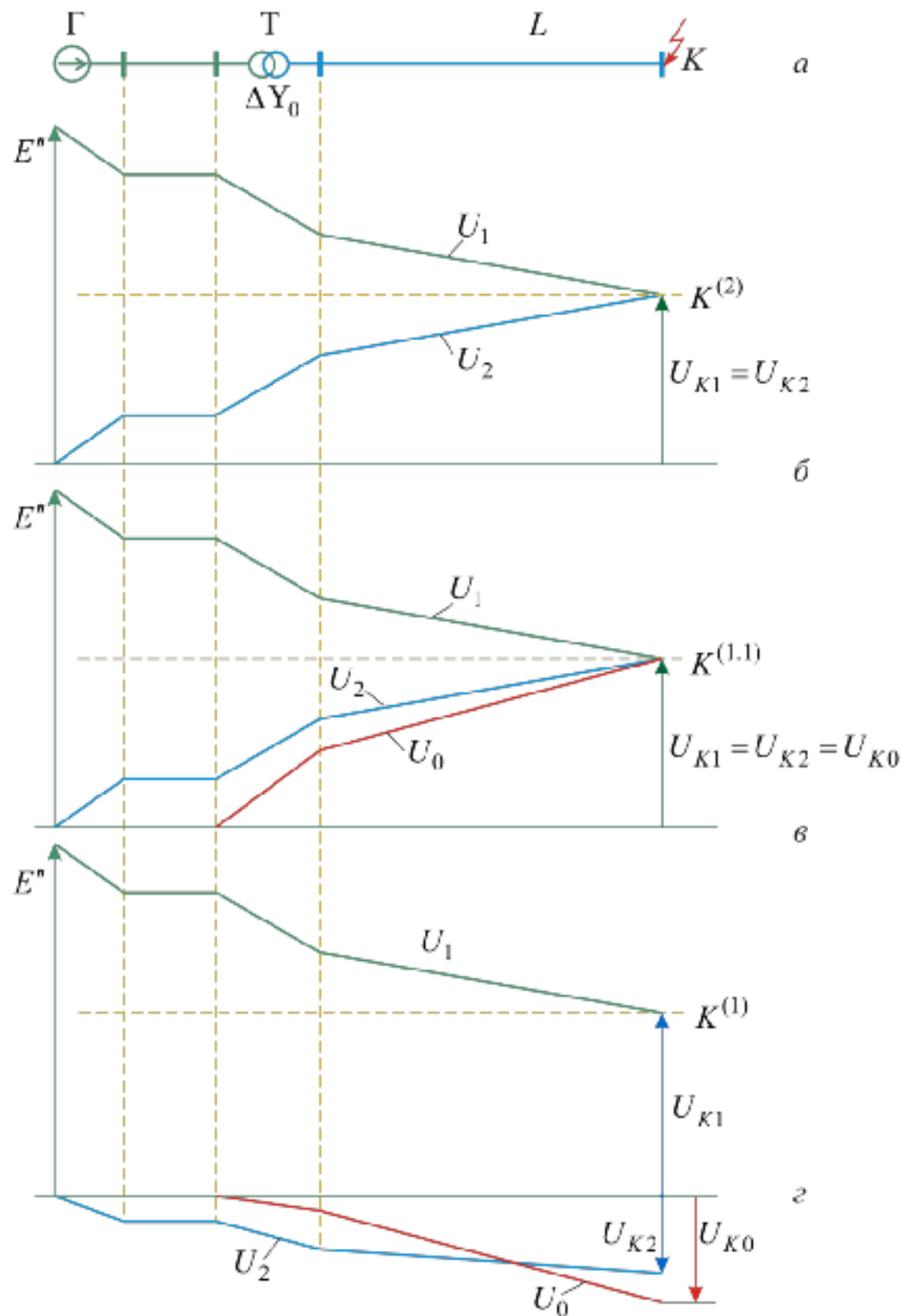


Рис.7.11. Принципиальная схема (а) и эпюры напряжений отдельных последовательностей при двухфазном (б), двухфазном на землю (в) и однофазном (г) коротких замыканиях

Коэффициенты трансформации по току k_{I_1} , k_{I_2} приняты сопряженными к соответствующим коэффициентам трансформации по напряжению из условия инвариантности мощности. При переходе через трансформатор в обратном направлении, т. е. (Δ / Y) угловые смещения симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

Для наиболее распространенной группы соединения обмоток трансформатора $Y_0 / \Delta - 11$ считаем известные симметричные составляющие напряжений U_{A1} , U_{A2} и токов I_{A1} , I_{A2} со стороны обмотки, соединенной в Y_0 . При этом величины U_{A1} и U_{A2} включают падение напряжения в трансформаторе. Тогда выражения для токов и напряжений на стороне трансформатора, соединенной в «треугольник», будут определяться по выражениям

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} = \\ &= k(I_{A1}e^{-j330^\circ} + I_{A2}e^{j330^\circ}) = k(I_{A1}e^{j30^\circ} + I_{A2}e^{-j30^\circ}); \\ U_a &= U_{a1} + U_{a2} = \\ &= \frac{1}{k}(U_{A1}e^{-j330^\circ} + U_{A2}e^{j330^\circ}) = \frac{1}{k}(U_{A1}e^{j30^\circ} + U_{A2}e^{-j30^\circ}), \end{aligned} \right\} \quad (7.40)$$

т. е. при переходе со стороны «звезды» на сторону треугольника трансформатора для группы $N = 11$ векторы прямой последовательности поворачиваются на 30° в положительном направлении, а векторы обратной последовательности – на 30° в противоположном направлении (рис. 7.12). **Нулевая последовательность на вторичной стороне трансформатора (Δ) отсутствует.**

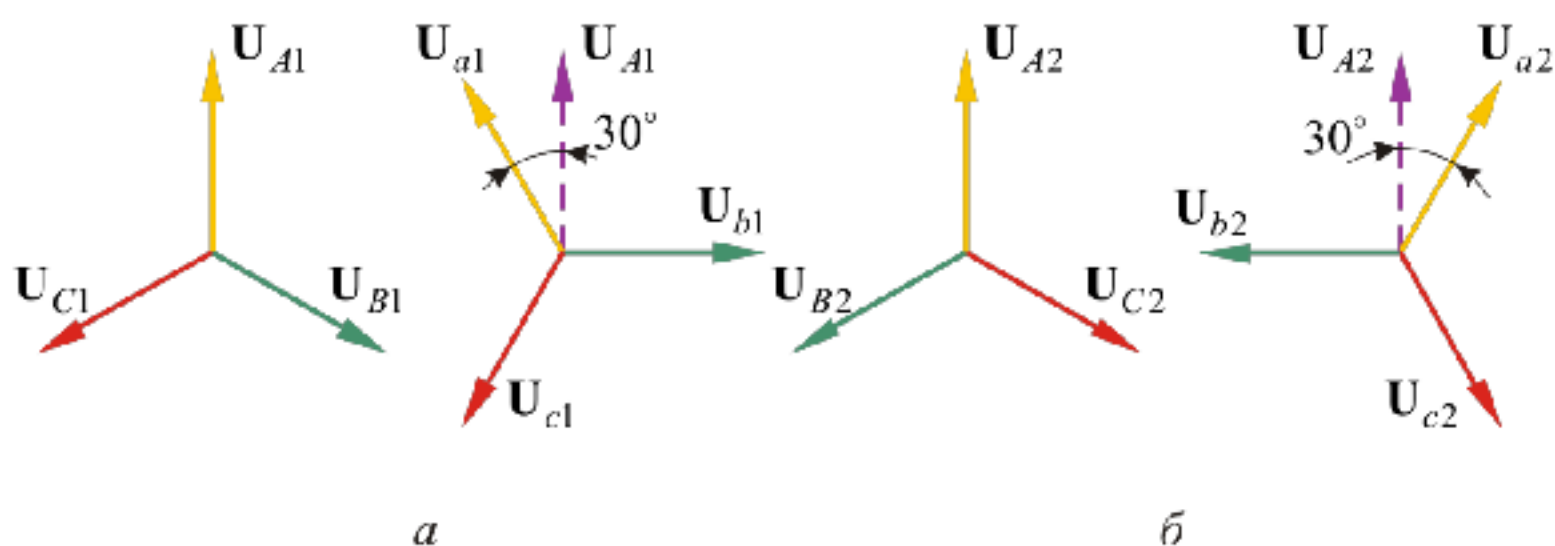


Рис. 7.12. Фазовый сдвиг напряжений прямой (а) и обратной (б) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением $Y / \Delta - 11$

Наиболее простые соотношения получаются для трансформатора с соединением обмоток по группе 12, т. к. в этом случае угловые смещения токов и напряжений вообще отсутствуют. Поэтому для трансформатора с четной группой

соединения обмоток (Y/Y) или (Δ/Δ), если не требуется знать действительной ориентации токов и напряжений одной его стороны по отношению к этим же величинам на другой его стороне, обычно принимают соединение обмоток по группе 12. При этом для соединения (Y_0/Y_0) должна быть учтена нулевая последовательность токов и напряжений, которая фазовых сдвигов не претерпевает.

При нечётной группе соединения обмоток трансформатора (Y_0/Δ), (Δ/Y) для простоты можно считать его соединение по группе 3 (или 9), поскольку при этом векторы прямой и обратной последовательностей поворачиваются на 90° в противоположные направления. Очевидно, векторы прямой последовательности можно оставить без смещения, а векторы обратной последовательности сдвинуть на 180° .

Следует особо подчеркнуть, что если токи и напряжения выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги в соответствии с группой соединения обмоток трансформатора.

Отметим, что учёт фазового сдвига токов и напряжений необходим при расчётах несимметричных коротких замыканий для целей выбора параметров релейной защиты трансформаторов.

В разд. 7.2 ÷ 7.4 были приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте несимметричных коротких замыканий. По мере удаления от точки короткого замыкания указанные диаграммы претерпевают изменение.

На примере **рис.7.13** можно проследить «**деформацию**» векторных диаграмм напряжений и токов, построенных для характерных узлов схемы, при двухфазном коротком замыкании на землю в конце воздушной линии электропередачи. Трансформатор со схемой обмоток Y_0/Δ имеет 11 группу. Для сопоставимости векторов принято, что токи и напряжения приведены к одной ступени напряжения.

Наибольшее искажение векторная диаграмма напряжений имеет в месте КЗ. Для узлов схемы, расположенных ближе к генератору, это искажение становится все меньше. Полностью симметричной сохраняется система векторов ЭДС.

Векторные диаграммы токов в узлах «Т» и КЗ одинаковы, поскольку указанные узлы находятся в последовательной цепи. При переходе через трансформатор симметричные составляющие токов и напряжений претерпевают фазовый поворот в соответствии с выражениями (7.40).

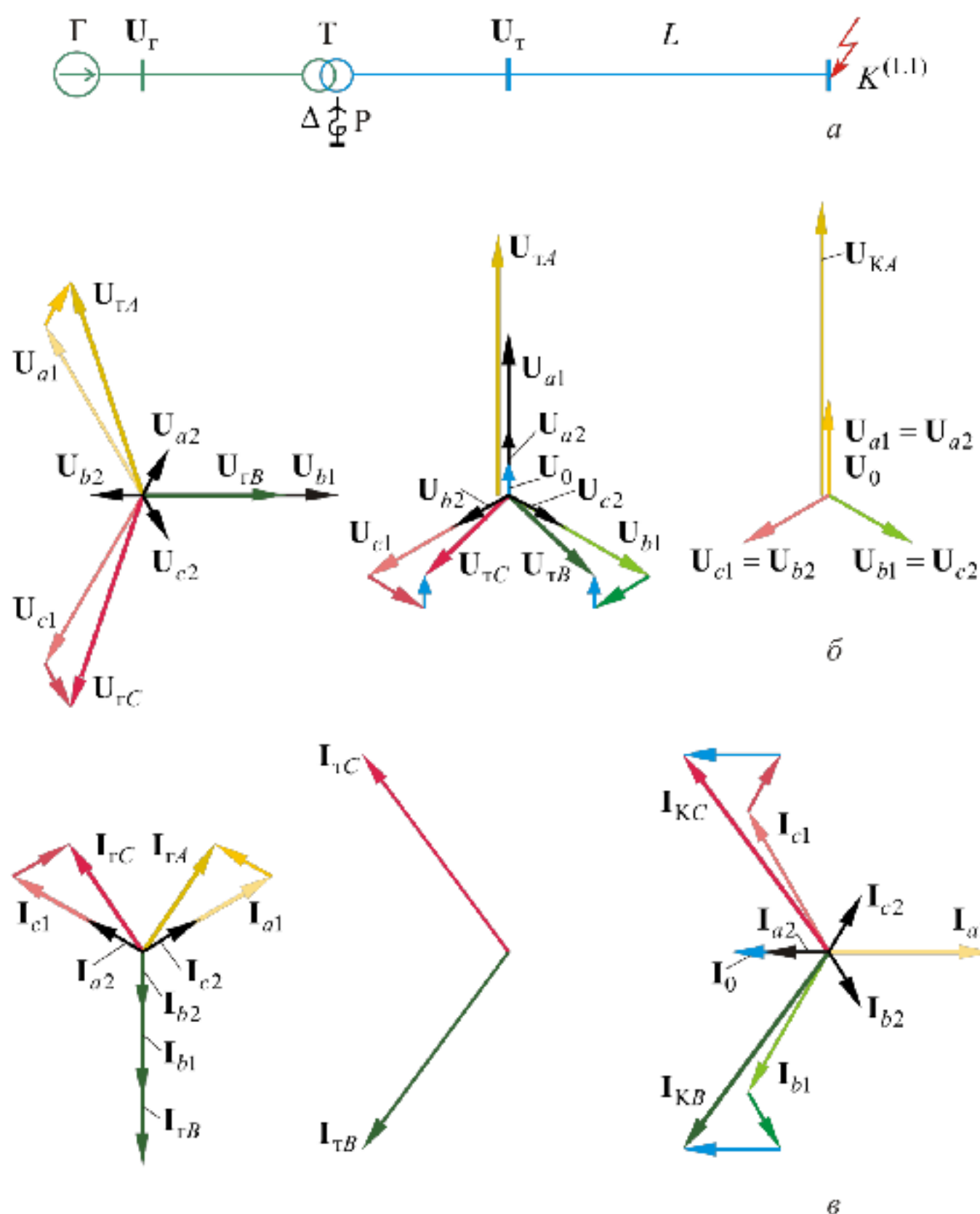


Рис. 7.13. Векторные диаграммы в характерных узлах схемы при $K^{(1,1)}$:
а – принципиальная схема; **б** – диаграммы напряжений;
в – диаграммы токов

7.9. Алгоритм расчёта несимметричных коротких замыканий

Как было показано ранее (разд. 7.2 – 7.4), интересующие параметры по месту несимметричных коротких замыканий пропорциональны току прямой последовательности. В свою очередь, ток прямой последовательности для любого вида поперечной несимметрии определяется на основе правила эквивалентности прямой последовательности согласно выражению (7.33), которое идентично расчету фиктивного трехфазного КЗ. Поэтому ниже приведена только последовательность основных этапов расчета поперечной несимметрии.

1. Составляется схема замещения прямой последовательности, в которую вводятся генерирующие источники питания и, при необходимости, двигатель-

ная нагрузка в соответствии с тем, как это осуществлялось при расчете трехфазного короткого замыкания (разд. 5.2).

Из схемы прямой последовательности находятся эквивалентная ЭДС ($E_{1\Sigma}$) и результирующее сопротивление ($x_{1\Sigma}$) относительно узла короткого замыкания.

2. Составляются схемы замещения обратной и нулевой последовательностей (разд. 6.3), из которых соответственно находятся $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$. В подавляющем большинстве практических расчетов в качестве схемы обратной последовательности можно принимать схему прямой последовательности, исключив из неё все ЭДС. При этом вполне приемлемо считать $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$, что соответствует допущению $X_2 = X''$ для синхронных машин.

Схема замещения нулевой последовательности существенно отличается от прямой, также как и реактивности для генераторов, воздушных и кабельных линий.

3. Определяется шунт короткого замыкания $x_{\Delta}^{(n)}$ и ток прямой последовательности по выражению (7.33).

4. Рассчитывается периодическая слагаемая тока КЗ поврежденных фаз по выражению (7.34).

Для расчета остаточных напряжений в месте КЗ и их симметричных составляющих необходимо воспользоваться соответствующими расчетными выражениями, полученными в разд. 7.2 – 7.4.

Учет фазовых сдвигов векторов тока и напряжения, обусловленных трансформаторами, изложен в разд. 7.8.