

Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательностей

Несимметричные режимы в электрических системах возникают вследствие несимметричных коротких замыканий или обрыва одной или двух фаз линии. В первом случае **несимметрия называется поперечной**, во втором – **продольной**. При несимметрии напряжения и токи в фазах различны, углы сдвига одноименных векторов отличаются от 120° . Если для анализа несимметрии основываться на подходе, используемом для симметричных режимов, то потребовалось бы составлять трехфазную схему замещения и сформировать полную систему уравнений с учетом взаимоиндукции. Такой подход существенно усложняет решение задачи, особенно для синхронных машин.

Сравнительно просто и вместе с тем достаточно строго анализ несимметричных режимов осуществляется **методом симметричных составляющих**. Как будет показано ниже, вычисление токов и напряжений при несимметричных КЗ на базе метода симметричных составляющих сводится к вычислению этих величин при некотором фиктивном трехфазном коротком замыкании. Это представляет возможность вновь воспользоваться однолинейной схемой замещения и вести расчет на одну фазу. В этом одно из основных достоинств метода симметричных составляющих.

6.1. Метод симметричных составляющих

Известно, что произвольную несимметричную систему трех векторов тока I_A, I_B, I_C или напряжения можно однозначно разложить на три симметричные системы (см. рис. 6.1):

- I_{a1}, I_{b1}, I_{c1} – систему токов **прямой последовательности**;
- I_{a2}, I_{b2}, I_{c2} – систему токов **обратной последовательности**;
- I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} – систему токов **нулевой последовательности**.

Симметричная система токов прямой последовательности представляет три одинаковых по величине вектора с относительным сдвигом по фазе в 120° , вращающихся против часовой стрелки. Чередование фаз A, B, C принимается по часовой стрелке. Аналогичные условия имеем для обратной последовательности с чередованием фаз A, C, B . Система нулевой последовательности существенно отличается от прямой и обратной тем, что отсутствует сдвиг фаз.

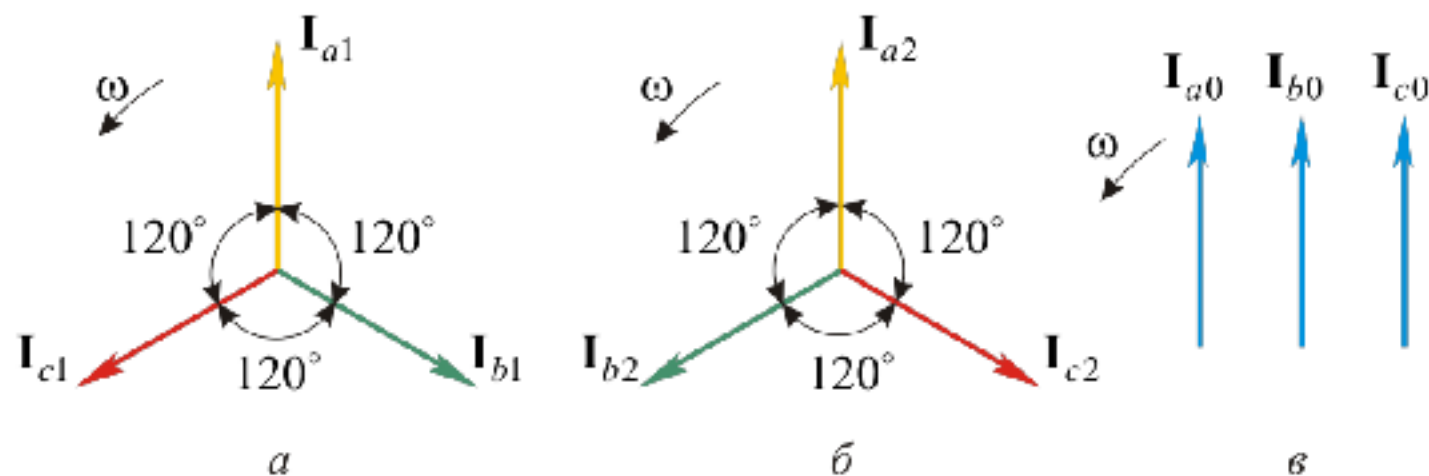


Рис. 6.1. Симметричная система токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Нулевая система токов, по существу, представляет три однофазных тока, для которых три провода трехфазной цепи представляют прямой провод, а обратным проводом служит земля или четвертый (нулевой), по которому возвращается $3I_0$.

Согласно условию разложения несимметричной системы токов I_A, I_B, I_C на три симметричные системы имеем:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}; \\ I_B &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}; \\ I_C &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}. \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Введем комплексное число a , называемое *оператором фазы*;

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

Этот вектор единичной длины имеет аргумент, равный 120° . Если некоторый вектор, например I_{a1} , умножить на a , то это означает повернуть I_{a1} на 120° против часовой стрелки, т.е.

$$aI_{a1} = I_{c1}.$$

Для оператора фазы справедливы отношения:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a^3 = 1, \quad a + a^2 + a^3 = 0.$$

Принимая фазу A за основную, можно с помощью оператора a выразить токи фаз B и C через ток фазы A . Это позволяет в формулах (6.1) использовать только систему векторов фазы A :

$$I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_0; \quad (6.2)$$

$$I_B = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_0; \quad (6.3)$$

$$I_C = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_0. \quad (6.4)$$

Здесь, в силу равенства $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$, индекс фазы у нулевой последовательности вообще упущен. Уравнения (6.2) – (6.4) позволяют определить несимметричную систему токов при известных симметричных составляющих. Обратная задача заключается в нахождении симметричных составляющих токов для заданной несимметричной системы. Эта зависимость получается решением уравнений (6.2) – (6.4) относительно симметричных составляющих токов:

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \quad (6.5)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C); \quad (6.6)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C). \quad (6.7)$$

Все приведенные соотношения в равной мере справедливы и для напряжений.

Системы прямой и обратной последовательностей являются симметричными и уравновешенными; система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной. Из соотношения (6.7) следует, что сумма трех несимметричных векторов тока равна утроенному току нулевой последовательности:

$$3I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (6.8)$$

который протекает (возвращается) в земле или по нулевому проводу.

Элементы электрической системы обладают конструктивной симметрией, что отражается в равенстве их фазных сопротивлений:

$$Z_A = Z_B = Z_C. \quad (6.9)$$

При выполнении этих условий справедлив принцип **независимости действия симметричных составляющих**. Для воздушных линий соблюдение условия (6.9) достигается транспозицией проводов.

Суть этого принципа состоит в том, что в трехфазной системе с симметричными элементами напряжение какой-либо последовательности вызывает протекание тока только одноименной последовательности. Точно также ток одной из последовательностей вызывает падение напряжения только своей последовательности, т. е.

$$\Delta U_1 = I_1 Z_1, \quad \Delta U_2 = I_2 Z_2, \quad \Delta U_0 = I_0 Z_0. \quad (6.10)$$

Можно сказать, что электрические контуры как бы обладают отдельными каналами избирательности прямой, обратной и нулевой последовательностей, по которым могут протекать токи лишь соответствующих последовательностей. **Выполнение принципа независимости действия симметричных составляющих практически очень важно, поскольку позволяет каждую последовательность рассматривать независимо (автономно) от других последовательностей.**

Из условия (6.10) следует, что один и тот же элемент в общем случае оказывает разные сопротивления при протекании по нему тока прямой, обратной или нулевой последовательности. Это характерно для трехфазной сети, в которой проявление взаимной индуктивности между фазами зависит от протекающей последовательности токов.

По своей природе синхронные машины генерируют симметричную систему векторов ЭДС только прямой последовательности, а ЭДС обратной и нулевой последовательностей равны нулю. При несимметричном КЗ по месту повреждения возникают несимметричные напряжения, которые можно представить как геометрическую сумму симметричных составляющих напряжений U_{K1} , U_{K2} , U_{K0} . В соответствии с этим для эквивалентных однолинейных схем прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 6. 2.) уравнения второго закона Кирхгофа можно записать в следующем виде:

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

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

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

где $U_{K1}, U_{K2}, U_{K0}, I_{K1}, I_{K2}, I_{K0}$

– симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ;

E_{Σ} – результирующая ЭДС схемы прямой последовательности относительно точки КЗ;

$x_{1\Sigma}, x_{2\Sigma}, x_{0\Sigma}$ – результирующие реактивности схем соответствующих последовательностей относительно точки короткого замыкания.

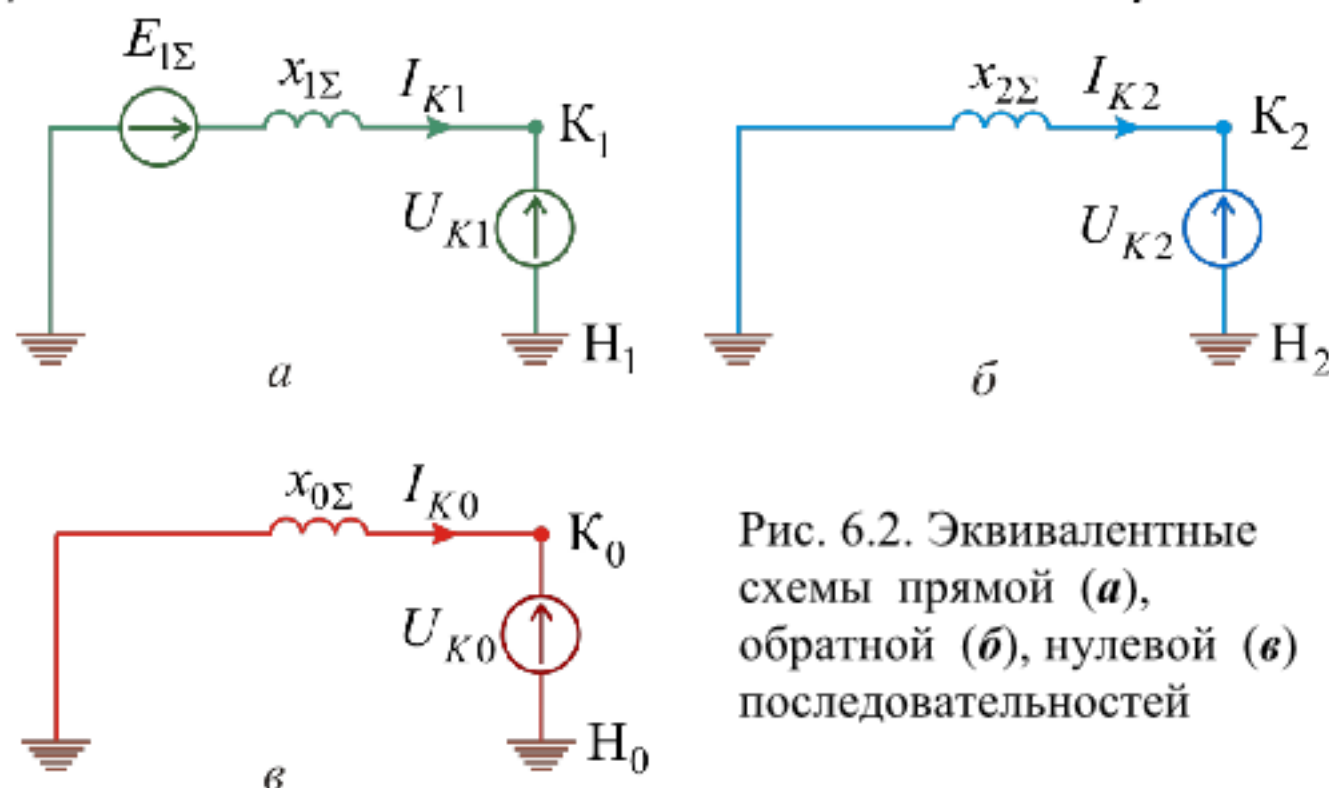


Рис. 6.2. Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б), нулевой (в) последовательностей

Из уравнений (6.12), (6.13) следует, что токи обратной и нулевой последовательностей определяются соответственно только напряжениями обратной и нулевой последовательностей в точке короткого замыкания.

Система уравнений (6.11) – (6.13) содержит шесть неизвестных: три симметричных составляющих напряжения и три симметричных составляющих тока. Недостающие для расчета этих величин уравнения (три) получают из граничных условий для конкретного вида нарушения симметрии.

6.2. Сопротивления обратной и нулевой последовательностей для элементов электрической системы

Каждый элемент электрической системы при расчетах несимметричных режимов характеризуется **сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей**. Все сопротивления элементов системы, которыми они представлялись в расчетах симметричного трехфазного КЗ, являлись сопротивлениями прямой последовательности.

При отсутствии взаимной индукции между фазами элемента его реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей одинаковы, т. к. они обусловлены только собственной индуктивностью фазы. Это условие справедливо только **для реактора**, т. е.

$$x_1 = x_2 = x_0, \quad r_1 = r_2 = r_0$$

При наличии магнитной связи между фазами реактивное сопротивление силового элемента определяется с учетом этого влияния, которое зависит от последова-

тельности протекающих токов. Для элемента, магнитно-связанные цепи которого неподвижны относительно друг друга (*трансформаторы, воздушные и кабельные линии*), **сопротивления прямой и обратной последовательностей равны**, т. к. от перемены чередования фаз влияние взаимной индукции не изменяется

$$(X_1 = X_2, r_1 = r_2).$$

Реактивное сопротивление нулевой последовательности элементов резко отличается от реактанса прямой последовательности в силу иного проявления взаимной индукции при протекании токов нулевой последовательности. Это отличие обусловлено тем, что токи нулевой последовательности совпадают по фазам.

6.2.1. Синхронные машины

Токи обратной последовательности создают магнитный поток, который перемещается в пространстве встречно вращению ротора, т. е. их взаимное перемещение происходит с двойной угловой скоростью (2ω). Следовательно, поток обратной последовательности при своем перемещении встречает различное магнитное сопротивление, которое колеблется в пределах сопротивлений в продольной и поперечной осях машины. Этим условиям соответствуют расчетные выражения соответственно для машин с демпферными обмотками и без них.

$$x_2 = \frac{2X_d''X_q''}{X_d'' + X_q''}, x_2 = \frac{2X_d'X_q}{X_d' + X_q} \quad (6.14)$$

Значения x_2 приводятся в каталогах и справочниках как паспортный параметр машины. При отсутствии этих данных в качестве приближенных значений можно принимать для машин с успокоительными обмотками

$$x_2 = 1.22X_d''$$

и для явнополюсных машин без успокоительных обмоток $x_2 = 1.45X_d'$.

В приближенных практических расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, полагая для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными успокоительными обмотками $x_2 \approx X_d''$.

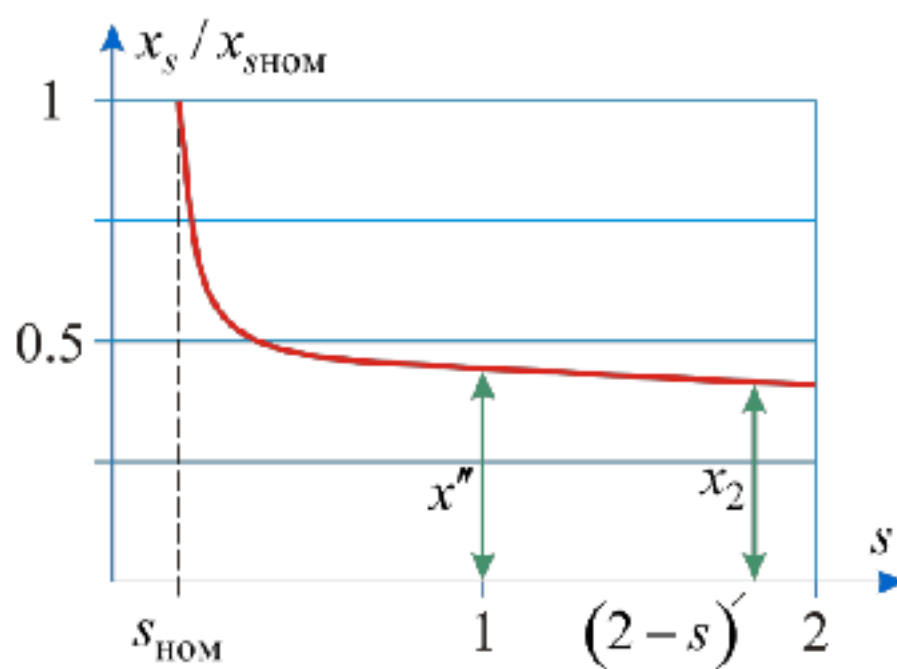
Токи нулевой последовательности в фазах статорной цепи создают одинаковые по величине магнитные потоки. В силу физического сдвига обмоток фаз на 120° магнитные потоки нулевой последовательности в пространстве также сдвинуты на 120° и их результирующее значение в расточке машины равно нулю и реакции ротора не вызывает. Реактивное сопротивление нулевой последовательности синхронных машин определяется только сопротивлением рассеяния (X_σ), причем по значению оно меньше, чем в прямой последовательности. Это уменьшение зависит от типа обмотки, из-за чего реактанс нулевой последовательности колеблется в широком диапазоне:

$$x_0 = (0,15 \div 0,6) X_d''.$$

6.2.2. Асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка

По отношению к магнитному потоку обратной последовательности ротор асинхронного двигателя имеет скольжение $s_{(2)} = 2 - s$. Зависимость относительной реактивности асинхронного двигателя от скольжения показана на рис. 6.3. С ростом скольжения реактивное сопротивление x_s вначале резко падает. В интервале скольжения от $s = 1$ до $s = 2 - s_{\text{ном}}$ изменение сопротивления x_s мало, поэтому можно считать, что

$$x_2 \approx x_{s=1} = x''$$



т. е. реактивность обратной последовательности x_2 равна его так называемой реактивности КЗ (сверхпереходной реактивности).

Сопротивление нулевой последовательности асинхронного двигателя практически равно реактивности рассеяния статорной обмотки. Оно зависит от типа и конструкции двигателя и должно определяться опытным путем или по данным завода-изготовителя.

Рис. 6.3 К определению x_2 асинхронного двигателя

Для обобщенной нагрузки, состоящей преимущественно из асинхронных двигателей, сопротивление обратной последовательности равно сопротивлению прямой последовательности, т. е. $x_2 = 0,35$. Она отнесена к полной рабочей мощности нагрузки ($S_{\text{наг}}$) и среднему номинальному напряжению ($U_{\text{ср}}$) той ступени, к которой она присоединена. Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки определяется параметрами сети и трансформаторов, входящих в ее состав, и может быть получено только на основе прямого эквивалентирования.

6.2.3. Трансформаторы и автотрансформаторы

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от двух факторов:

- 1) **конструктивного исполнения;**
- 2) **схемы соединения обмоток.**

По конструктивному исполнению трехфазные трансформаторы подразделяются на **трех-, четырех-, пятистержневые и группу из трех однофазных**. По типу соединения обмоток различают соединение **в треугольник (Δ)**, **звезду с изолированной нейтралью (Y)**, **звезду с заземленной нейтралью (Y_0)**. У трансформаторов небольшой мощности вторичные обмотки напряжением 0,4 кВ иногда соединяют в **зигзаг (Z)**. Особенности таких трансформаторов изложены в работе [8].

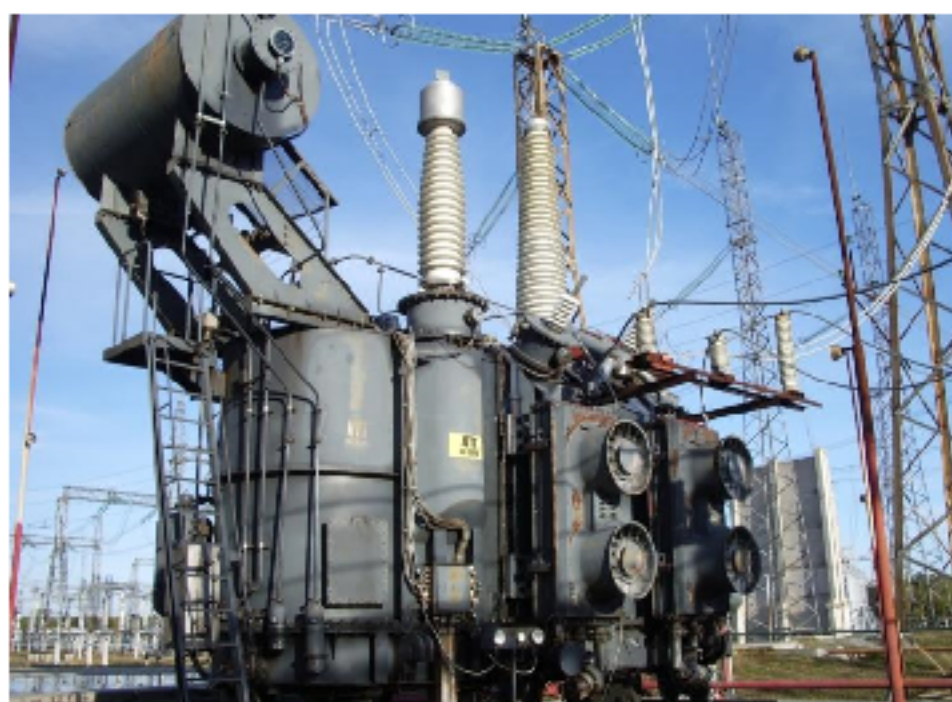


Фото 17.

Автотрансформатор 500/121/11 кВ



Фото 18.

Двухобмоточный трансформатор 500/121 кВ



Фото 19. Трансформатор ТМГ 1600 кВА 10/04 кВ



Фото 20. Комплектная трансформаторная п/ст 6/0,4 кВ



Фото 21. Трансформатор 6/0,4 кВ в ячейке комплектного рас-
предустройства

Прежде всего выясним, в какой мере влияет каждый из названных факторов на величину реактанса нулевой последовательности.

1. Конструкция трансформаторов влияет на величину сопротивления ветви намагничивания $X_{\mu 0}$ схемы замещения нулевой последовательности (рис. 6.4, а), которое определяется током намагничивания $I_{\mu 0}$. Результирующий поток намагничивания нулевой последовательности $\Phi_{\mu 0}$, в отличие от $\Phi_{\mu 1}$, требует наличия замкнутого контура. В группе из трех однофазных трансформаторов, четырех - и пятистержневых трансформаторов это условие обеспечивается за счет свободного от обмоток стержня магнитопровода, поэтому для указанных конструкций ток намагничивания нулевой последовательности $I_{\mu 0}$ столь же мал, что и ток намагничивания $I_{\mu 1}$ ($I_{\mu 0} = I_{\mu 1} = 0,5 \div 2\%$). Следовательно, реактивность ветви намагничивания составит $X_{\mu 0*} \approx 1/0,01 = 100$. Величина $X_{\mu 0}$ на 3, 4 порядка превосходит сопротивления рассеяния обмоток трансформатора ($X_{I*} = X_{II*} = 0.06$). Это позволяет считать $X_{\mu 0} = \infty$.

Иные условия имеют место в трехфазных трехстержневых трансформаторах, где магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через воздушную среду и кожух трансформатора. Это приводит к увеличению $I_{\mu 0}$ и соответственно к снижению $X_{\mu 0}$ ($X_{\mu 0*} \approx 0,3 \div 1,0$). Но учитывая, что сопротивление рассеяния обмоток значительно меньше $X_{\mu 0}$, для мощных трансформаторов напряжением 10 кВ и выше практически считают $X_{\mu 0} = \infty$. И лишь для маломощных

трансформаторов такой конструкции напряжением 6 /0.4, 10/0.4 кВ значение $X_{\mu 0}$ учитывают как конечную величину (табл. П. 3).

2. Рассмотрим влияние схемы соединения обмоток трансформатора на реактивность X_0 . При коротком замыкании со стороны обмотки, соединенной в «треугольник» (Δ) или «звезду» без заземленной нейтрали (Y), сопротивление нулевой последовательности трансформатора бесконечно велико ($X_0 = \infty$). При этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе, независимо от схемы соединения его других обмоток. **Конечная величина X_0 возможна только в том случае, когда КЗ происходит со стороны обмотки трансформатора, соединенной в «звезду» с заземленной нейтралью (Y_0).**

Обратимся к количественной оценке реактанса нулевой последовательности трансформаторов и их схем замещения. Считаем, что несимметричное КЗ происходит со стороны обмотки, соединённой по схеме (Y_0).

На **рис. 6.4 – 6.6** слева изображены принципиальные трехфазные схемы соединения обмоток трансформаторов (автотрансформаторов), справа – однолинейные схемы замещения нулевой последовательности. В этих схемах каждая обмотка представлена своим сопротивлением рассеяния (x_I, x_{II}, x_{III}) и реактивностью ветви намагничивания нулевой последовательности ($x_{\mu 0}$). При определении путей протекания тока I_0 следует иметь в виду, что все фазы находятся в одинаковых условиях (симметричный режим) и со стороны КЗ (Y_0) к каждой из них приложено U_0 .

1. В двухобмоточном трансформаторе со схемой обмоток Y_0 / Δ (рис. 6.4, а) напряжение нулевой последовательности вторичных обмоток будет вызывать токи, которые подобно токам третьей гармоники протекают только в этих обмотках, не выходя за их пределы. Завершение пути тока нулевой последовательности на ветви x_{II} на схеме замещения отражается ее закорачиванием на обратный провод (землю). Поскольку относительно большое сопротивление $x_{\mu 0}$ шунтируется малым сопротивлением x_{II} , независимо от конструкции трансформатора с соединением обмоток Y_0 / Δ сопротивление x_0 принимается равным сопротивлению прямой последовательности x_I , т. е.

$$(Y_0 / \Delta) \quad x_0 \approx (x_I + x_{II}) = x_I. \quad (6.15)$$

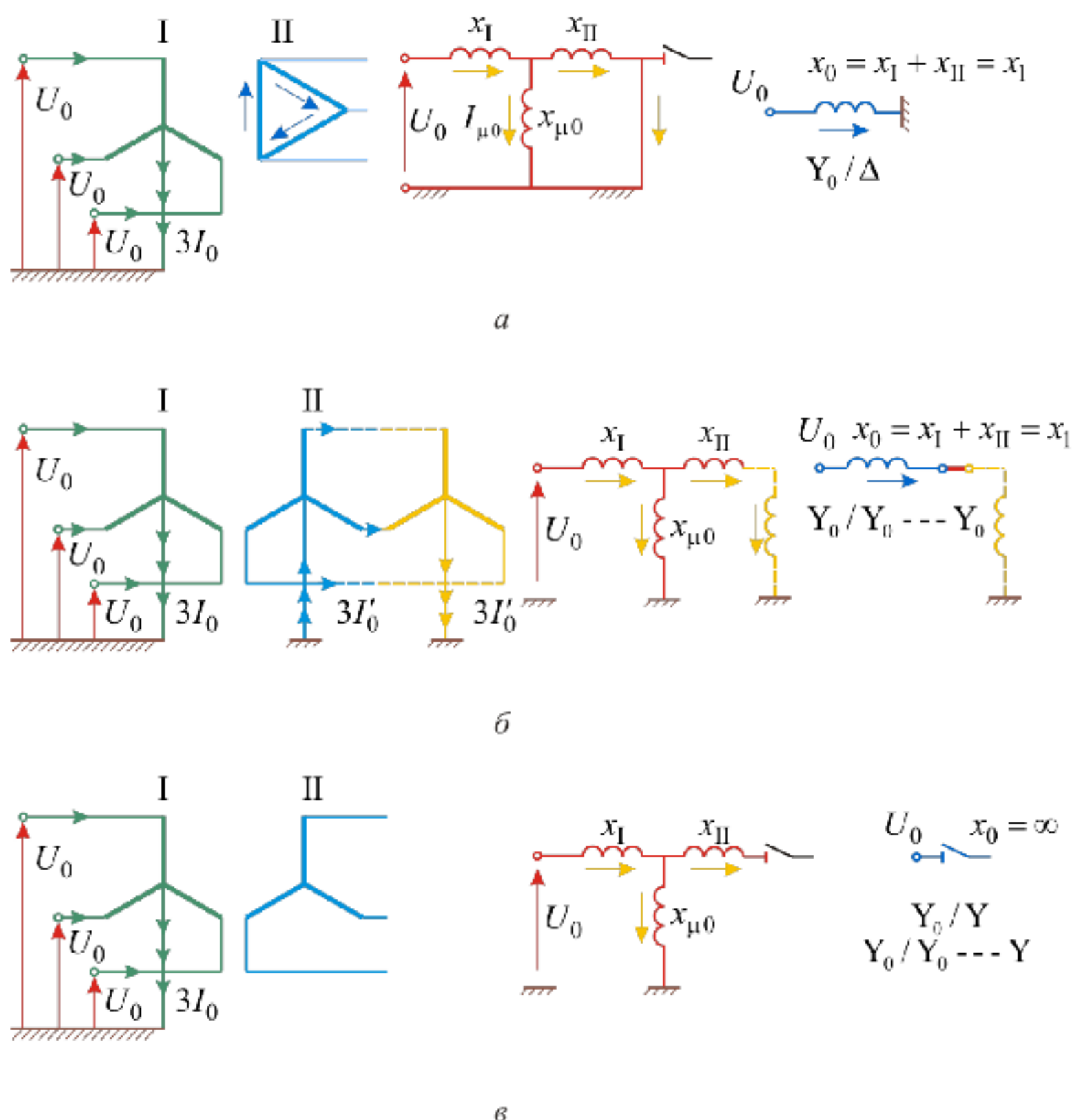


Рис. 6.4. Двухобмоточные трансформаторы. Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток

2. При соединении обмоток по схеме $Y_0/Y_0-\Delta$ (рис. 6.4, б) предполагается, что на стороне обмотки II путь циркуляции токов обеспечен наличием по крайней мере еще одной заземленной нейтрали (штриховая линия). Принимая для любой конструкции $x_{\mu 0} = \infty$, имеем:

$$(Y_0/Y_0-\Delta) \quad x_0 \approx (x_I + x_{II}) = x_I.$$

3. При соединении обмоток по схеме Y_0/Y_0-Y без дополнительно заземленной нейтрали со стороны обмотки II схема этого трансформатора будет такой же, как и при соединении обмоток по схеме Y_0/Y (рис. 6.4, в), что соответствует режиму холостого хода трансформатора. При этих условиях

$$(Y_0/Y_0 \text{ -- } Y \text{ или } Y_0/Y) \quad x_0 = x_I + x_{\mu 0} = \infty.$$

Схемы замещения трехобмоточных трансформаторов (**рис. 6.5**) строятся по тому же принципу, что и для двухобмоточных. В трехобмоточных трансформаторах одна из обмоток, как правило, соединена в «треугольник». Сопротивление рассеяния этой обмотки с малой реактивностью шунтирует ветвь $x_{\mu 0}$, что позволяет независимо от конструкции принимать $x_{\mu 0} = \infty$. По этой причине в схемах замещения эта ветвь не приведена.

4. При соединении обмоток трехобмоточного трансформатора по схеме $Y_0/\Delta/Y_0 - Y_0$ (рис. 6.5, а) на стороне обмотки III предполагается наличие еще одной заземленной нейтрали, что обеспечивает контур для токов нулевой последовательности. Таким образом, все три обмотки обтекаются током и **трансформатор представляется полной схемой замещения.**

5. При соединении обмоток по схеме $Y_0/\Delta/Y$ (рис. 6.5, б) ток в контуре III отсутствует, а схема замещения представляется только обмотками I и II:

$$(Y_0/\Delta/Y) \quad x_0 = x_I + x_{II} = x_{I-II}.$$

6. Для схемы $Y_0/\Delta/\Delta$ (рис. 6.5, в) вполне очевидно, что

$$Y_0/\Delta/\Delta) \quad x_0 = x_I + x_{II} // x_{III}.$$

7. Схема замещения автотрансформатора (рис. 6.6, а) повторяет схему замещения трехобмоточного трансформатора (рис. 6.5, а) с аналогичным соединением обмоток. Нужно иметь в виду, что непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в его нейтрали. При указанных на рис. 6.6 направлениях токов искомый ток в нейтрали равен утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной цепей, т. е. $I_N = 3(I_{0I} - I_{0II})$, причем каждый из них должен быть приведен к своей ступени напряжения, а не к какой-либо одной, для которой составлена схема замещения.

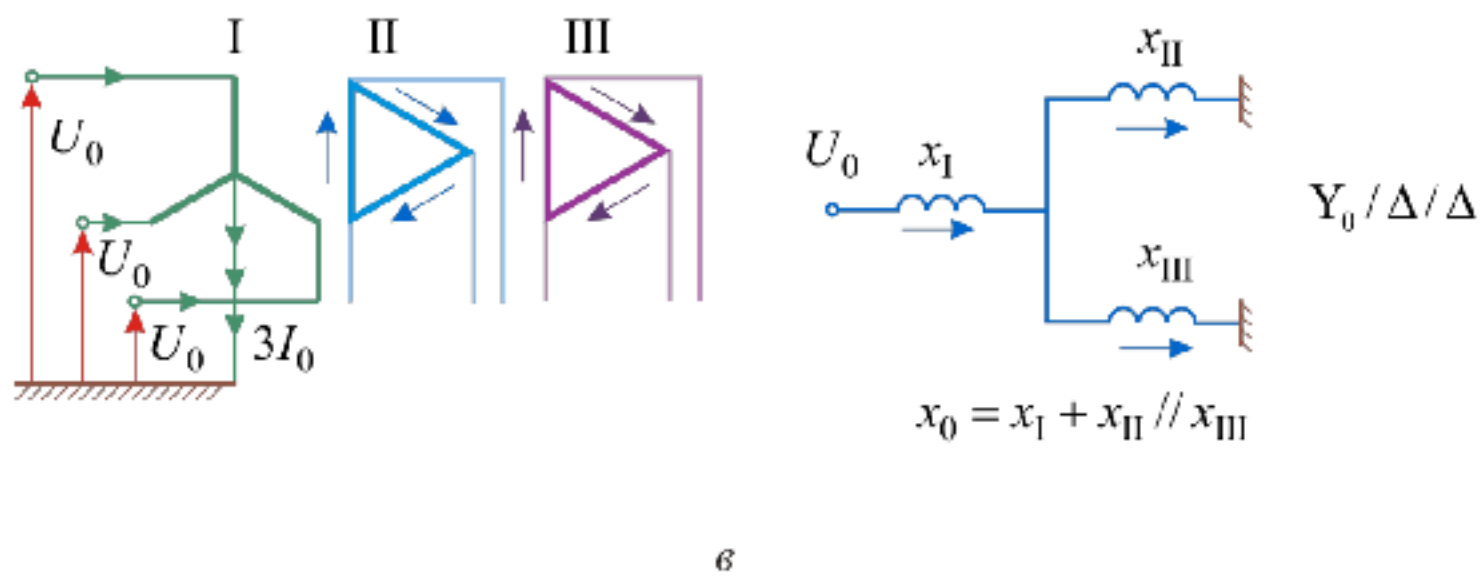
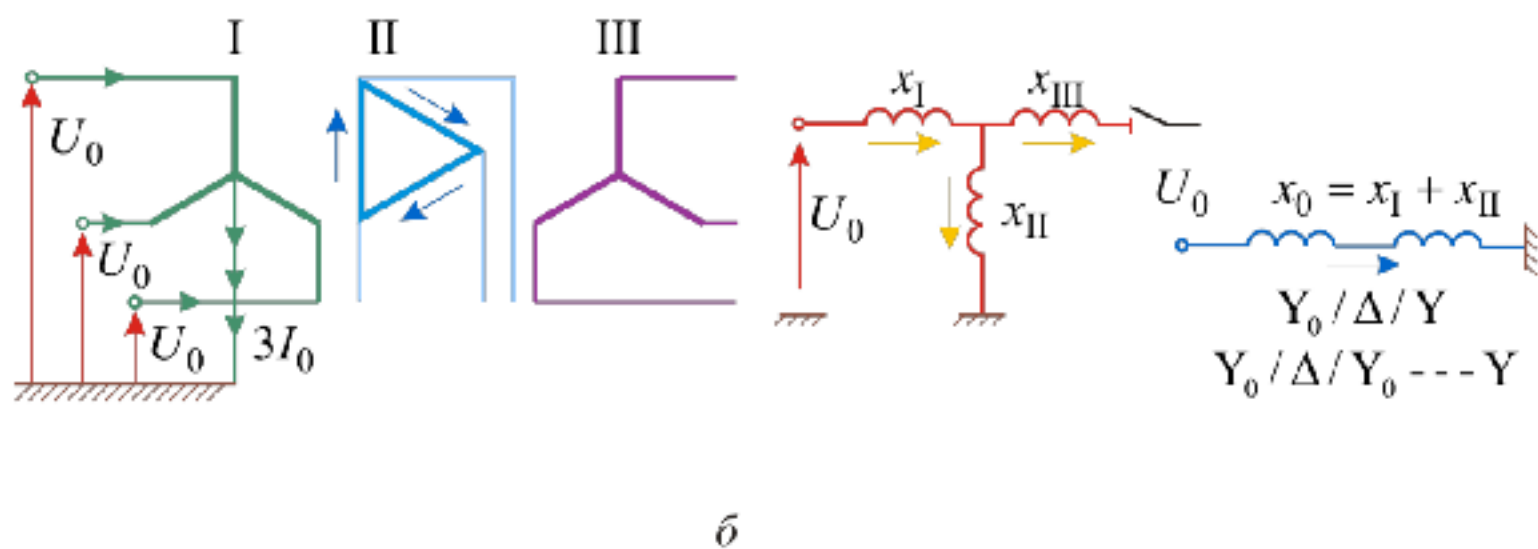
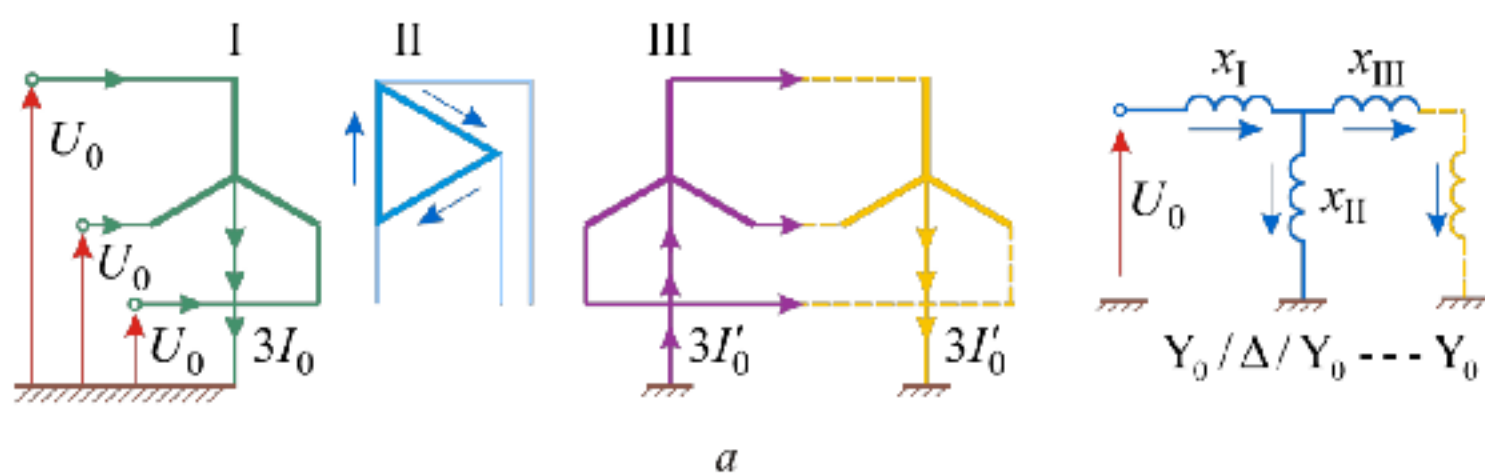
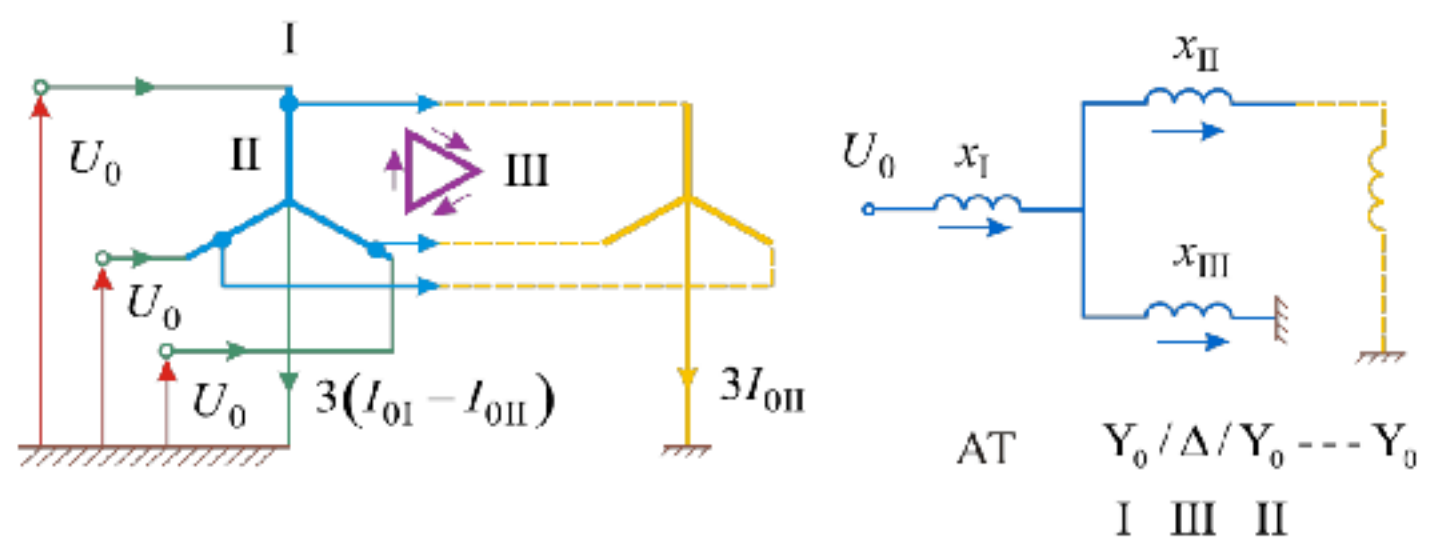
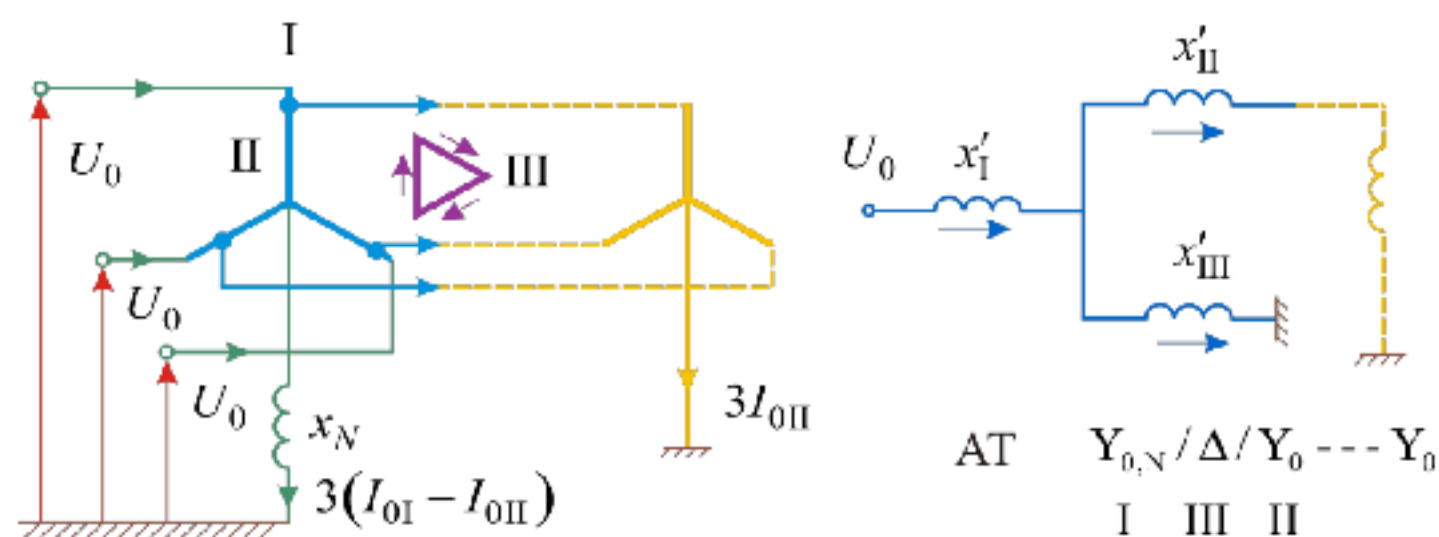


Рис. 6.5. Трехобмоточные трансформаторы. Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток

Особый случай представляет схема замещения автотрансформатора с заземленной нейтралью через реактивность X_N (рис. 6.6, б).



a



б

Рис. 6.6. Автотрансформаторы. Схемы замещения нулевой последовательности для разных вариантов соединения обмоток
Реактивности схемы замещения определяются по выражениям [1]:

$$\left. \begin{aligned} x'_I &= x_I + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right); \\ x'_{II} &= x_{II} + 3x_N \frac{(U_I - U_{II})U_I}{U_{II}^2}; \\ x'_{III} &= x_{III} + 3x_N \frac{U_I}{U_{II}}, \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

где реактивность x_N в относительных или именованных единицах приведена к базисному напряжению ступени **I**. У автотрансформатора без третьей обмотки раз-
земление нейтрали приводит к тому, что в схеме нулевой последовательности он
оказывается в режиме холостого хода. Его реактивность $x_{\mu 0} = \infty$.

6.2.4. Воздушные и кабельные линии

Реактивное сопротивление нулевой последовательности X_0 воздушных линий (ВЛ) существенно отличается от сопротивления прямой последовательности за счет иного проявления взаимоиндукции. Токи нулевой последовательности, протекая по ВЛ, замыкаются на землю через заземленные нейтралы трансформаторов. В качестве обратного провода служит земля и грозозащитные тросы (рис. 6.7, б).



Фото 22.

Анкерная опора двухцепной ЛЭП 220 кВ

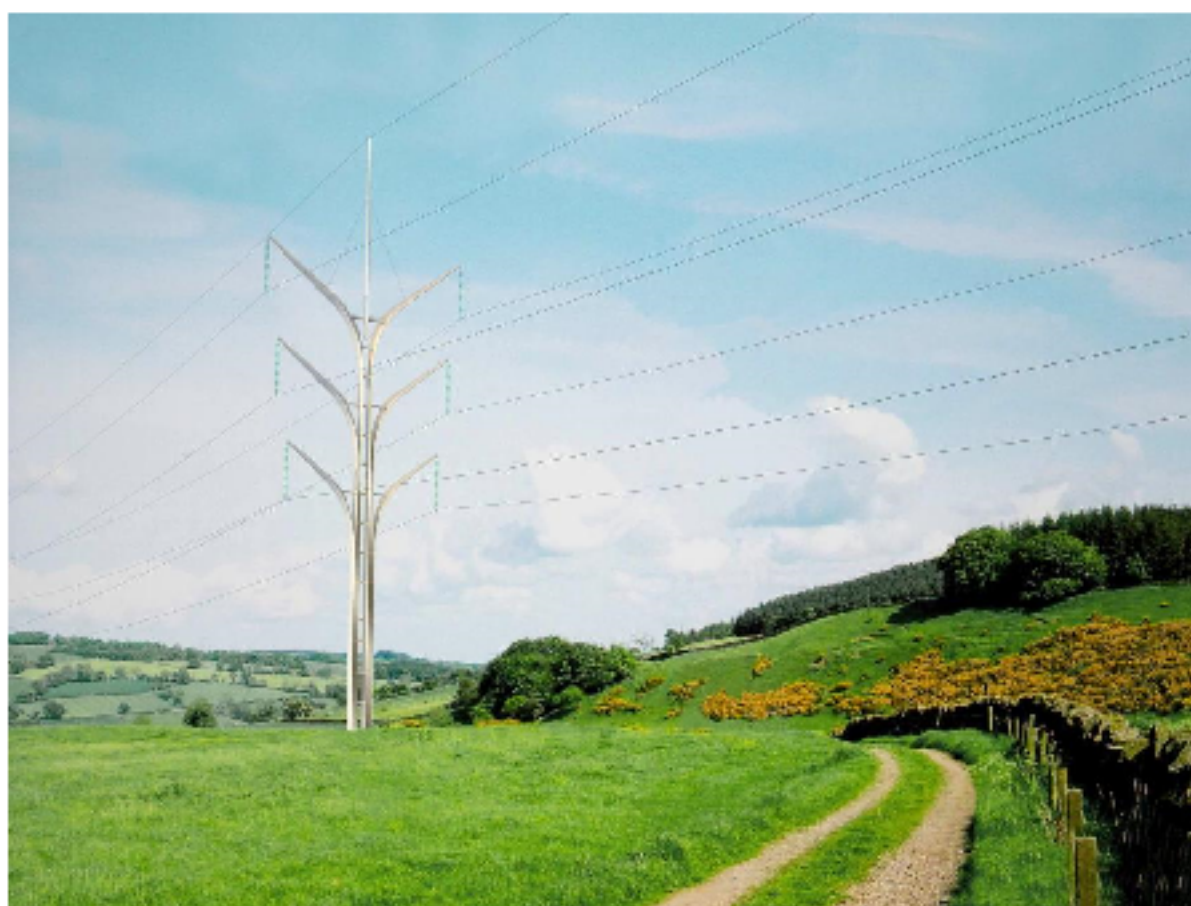


Фото 23.

Опора будущего (фантазия)



Фото 24.

ОРУ Саяно-Шушенской ГЭС

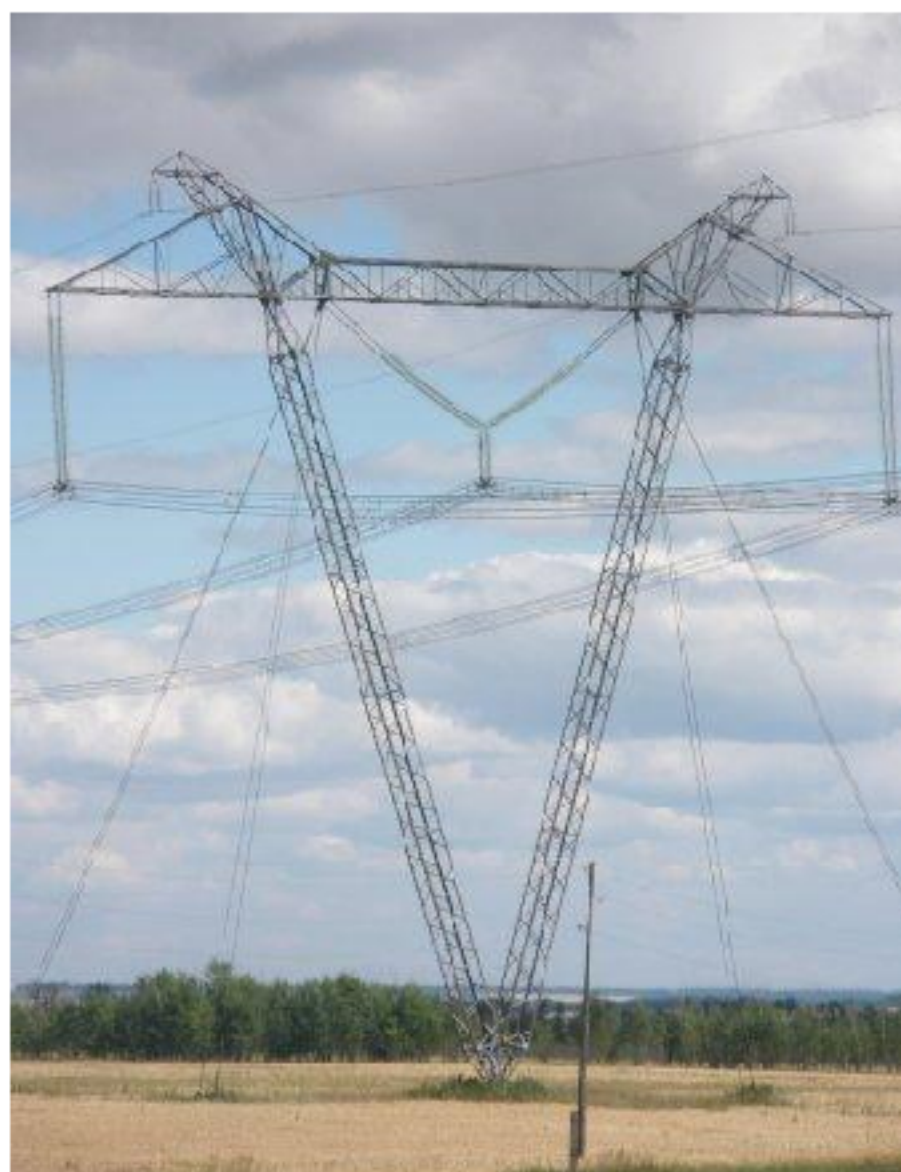


Фото 25.

ЛЭП 1150 кВ с двумя грозозащитными тросами

Основная трудность вычисления реактивности X_0 связана с учетом распределенного характера протекания тока в земле. Ближайший к поверхности слой бывает менее проводящим, чем более глубокий водоносный слой. В этих условиях

большая часть тока нулевой последовательности возвращается по глубинным слоям; по мере приближения к поверхности плотность тока увеличивается. Действительную картину распределения тока в земле заменяют эквивалентной, в которой считают, что весь ток возвращается по единичной трубке, расположенной от поверхности земли на глубине D_3 . Для моделирования этих условий трехфазная линия представляется тремя двухпроводными линиями «провод-земля».

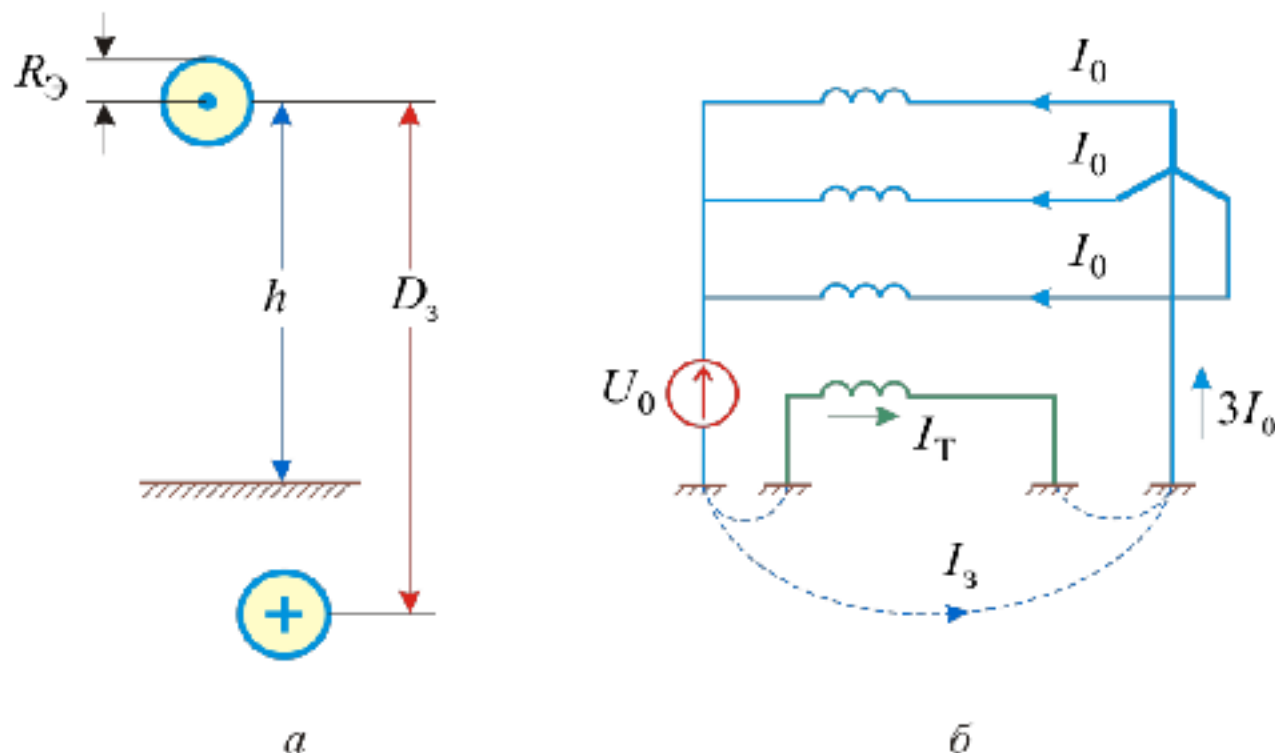


Рис. 6.7. К определению x_0 ВЛ: **а** – однопроводная линия «провод-земля»; **б** – пути протекания тока I_0 одноцепной ВЛ с тросом

Учитывая, что D_3 существенно больше высоты подвеса проводов (h), расстояние между прямым и обратным проводом таких линий принимается равным D_3 и определяется формулой Карсона (рис. 6.7, а)

$$D_3 = 2.085 \cdot 10^{-3} / \sqrt{f \lambda 10^{-9}} \quad (\text{м}), \quad (6.17)$$

где f – частота тока, Гц; λ – удельная проводимость земли $(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$.

При $f = 50$ Гц и среднем значении $\lambda = 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ эквивалентная глубина возврата тока через землю $D_3 = 935$ м. В практических расчетах величину D_3 принимают равной **1000 м**.

Возьмём участок воздушной линии электропередачи и заземлим один из её концов. Потенциал заземленного конца будет равен нулю. Пропустим через этот участок симметричную систему токов нулевой последовательности $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0$, тогда потенциал незаземленного конца участка запишется так:

$$U_0 = (I_0 x_L + I_0 x_M + I_0 x_M) = I_0 (x_L + 2x_M).$$

Отношение этого напряжения нулевой последовательности к фазному току I_0 даёт выражение для x_0 при $r_0 = 0$

$$(6.18) \quad x_0 = U_0 / I_0 = (x_L + 2x_M), \quad (6.18)$$

где x_L , x_M – реактивное сопротивление собственной и взаимной индукции.

При тех же условиях, пропуская симметричную систему токов прямой последовательности,

$$I_{a1}, I_{b1} = a^2 I_{a1}, I_{c1} = a I_{a1},$$

имеем

$$U_{a1} = (I_{a1}x_L + a^2 I_{a1}x_M + a I_{a1}x_M) = I_{a1}(x_L - x_M).$$

Отношение фазного напряжения прямой последовательности незаземлённого конца ВЛ (U_{a1}) к току I_{a1} даёт выражение для реактанса

$$x_1 = U_{a1} / I_{a1} = (x_L - x_M). \quad (6.19)$$

Сравнение структурных выражений (6.18) и (6.19) показывает, что x_0 на $3x_M$ больше x_1 . Это обусловлено различием характера токов: токи нулевой последовательности совпадают по фазам; токи прямой последовательности имеют сдвиг в 120° .

Для аналитического расчета x_0 одноцепной ВЛ без троса можно пользоваться выражением

$$x_0 = 0,435 \cdot \lg \frac{D_3}{R_{cp}}, \quad (6.20)$$

где $R_{cp} = \sqrt[3]{R_3 D_{c1}^2}$ – **средний геометрический радиус системы трех проводов;**

$D_{cp} = \sqrt[3]{d_{AB} d_{AC} d_{BC}}$ – **среднее геометрическое расстояние между фазными проводами;**

R_3 – **эквивалентный радиус провода.**

При наличии на линии глухозаземленных грозозащитных тросов сопротивление x_0 уменьшается за счет взаимоиндукции петли трос-провод. С учетом того, что токи в тросе и линии имеют встречное направление – сдвинуты относительно друг друга на 180° (рис. 6.7, б), получаем

$$x_0^T = x_0 - \frac{x_{0nm}^2}{x_{0T}}, \quad (6.21)$$

где x_0^T – **сопротивление нулевой последовательности ВЛ с тросом;**

x_{0nm}, x_{0T} – **сопротивления взаимоиндукции провод-трос и собственно троса в нулевой последовательности.**

Степень влияния троса зависит от его проводимости (стальной, алюминиевый).

Обратимся к двухцепной ВЛ (рис. 6.8). При коротком замыкании

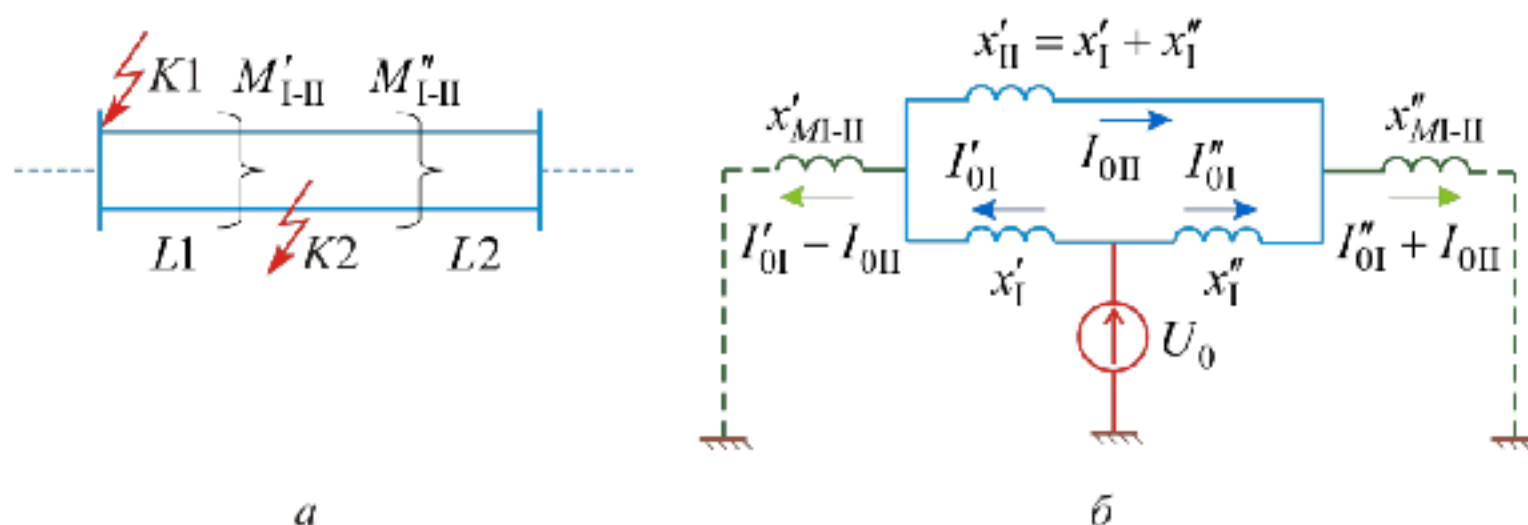


Рис. 6.8. Двухцепная ВЛ: **а** – принципиальная схема; **б** – схема замещения нулевой последовательности при КЗ в точке **К2**

в точке **К1** токи нулевой последовательности в обеих цепях текут согласно. В этих условиях сопротивление нулевой последовательности каждой цепи дополнительно увеличивается благодаря взаимоиндукции с проводами параллельной цепи, т. е.

$$x'_0 = x_0 + x_{M(I-II)} \quad (6.22)$$

и результирующее сопротивление двухцепной ВЛ при идентичности параллельных цепей

$$x''_0 = 0,5x'_0, \quad (6.23)$$

где x_0 – сопротивление нулевой последовательности одноцепной ВЛ;

$x_{M(I-II)}$ – сопротивление взаимоиндукции одной фазы цепи I и тремя фазами цепи II.

При коротком замыкании в точке **К2** двухцепной ВЛ токи нулевой последовательности цепей I и II в одном плече имеют согласное направление, а в другом – встречное, что не позволяет непосредственно воспользоваться выражениями, подобными (6.22). В этих условиях необходимо воспользоваться известной схемой замещения двух магнитно связанных цепей (рис. 6.8, б), на которой приняты следующие обозначения:

$$x'_I = x'_{0I} - x'_{M(I-II)}, \quad x''_I = x'_{0I} - x''_{M(I-II)}, \quad (6.24)$$

где x'_{0I} , x'_{0II} – сопротивления нулевой последовательности одноцепной ВЛ на участках L1 и L2;

$x'_{M(I-II)}$, $x''_{M(I-II)}$ – сопротивления взаимоиндукции цепей на участках L1 и L2.

Аналитические выражения для расчета x_0 воздушных линий с учетом конструктивных особенностей приведены в [1].

В упрощенных практических расчетах сопротивление нулевой последовательности x_0 воздушных линий электропередач допускается определять через коэффициент $k = x_0 / x_1$, значение которого зависит от их конструктивного исполнения. Приближенные значения коэффициентов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Исполнение воздушной линии электропередачи	$k = x_0 / x_1$
Одноцепная линия без троса	3.5
Одноцепная линия со стальным тросом	3.0
Одноцепная линия с хорошо проводящим тросом	2.0
Двухцепная линия без троса	5.5
Двухцепная линия со стальным тросом	4.7
Двухцепная линия с хорошо проводящим тросом	3.0

Активное сопротивление нулевой последовательности линии складывается из активного сопротивления провода r_n и дополнительного сопротивления r_3 , учитывающего потери активной мощности в земле от протекания в ней тока, т. е.

$$r_0 = r_n + r_3, \quad (6.25)$$

где $r_3 \approx 0,15$ Ом/км.

Условия определения реактивного сопротивления нулевой последовательности для кабельных линий аналогичны ВЛ. Часть токов нулевой последовательности возвращается по оболочке кабеля, а часть – по земле. Оболочка кабеля оказывает такое же влияние, как и трос в воздушных линиях, т. е. уменьшает реактанс нулевой последовательности. В зависимости от конструкции, материала оболочки, способа прокладки x_0 кабельных линий находится в пределах

$$x_0 = (3,5 \div 4,6) x_1 \text{ и } r_0 \approx 10r_1. \quad (6.26)$$

На эти значения можно ориентироваться в приближенных расчетах; более точные данные можно получить только на основе натурных измерений, которые можно найти в специализированной литературе.

6.3. Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

Неотъемлемым этапом расчета любого несимметричного режима является составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Преобразованием этих схем находят результирующие сопротивления всех последовательностей ($X_{1\Sigma}, X_{2\Sigma}, X_{0\Sigma}$); из схемы прямой последовательности дополнительно определяют эквивалентную ЭДС ($E_{1\Sigma}$). Эти преобразования осуществляют относительно **клемм несимметрии, т. е. начала и конца схем**. При поперечной несимметрии началом схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей являются точки (H_1, H_2, H_0), в которых объединены ветви с нулевым потенциалом. Концом схемы любой последовательности являются точки (K_1, K_2, K_0) возникновения несимметрии. При продольной несимметрии начало и конец схемы каждой последовательности – это две точки схемы, между которыми расположен источник несимметрии.

Для примера на **рис. 6.9** представлены схемы замещения всех трех последовательностей при несимметричном замыкании в точке **К**.

1. Схема прямой последовательности совершенно аналогична схеме при трехфазном замыкании с тем отличием, что в точке **К** приложено напряжение U_{K1} . Обмотка 3 трансформатора Т2 в схему не входит, поскольку она находится на холостом ходу. В силу симметрии режима ток в нейтрали трансформатора Т1 не протекает и, следовательно, реактор Р в схеме замещения отсутствует.

2. Схема обратной последовательности по конфигурации повторяет схему прямой последовательности. Ее особенность состоит в том, что отсутствуют ЭДС генерирующих источников; в точке КЗ приложено напряжение обратной последовательности (U_{K2}), и сопротивления синхронных машин отличны от сопротивлений прямой последовательности.

3. Схема нулевой последовательности существенно отличается от схемы прямой последовательности в силу различных путей циркуляции токов. Конфигурация схемы нулевой последовательности определяется в основном схемой соединения обмоток трансформаторов и их местом расположения. Составление схемы следует начинать от места короткого замыкания, считая, что в этой точке все фазы замкнуты между собой и к ней приложено напряжение нулевой последовательности (U_{K0}). Далее следует выявить возможные пути протекания токов нулевой последовательности. Это возможно, если в цепи, электрически связанной с точкой КЗ, имеется по меньшей мере одна заземленная нейтраль. Если таких нейтралей несколько, то образуется несколько замкнутых контуров.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора, вводится в схему утроенной величиной и располагается последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтрали которой оно находится. Это обусловлено тем, что в нейтрали протекает утроенный ток и падение напряжения нулевой последовательности на сопротивлении реактора составляет $3I'_0 \cdot X_p$. Оно должно быть обеспечено и в однолинейной схеме замещения, по которой протекает фазный ток. Это достигается утроением сопротивления нейтрали, так что падение напряжения при этом остаётся неизменным, т. е. $I'_0 \cdot 3X_p$. Сопротивление нулевой последовательности линии существенно отличается от сопротивления прямой, поэтому оно введено значением X_{L0} .

Для рассматриваемой схемы, изображенной на **рис. 6.9,г**, обмотки трансформаторов Т1 и Т2, соединённые в треугольник (Δ), входят в схему нулевой последовательности. Потенциал за этими обмотками равен нулю. По этой причине генератор Г в схеме отсутствует. Все остальные элементы входят в схему, включая и реактор в нейтрали Т1.

Как отмечалось ранее, из схем замещения отдельных последовательностей определяются их эквивалентные параметры относительно клемм несимметрии.

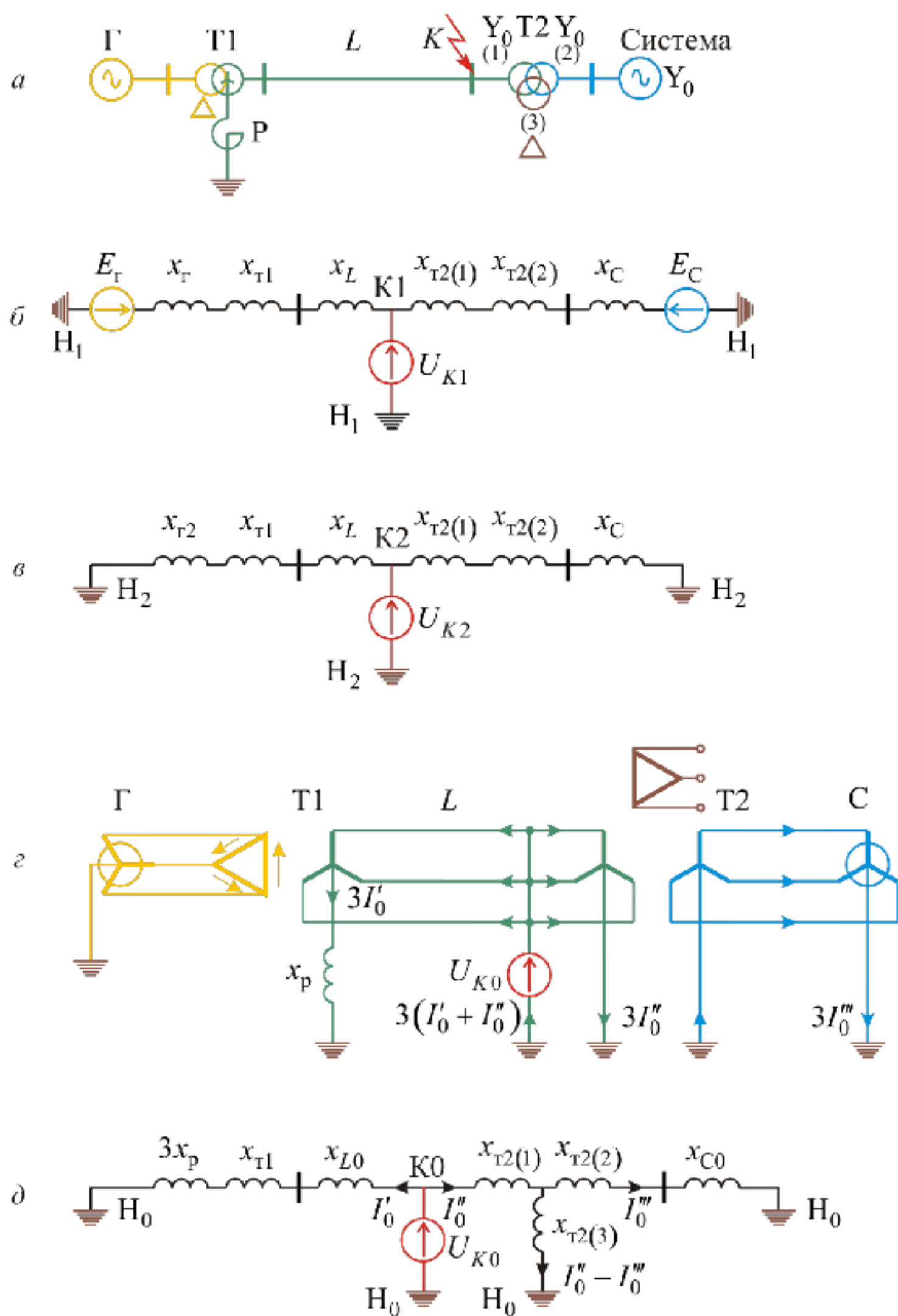


Рис. 6.9. Схемы замещения различных последовательностей:
а – принципиальная схема; **б, в** – схемы прямой и обратной последовательностей; **г, д** – трехлинейная и однолинейная схемы нулевой последовательности

Применительно к схемам замещения, изображенным на рис. 6.9, имеем эквивалентные схемы **1, 2, 0** последовательностей (рис. 6.10). Параметры этих схем определяются так:

- **для схемы прямой последовательности:**

$$X_{A1} = X_{\Gamma} + X_{T1} + X_L, \quad X_{B1} = X_{T2(1)} + X_{T2(2)} + X_C;$$

$$X_{1\Sigma} = X_{A1} // X_{B1}, \quad E_{1\Sigma} = \frac{E_{\Gamma} X_{B1} + E_C X_{A1}}{X_{A1} + X_{B1}};$$

- **для схемы обратной последовательности:**

$$X_{A2} = X_{\Gamma 2} + X_{T1} + X_L, \quad X_{B2} = X_{T2(1)} + X_{T2(2)} + X_C, \quad X_{2\Sigma} = X_{A2} // X_{B2};$$

- **для схемы нулевой последовательности:**

$$X_{A0} = 3X_p + X_{T1} + X_{L0}, \quad X_{B0} = \left[X_{T2(3)} // (X_{T2(2)} + X_{C0}) \right] + X_{T2(1)};$$

$$X_{0\Sigma} = X_{A0} // X_{B0}.$$

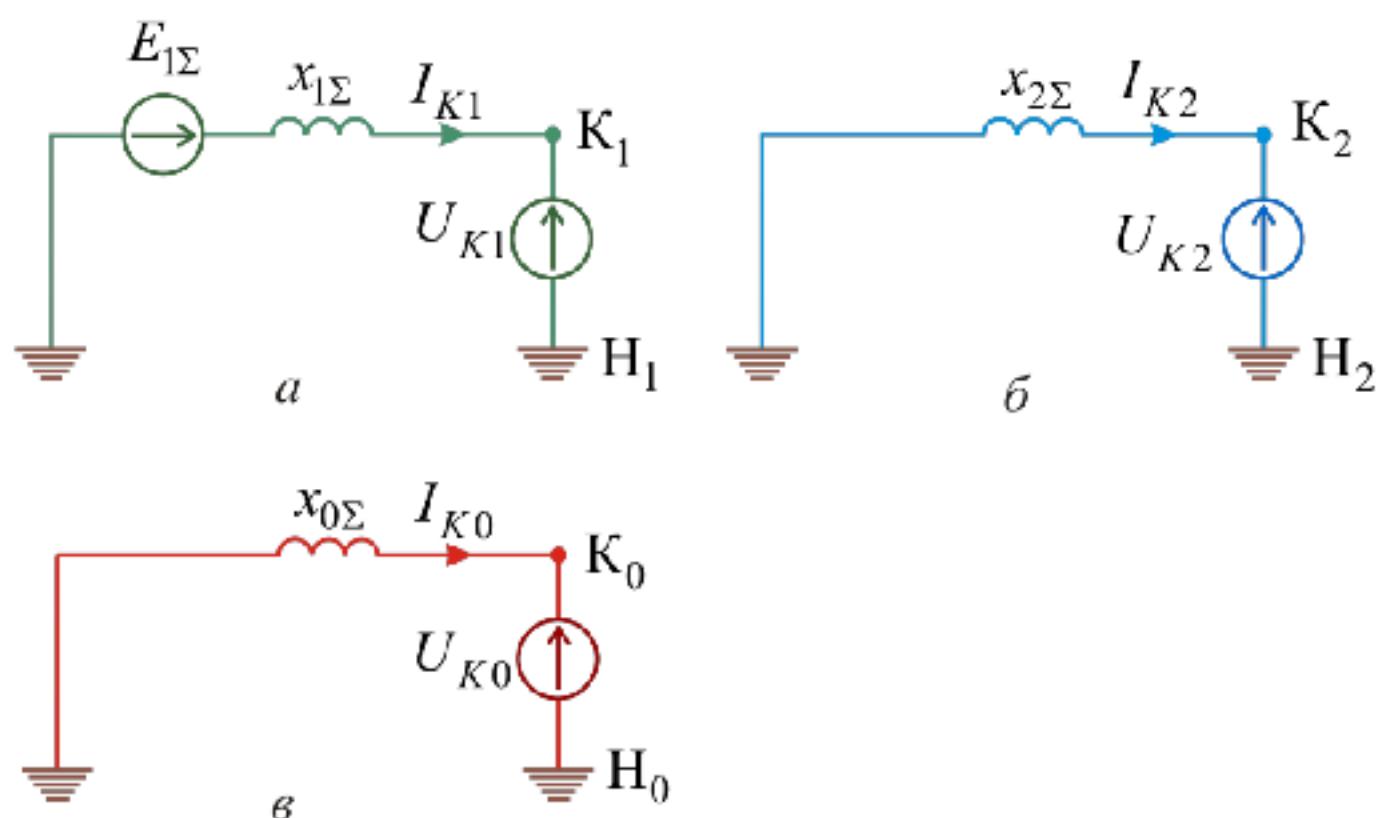


Рис. 6.10. Эквивалентные схемы прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

На рис. 6.11, а приведена схема, в которой элементы обозначены порядковыми номерами, на рис. 6.11, б – соответствующая ей схема замещения нулевой последовательности. Обмотки трансформаторов со стороны генераторов соединены в «треугольник». Это препятствует прохождению токов нулевой последовательности в генераторах при внешних коротких замыканиях. Обмотка 5 (Y) трансформатора T2 со стороны узла возникновения короткого замыкания не пропускает токов нулевой последовательности, поэтому она и последовательная ей ветвь воздушной

линии $L2$ в схеме отсутствуют. Это в равной степени относится и к трансформатору Т3. Реактор (7) в нейтрали обмотки 6 трансформатора Т2 входит в схему утроенным реактансом и располагается последовательно с сопротивлением этой обмотки (6). Трансформатор Т4 входит в схему всеми тремя обмотками.

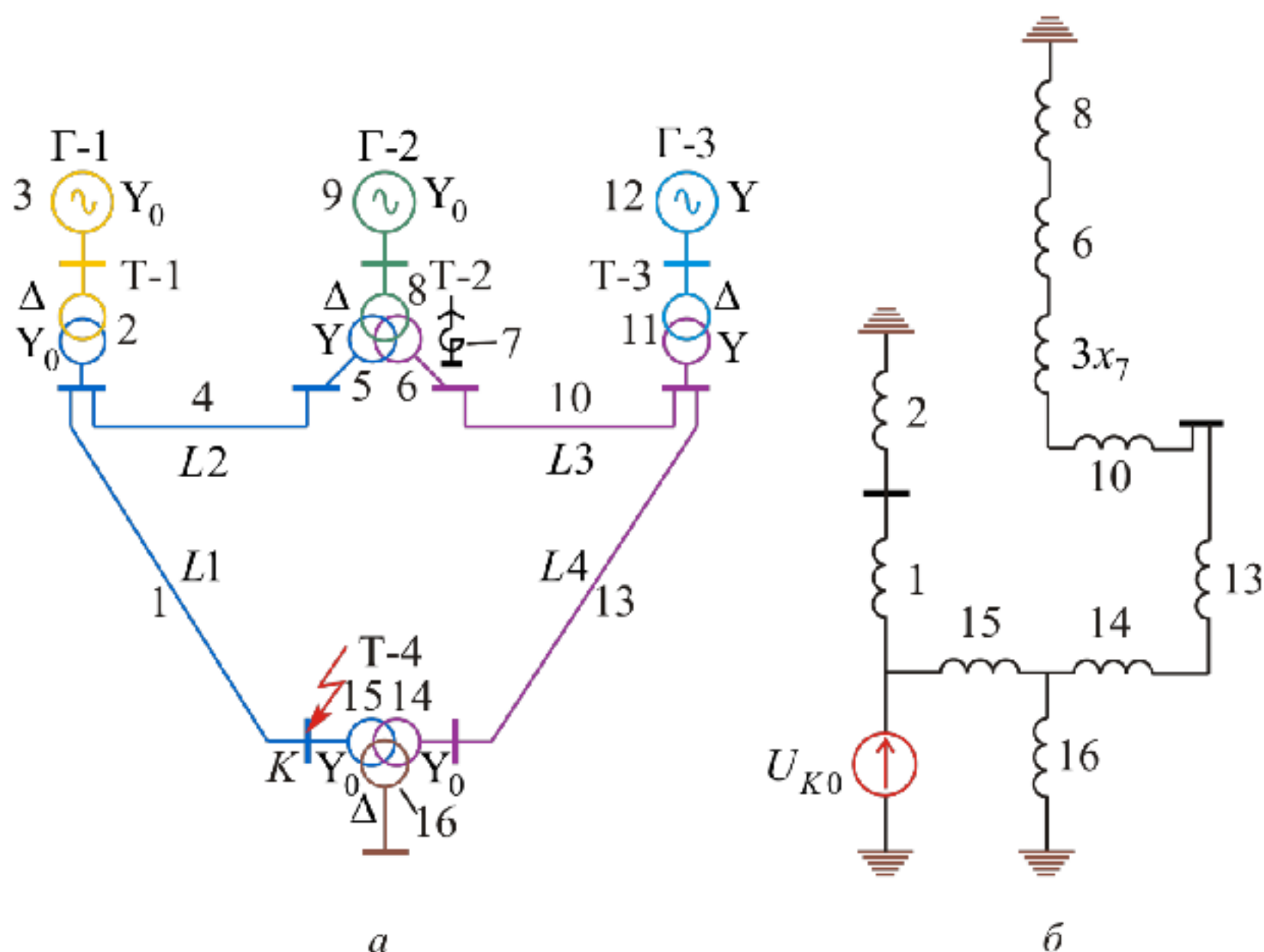


Рис. 6.11. Пример схемы нулевой последовательности: **а** – принципиальная схема; **б** – схема замещения нулевой последовательности