

# **Релейная защита и автоматика**

## **Векторные диаграммы коротких замыканий**

## 7. Несимметричные короткие замыкания

Несимметричные короткие замыкания - двухфазные, однофазные и двухфазные на землю, в отличие от трехфазных КЗ, характеризуются нарушением симметрии токов и напряжений, т.е. фазные токи, напряжения и углы между ними становятся неодинаковыми, нарушается симметрия трехфазной электрической сети.

Напомним, что при трехфазных коротких замыканиях симметрия токов и напряжений не нарушается, поэтому расчеты трехфазных КЗ выполняются для одной фазы. Несимметричные короткие замыкания таким методом рассчитывать нельзя.

Для расчета несимметричных КЗ используется, как правило, метод симметричных составляющих [3].

### 7.1 Метод симметричных составляющих

Суть метода симметричных составляющих: любую несимметричную систему 3-х векторов можно однозначно разложить на три симметричные системы векторов - прямую, обратную и нулевую.

Это можно выразить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} \\ \dot{E}_B &= \dot{E}_{B1} + \dot{E}_{B2} + \dot{E}_{B0} \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_{C1} + \dot{E}_{C2} + \dot{E}_{C0}\end{aligned}\quad (32)$$

Векторы системы прямой последовательности равны между собой, сдвинуты друг относительно друга на угол 120 градусов, имеют прямое чередование фаз (А, В, С) при положительном вращении системы векторов (против часовой стрелки). Геометрическая сумма векторов равна нулю. Такая система называется уравновешенной.

Векторы системы обратной последовательности также имеют одинаковые значения, угол сдвига по фазе, равный 120 градусам, но имеют обратное чередование фаз (А, С, В,). Геометрическая сумма векторов обратной последовательности равна нулю, т.е. система уравновешена.

Векторы системы нулевой последовательности также равны между собой, но совпадают по фазе и в сумме представляют собой утроенный вектор, т.е.  $\dot{E}_{A0} + \dot{E}_{B0} + \dot{E}_{C0} = 3\dot{E}_{0}$ . Таким образом система нулевой последовательности симметрична, но не уравновешена.

Используя уравнения (32), можно геометрически сложить одноименные векторы всех трех систем и получить исходную несимметричную систему векторов:  $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ .

Переходя к векторному изображению любых величин, в том числе токов и напряжений, мы используем метод комплексных чисел, в котором любое комплексное число можно записать, как некоторый модуль  $F$ , умноженный на фазный множитель  $e^{j\Phi}$ , который определяет угол поворота вектора относительно оси действительных величин.

Значит, если принять фазу А за основную, можно две другие фазы выразить через вектор фазы А и соответствующий фазный множитель.

Этот фазный множитель принято называть оператором  $a$ , т.е. можно записать, что  $a=e^{j120}$ .

Умножить вектор на оператор  $a$  значит повернуть данный вектор на 120 градусов против часовой стрелки (положительное вращение векторов), умножить на  $a^2$  — повернуть на 240 градусов против часовой стрелки или на 120 градусов по часовой стрелке.

Используя вектор фазы А и оператор  $a$  можно систему уравнений (32) записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} \\ \dot{E}_B &= a^2 \cdot \dot{E}_{A1} + a \cdot \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} \\ \dot{E}_C &= a \cdot \dot{E}_{A1} + a^2 \cdot \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} \end{aligned} \quad (33)$$

Совместно решая систему уравнений (32) и (33) получаем значения векторов отдельных последовательностей для основной фазы А

$$\begin{aligned} \dot{E}_{A1} &= \frac{1}{3} (\dot{E}_A + a \cdot \dot{E}_B + a^2 \cdot \dot{E}_C) \\ \dot{E}_{A2} &= \frac{1}{3} (\dot{E}_A + a^2 \cdot \dot{E}_B + a \cdot \dot{E}_C) \\ \dot{E}_{A0} &= \frac{1}{3} (\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C) \end{aligned} \quad (34)$$

Применение метода симметричных составляющих при расчетах несимметричных КЗ можно наглядно показать на примере однофазного КЗ на фазе А. При однофазном КЗ ток в месте КЗ протекает только в одной, поврежденной, фазе, а в двух неповрежденных фазах токи равны нулю (см. табл.3.1).

Используя метод симметричных составляющих, запишем

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} = 0 \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} = 0 \end{aligned}$$

На этом основании из уравнений (34) получим, что

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A0} = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

т.е. составляющие тока фазы А прямой, обратной и нулевой последовательностей равны по значению и векторы их направлены в одну сторону.

Представим себе векторные диаграммы токов (рис.7.1).

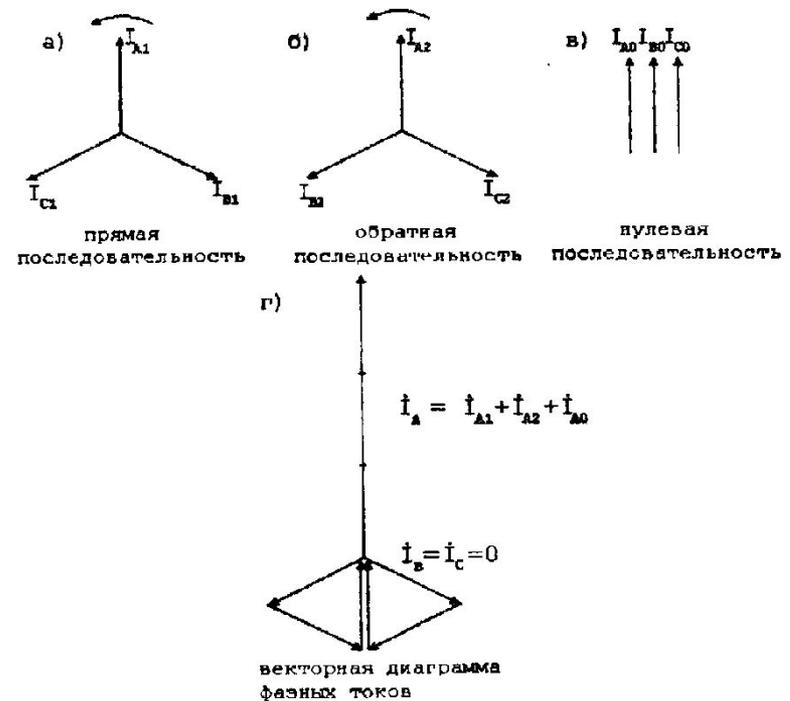
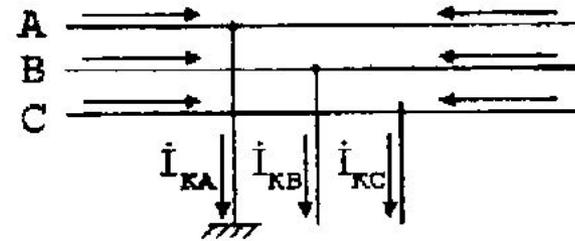


Рис.7.1 Пример графического определения токов в месте КЗ при однофазном КЗ на фазе А методом симметричных составляющих

## Применение метода симметричных составляющих для расчета несимметричного КЗ

Используя метод симметричных составляющих для расчетов несимметричных коротких замыканий, мы рассматриваем данный вид короткого замыкания отдельно для каждой из последовательностей.

Поэтому любое несимметричное КЗ можно, также как и 3-х фазное, рассчитывать для одной фазы, но составляя три схемы замещения - прямой, обратной и нулевой последовательностей, преобразовывая их относительно места КЗ известными методами. При этом будем считать, что, независимо от вида короткого замыкания, в генераторах существует только ЭДС прямой последовательности. ЭДС обратной и нулевой последовательностей равны нулю.

Результирующие схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

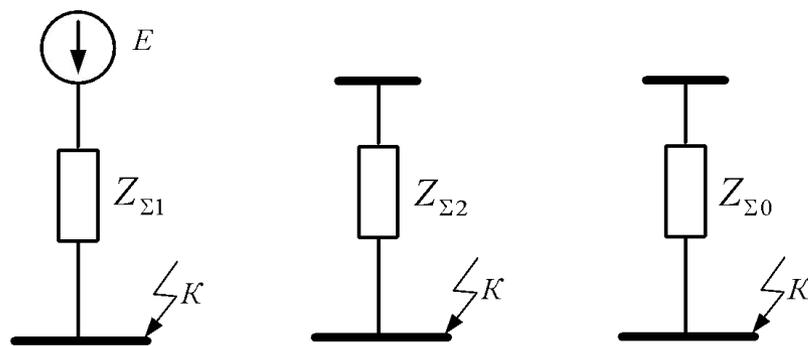
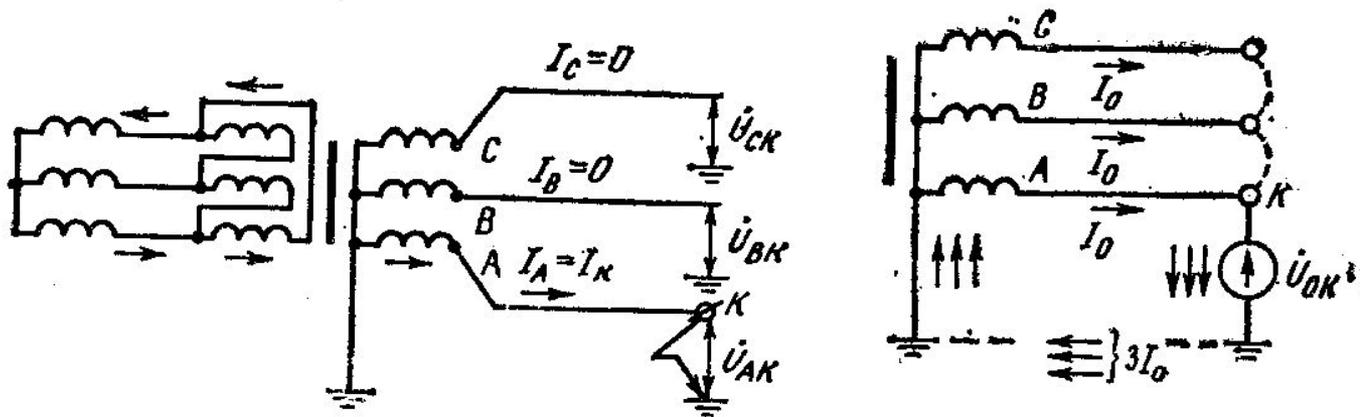


схема замещения нулевой последовательности принципиально отличается от схем прямой и обратной последовательностей т.к. геометрическая сумма векторов токов и напряжений нулевой последовательности не равны нулю, а представляют утроенный вектор тока или напряжения.

Поэтому для протекания токов нулевой последовательности необходим контур, который создается через землю, место КЗ и заземленные нейтралю трансформаторов. Следовательно, нулевая последовательность имеет место при коротких замыканиях на землю – однофазных и двухфазных КЗ – только в сетях, работающих с глухозаземленными нейтралью.



# Определение параметров нулевой последовательности сети

## Кабельные линии

Сопротивление нулевой последовательности кабельных линий зависит от способа заземления его оболочки, которая так же, как заземленный трос воздушной линии, образует дополнительный контур для протекания токов нулевой последовательности, параллельный контуру, образуемому через землю.

Таким образом, при протекании токов нулевой последовательности по жилам кабеля часть этого тока возвращается через землю, часть через его оболочку.

Точное вычисление параметров нулевой последовательности кабеля достаточно сложно. Для практических расчетов можно принимать для трехжильных кабелей  $X_0 = (3,5 + 4,6)X_1$  [2].

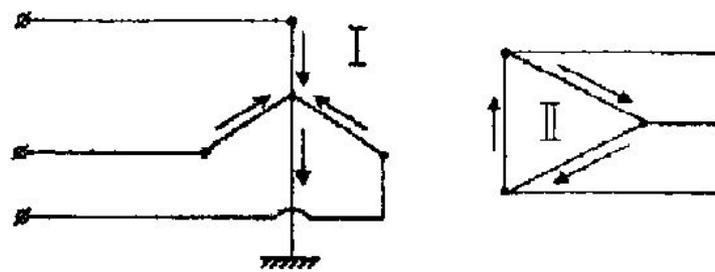
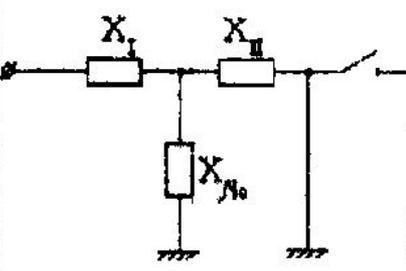
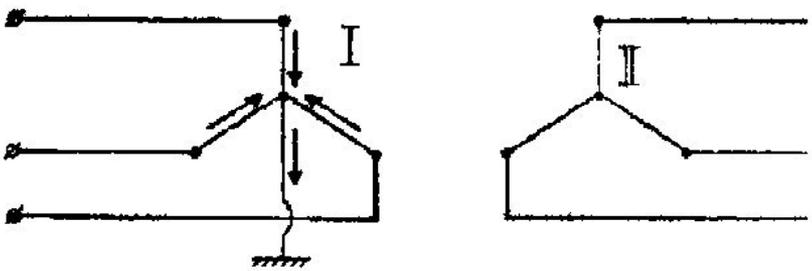
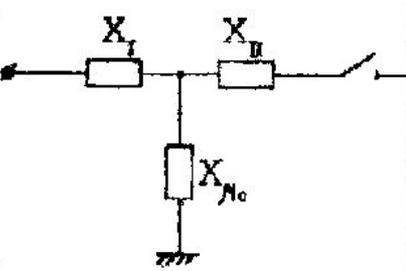
## Трансформаторы и автотрансформаторы

Реактивность нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов зависит от их конструкции и схемы соединения обмоток.

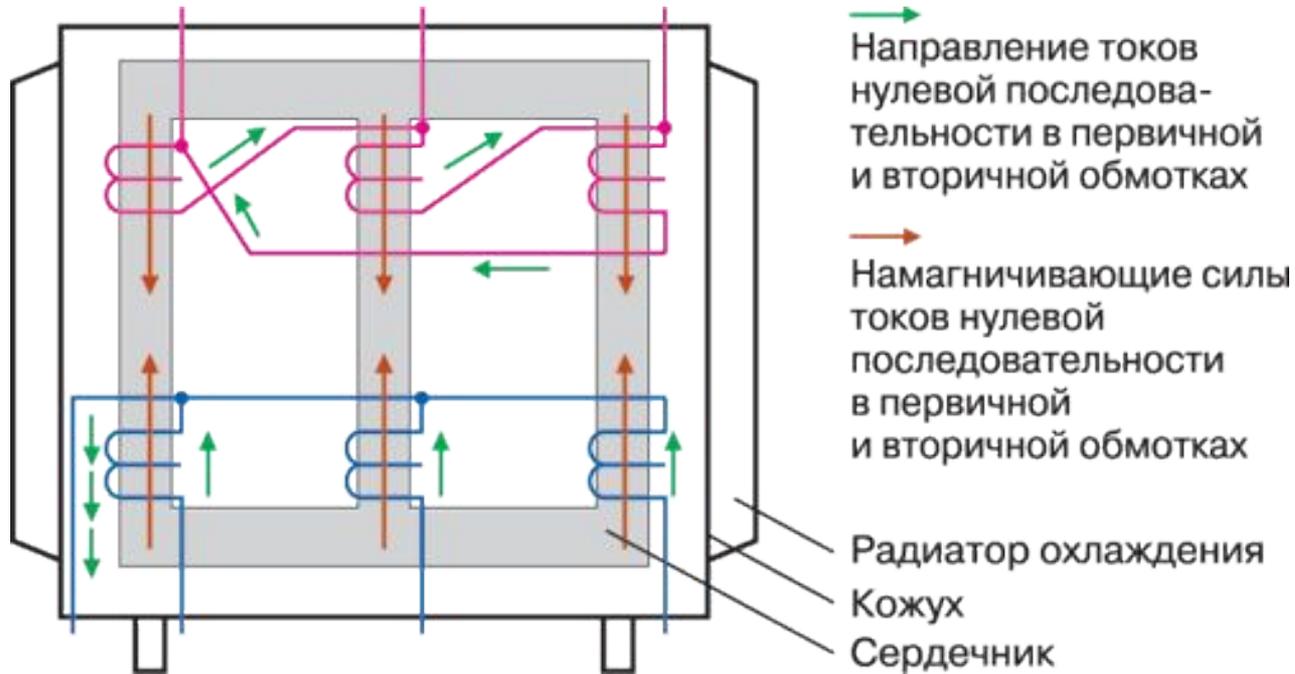
В схему для протекания токов нулевой последовательности должны входить только трансформаторы, работающие с глухозаземленными нейтралями или нейтралями, заземленными через токоограничивающие реакторы.

Сопротивление для токов нулевой последовательности трансформатора, не имеющего заземленной нейтрали, равно бесконечности,  $X_0 \approx \infty$ . Токи нулевой последовательности не будут протекать по обмоткам такого трансформатора, ибо не создается контура для их протекания через землю.

**Схемы замещения трансформаторов различных типов для токов нулевой последовательности**

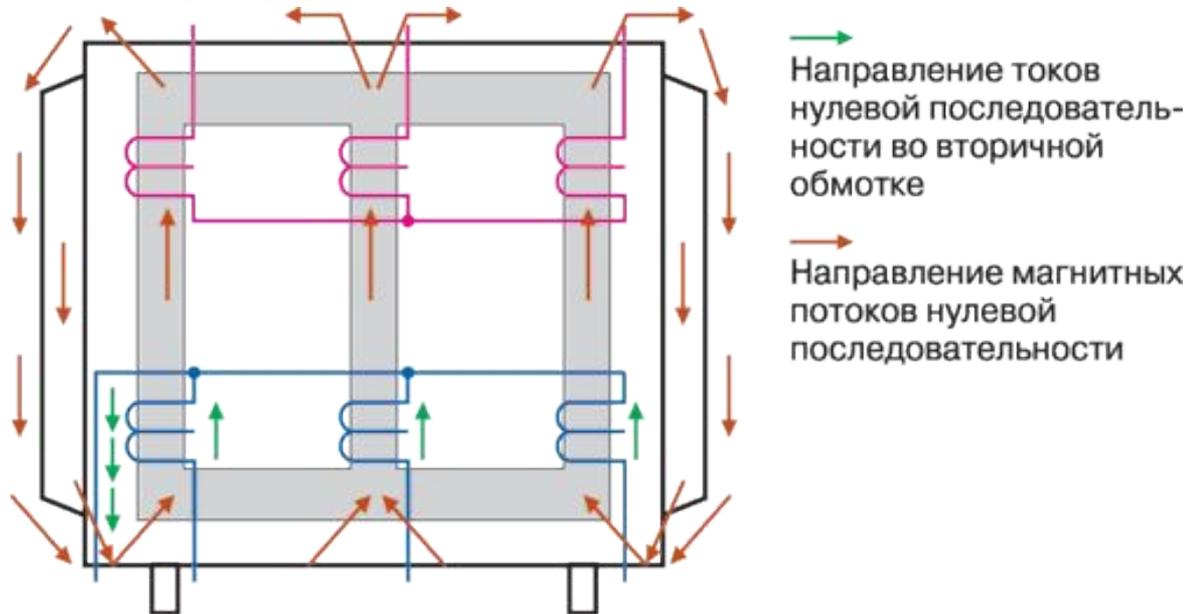
№№ п/п	Схема протекания токов нулевой последовательности в обмотках трансформаторов	Схема замещения
1	<p align="center">Двухобмоточный трансформатор <math>Y_0/\Delta</math></p> 	
2	<p align="center">Двухобмоточный трансформатор <math>Y_0/Y</math></p> 	

## Направления токов и магнитных потоков нулевой последовательности в трансформаторе со схемой соединения обмоток $\Delta/Y_0$



В таких трансформаторах токи прямой, обратной и нулевой последовательностей протекают как в первичной, так и во вторичной обмотках. При этом токи нулевой последовательности в первичной обмотке замыкаются внутри нее и в сеть не выходят. Создаваемые токами нулевой последовательности первичных и вторичных обмоток намагничивающие силы (ампер-витки) направлены встречно и почти полностью компенсируют друг друга, что обуславливает небольшую величину реактивных сопротивлений трансформатора. При этом сопротивления прямой и нулевой последовательностей приблизительно равны:  **$R_1 = R_0$ ;  $X_1 = X_0$** .

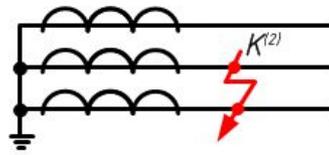
## Направления токов и магнитных потоков нулевой последовательности в трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/Y_0$



Совпадающие по фазе магнитные потоки нулевой последовательности, создаваемые токами вторичной обмотки, выходят за пределы магнитного сердечника и замыкаются через металлический кожух трансформатора. Это определяет значительно большую величину сопротивлений нулевой последовательности таких трансформаторов:  **$R_0 \gg R_1$ ;  $X_0 \gg X_1$** .

Следует отметить, что в отличие от сопротивлений прямой последовательности трансформаторов, которые можно рассчитать, сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения обмоток  $Y/Y_n$  расчету не поддаются. Их можно определить только экспериментально. Величина этих сопротивлений во многом зависит от конструкции кожуха трансформатора, от величины зазоров между сердечником и кожухом и т.п. Кроме того, имеющиеся на сегодня данные по сопротивлениям нулевой последовательности трансформаторов крайне скудны и противоречивы. Так, согласно замерам Минского трансформаторного завода, выполненным много лет назад, реактивные сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения обмоток  $Y/Y_n$  превышают сопротивления прямой последовательности в среднем в 10 раз. В то же время в ГОСТ 3484.1-88 имеется фраза о том, что эти сопротивления могут отличаться на два порядка. И этим сегодня противоречия не исчерпываются

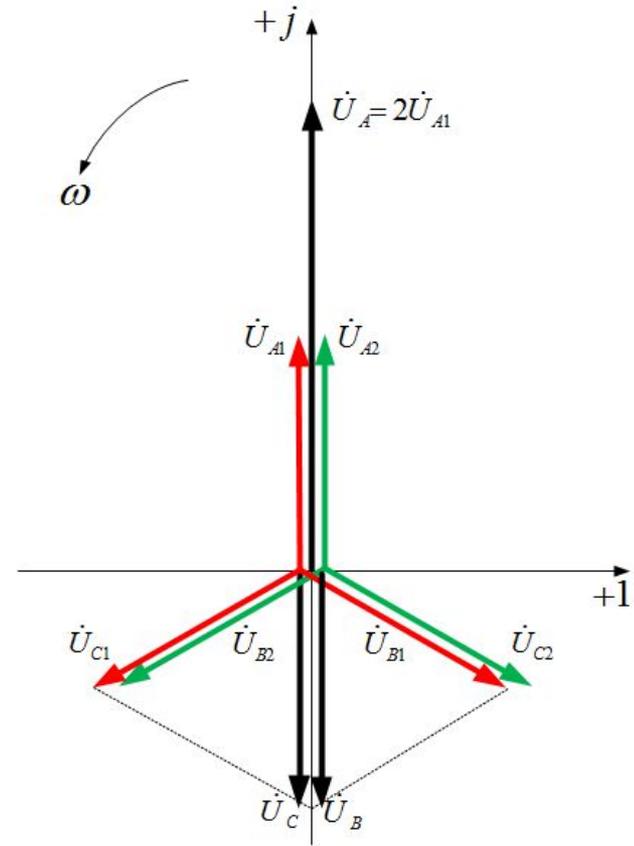
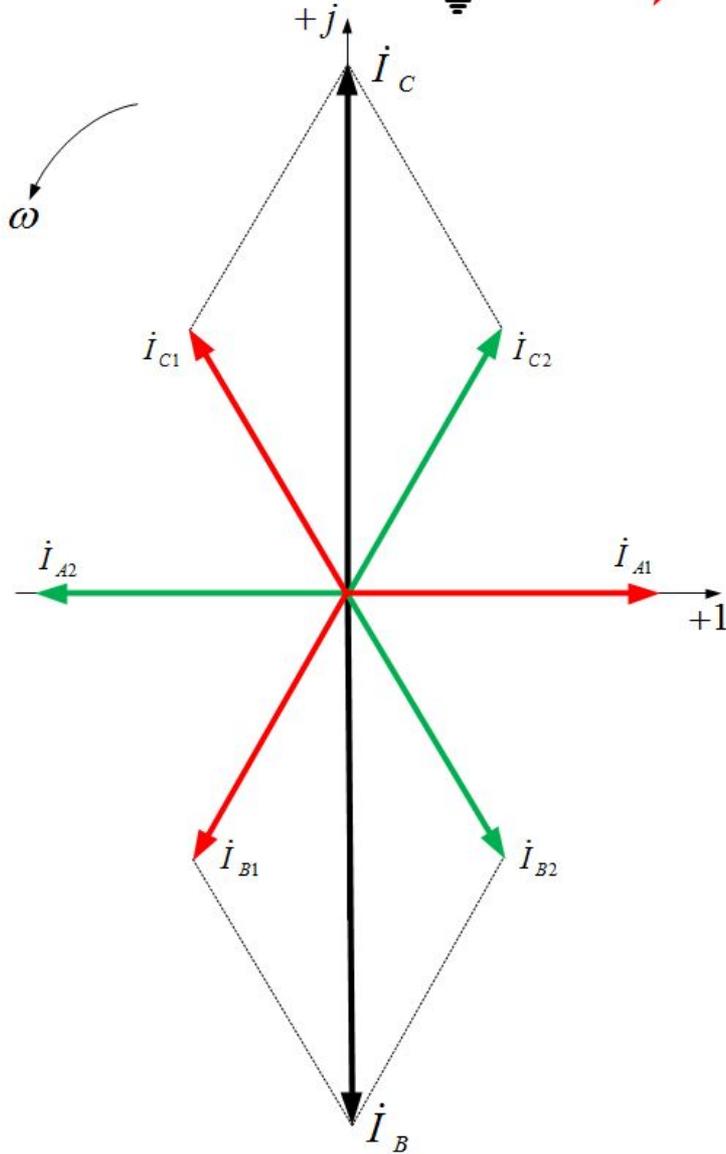
# Двухфазное короткое замыкание



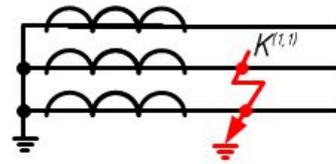
$$I_b = -I_c = I_k$$

$$I_a = 0$$

$$U_b = U_c$$



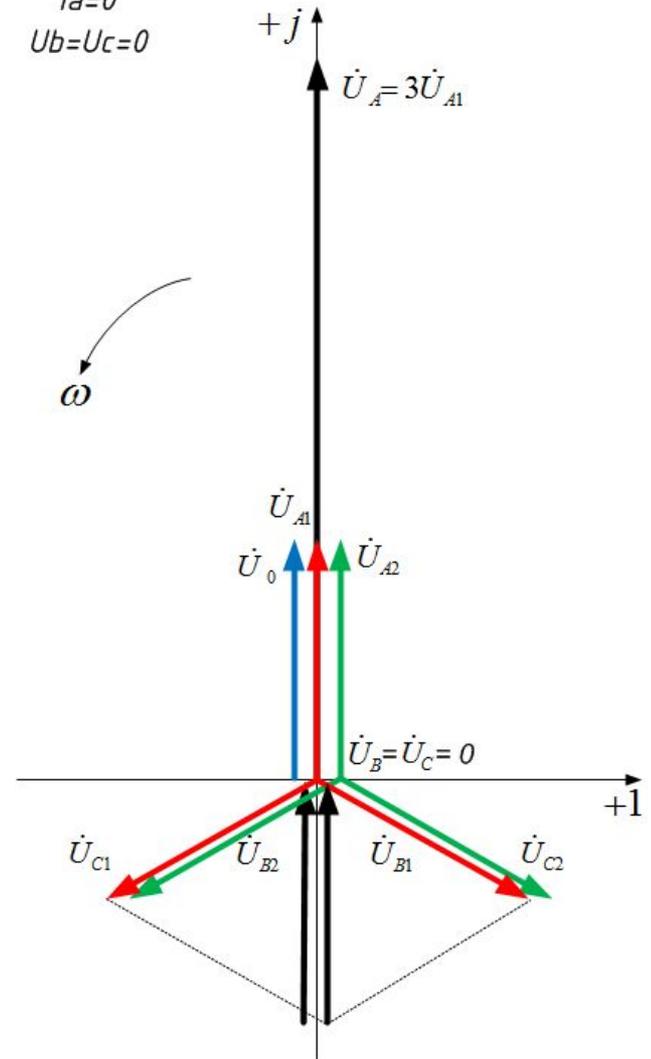
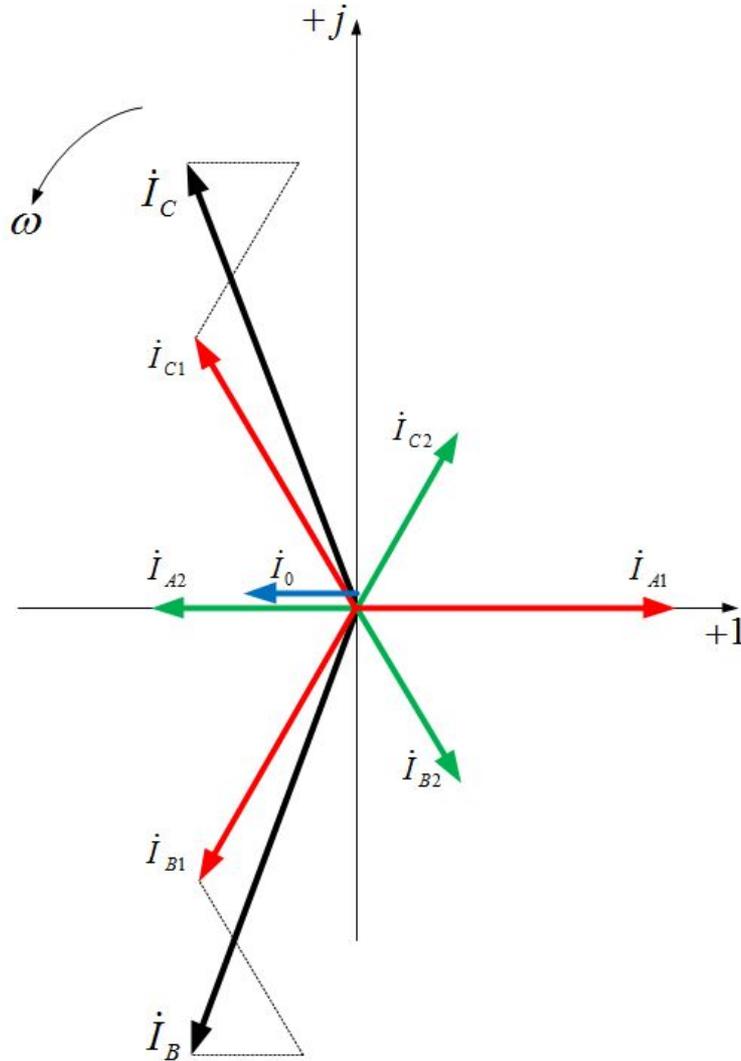
# Двухфазное короткое замыкание на землю



$$|I_b| = |I_c| = I_k$$

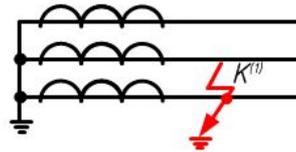
$$I_a = 0$$

$$U_b = U_c = 0$$



$$\dot{U}_{\bar{A}} = 3\dot{U}_{A1}$$

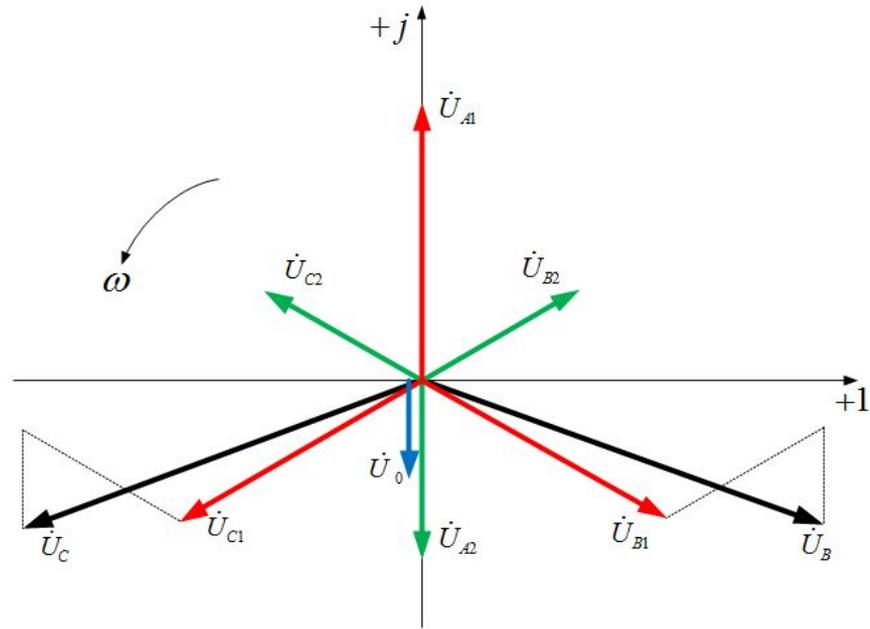
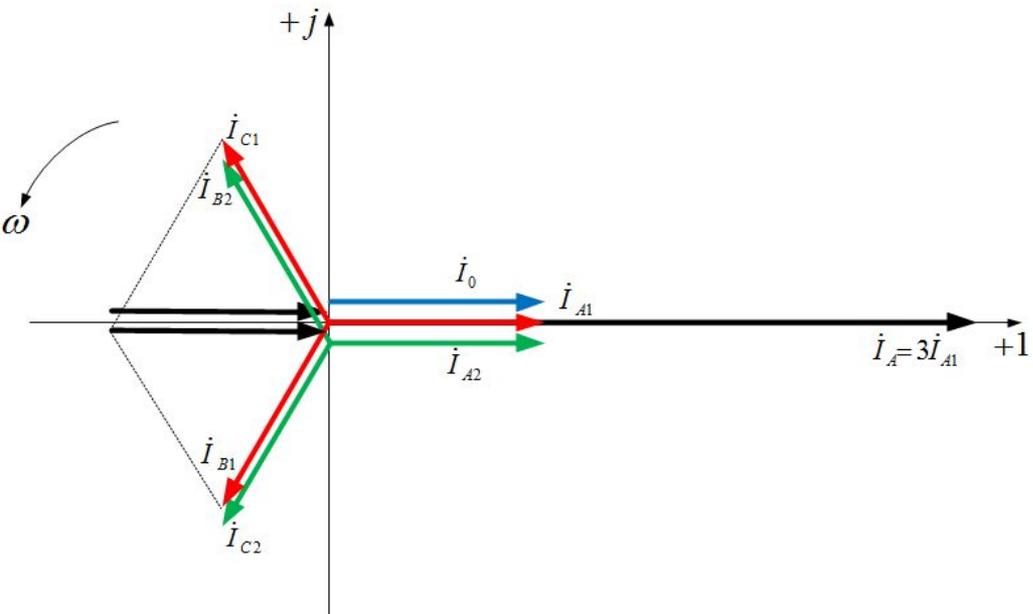
### Однофазное короткое замыкание



$$I_b = I_c = 0$$

$$U_a = 0$$

$$|U_b| = |U_c| = U_k$$



## Трансформация симметричных составляющих

Ряд особенностей имеют расчеты несимметричных КЗ за трансформаторам при определении токов, протекающих по его обмоткам. При переходе через трансформатор токи и напряжения изменяют значения и фазу в зависимости от схемы и группы соединения обмоток трансформатора

Частный случай – трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y-12. Токи и напряжения на сторонах ВН и НН отличаются только по значению, не меняя фазу.

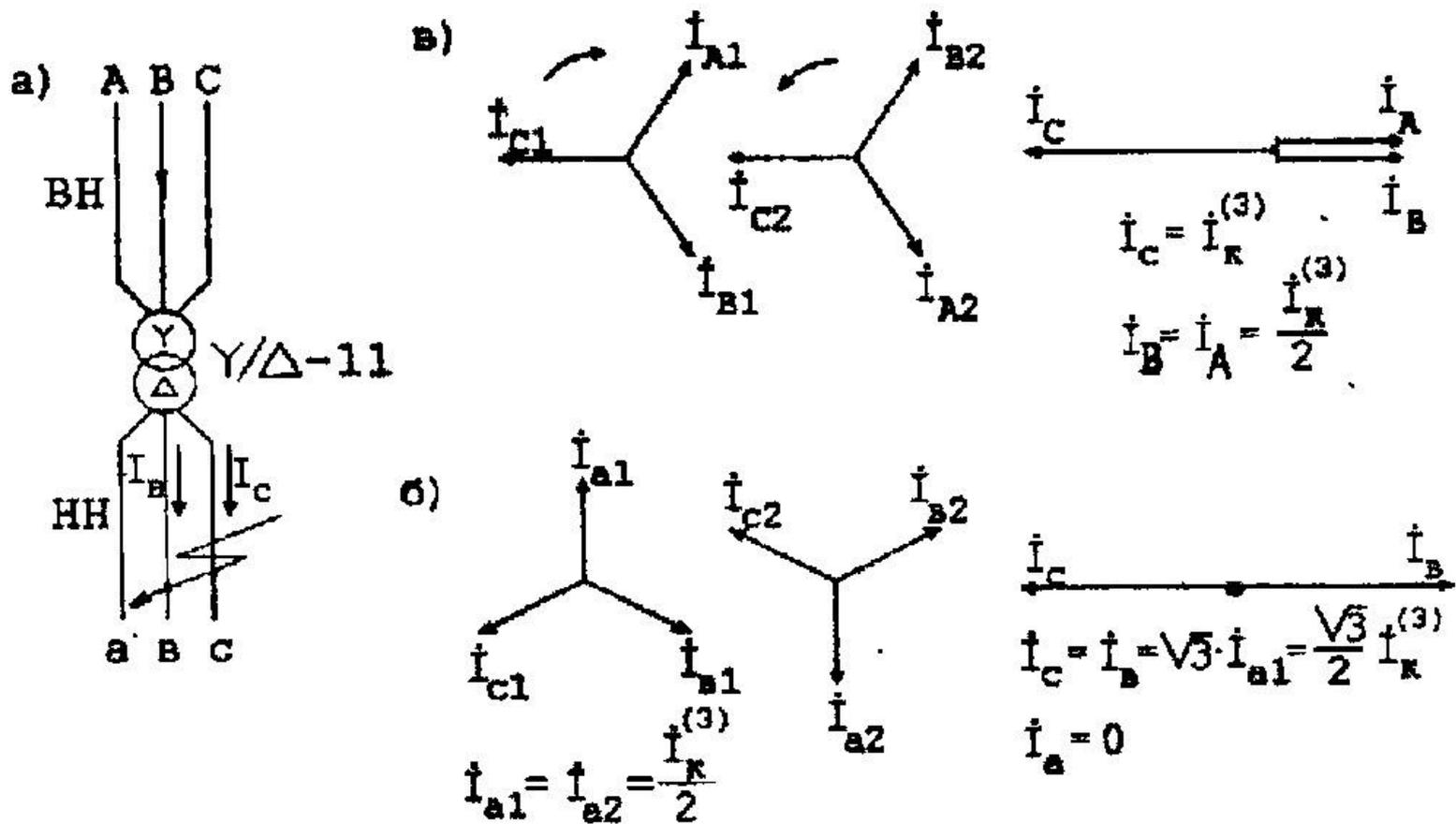
При расчетах несимметричных КЗ на одной из сторон трансформатора возникает необходимость вычисления токов не только в месте КЗ, но и на другой стороне трансформатора. Используя метод симметричных составляющих, вначале рассчитываются токи прямой последовательности и определяется угол поворота вектора тока при переходе через обмотку, соединенную в треугольник; затем определяются токи обратной последовательности и угол поворота вектора тока обратной последовательности при переходе через обмотку треугольника, т.е. вводится понятие комплексного коэффициента трансформации [2].

Суммируя геометрически эти величины, получаем полные токи в фазах на сторонах ВН и НН трансформатора.

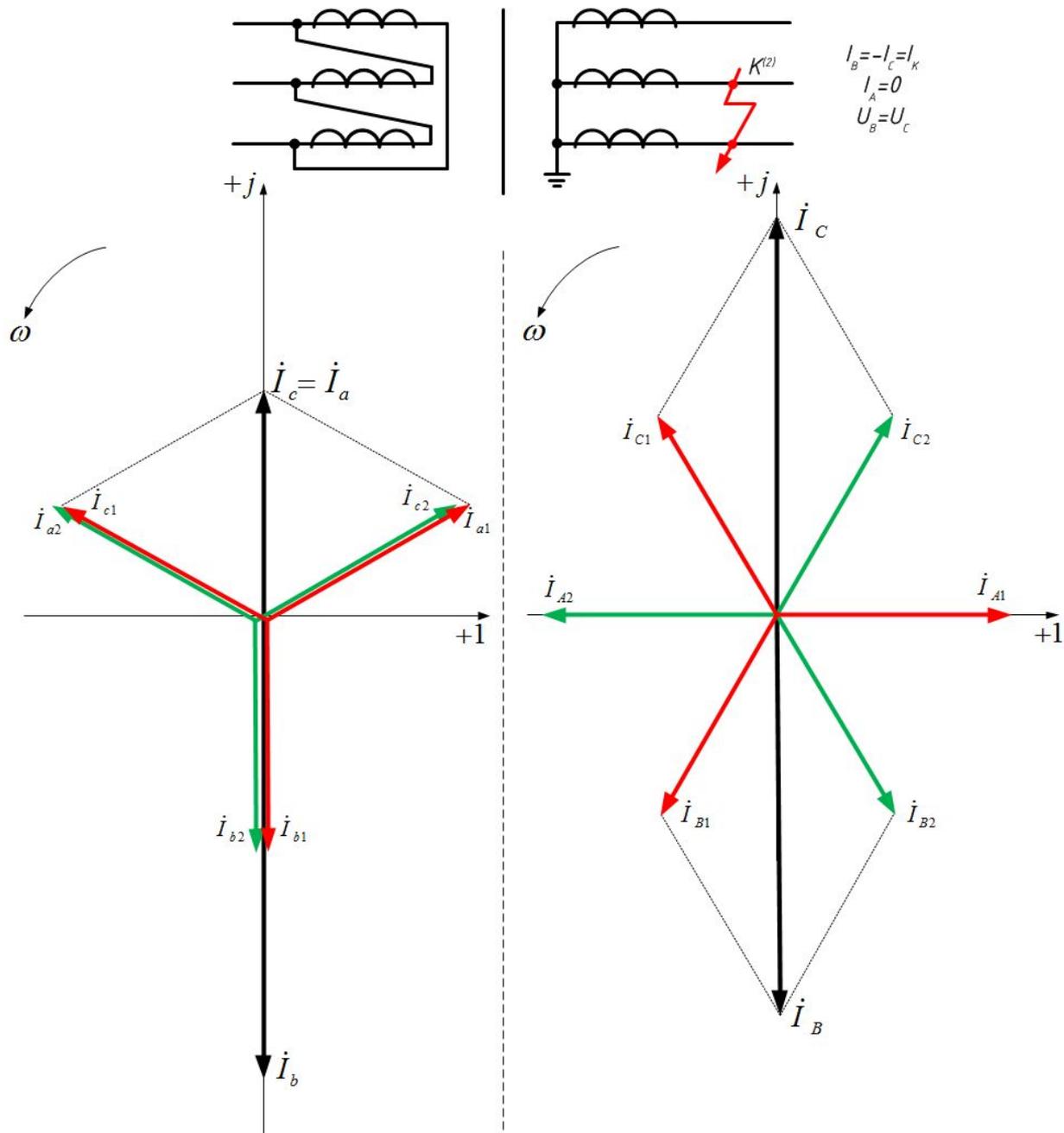
Угол поворота векторов прямой последовательности при переходе от звезды к треугольнику определяется соотношением  $(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$ ;

Угол поворота векторов обратной последовательности соотношением:  $-(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$ ,

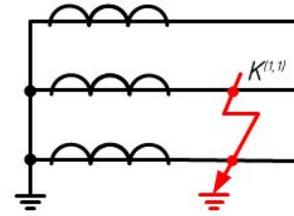
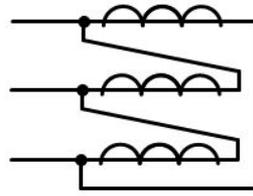
При переходе от обмотки треугольника к обмотке, соединенной в звезду векторы токов прямой последовательности повернутся на угол  $-(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$ , т.е. на  $30^\circ$  по часовой стрелке (отрицательное направление вращения векторов); векторы токов обратной последовательности повернутся на угол  $(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$ , т.е. на  $30^\circ$  в положительном направлении (против часовой стрелки).



# Двухфазное короткое замыкание



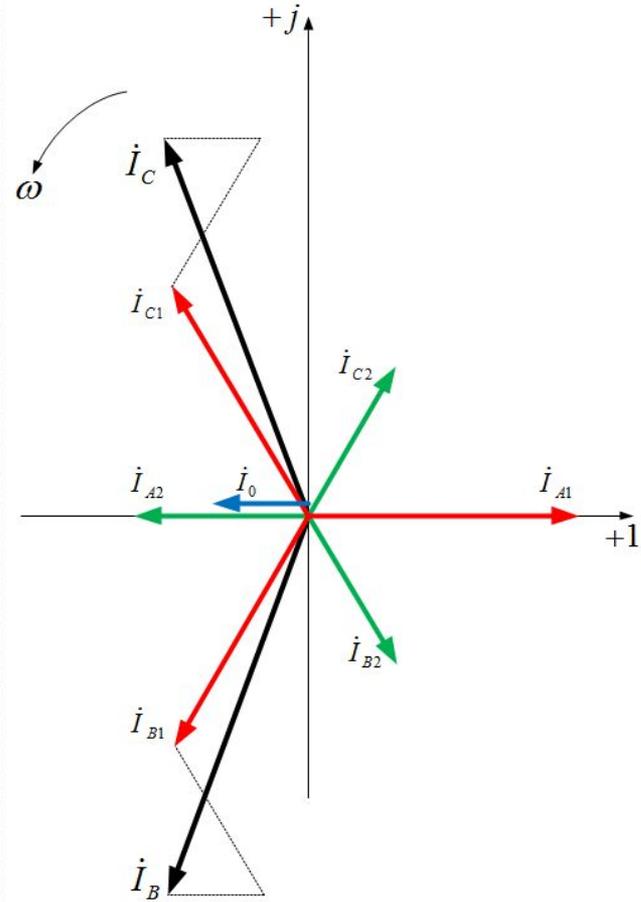
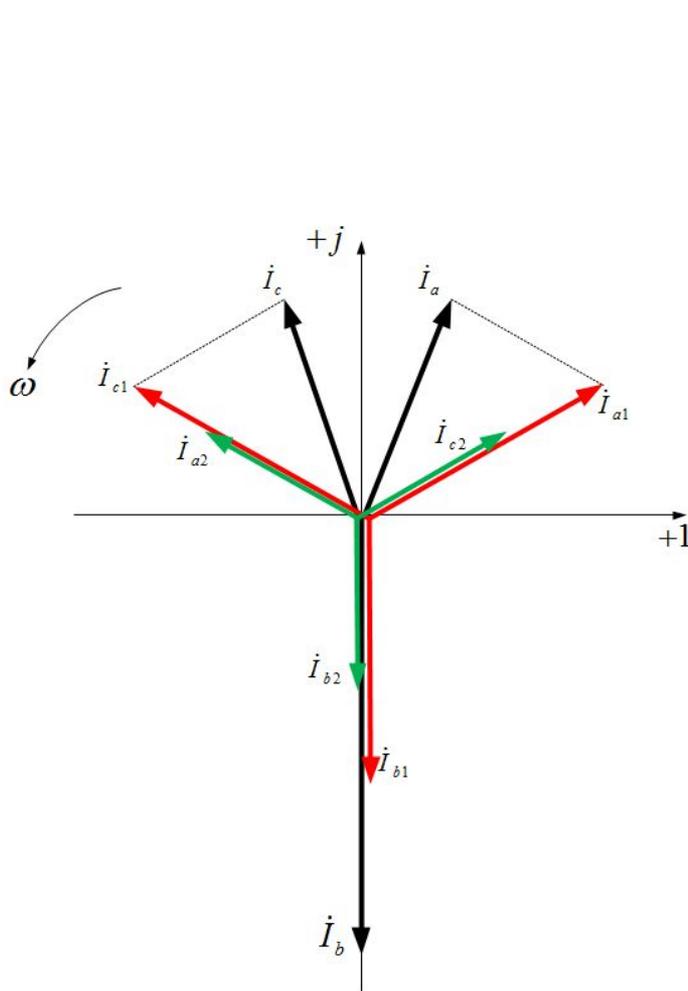
# Двухфазное короткое замыкание на землю



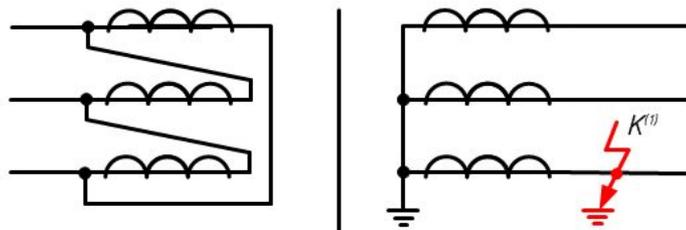
$$|b|=|c|=1/k$$

$$I_a=0$$

$$U_b=U_c=0$$



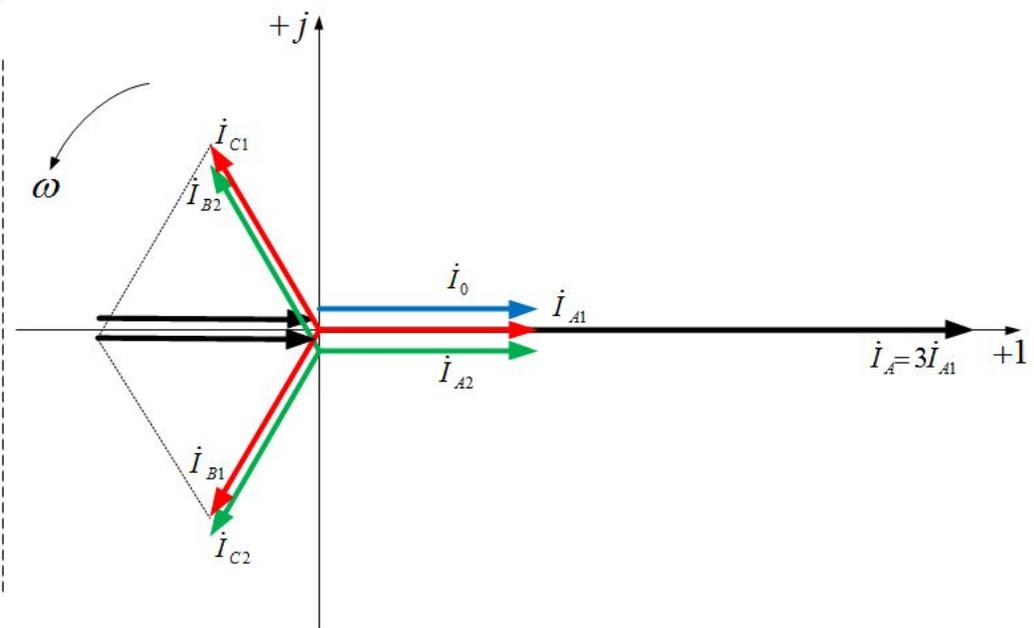
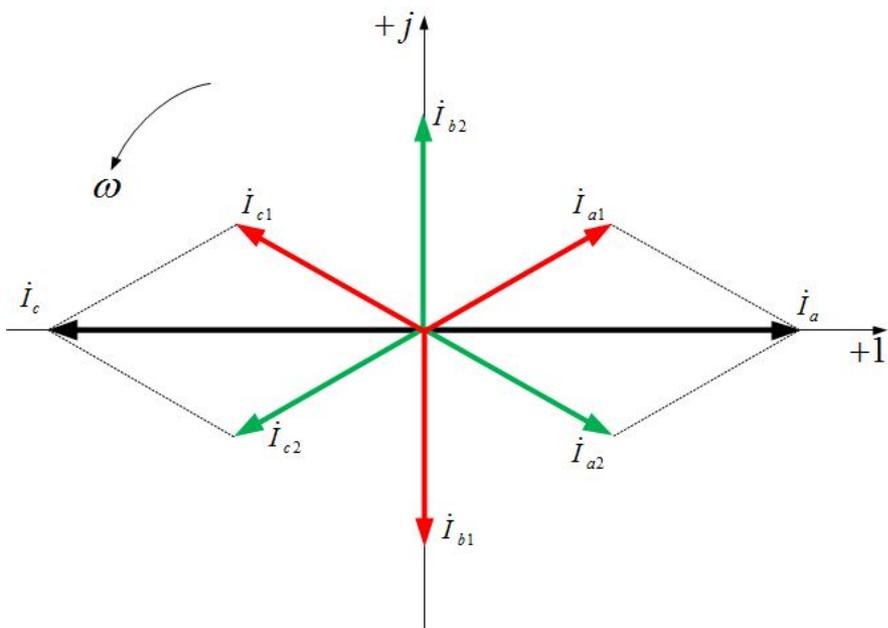
Однофазное короткое замыкание



$$I_b = I_c = 0$$

$$U_a = 0$$

$$|U_b| = |U_c| = U_k$$



# Однофазное замыкание на землю

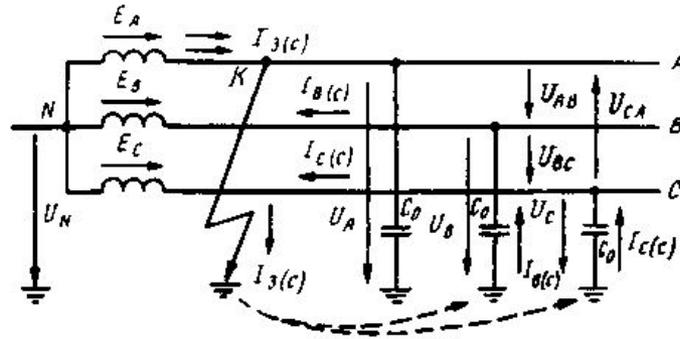


Рис. 9.1. Протекание фазных токов при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью

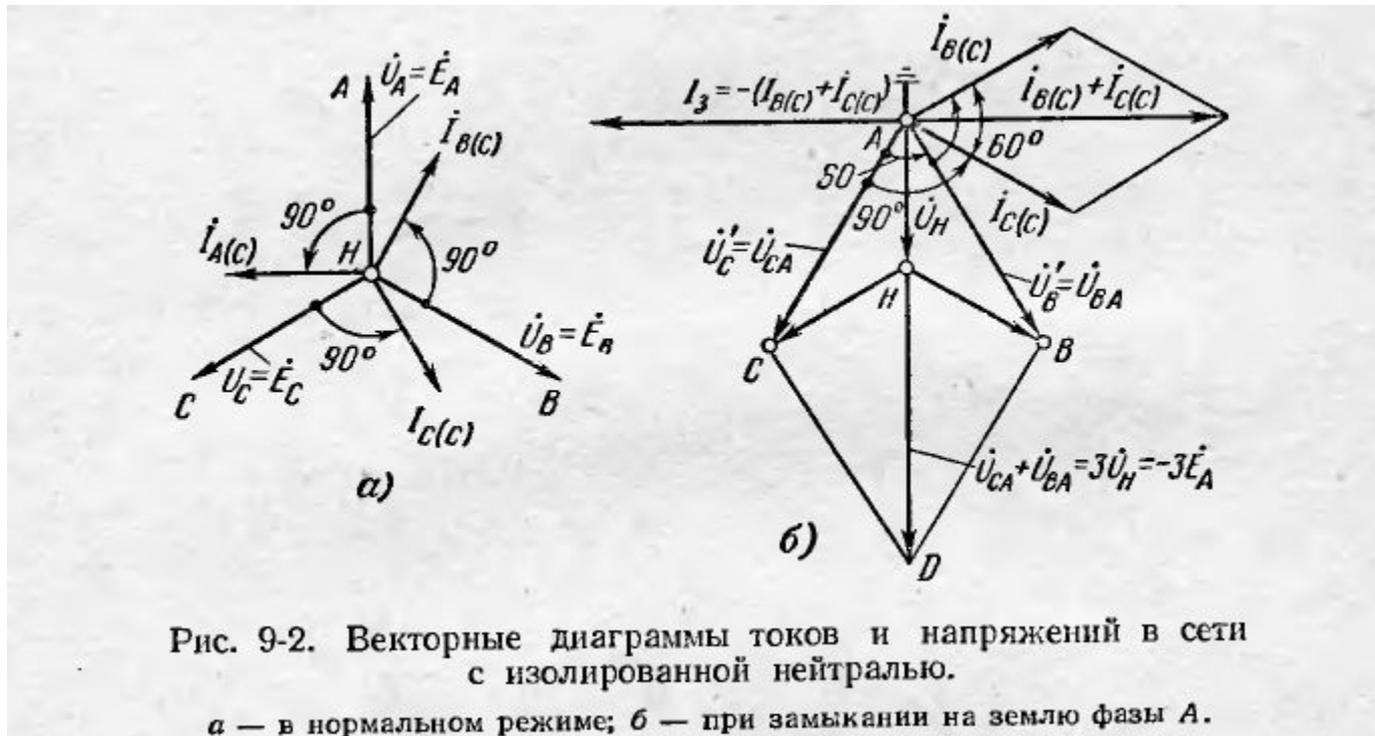


Рис. 9-2. Векторные диаграммы токов и напряжений в сети с изолированной нейтралью.

а — в нормальном режиме; б — при замыкании на землю фазы А.