



# Переходные процессы в системах электроснабжения

## ЛЕКЦИЯ № 5

**Преподаватель: Никитин Дмитрий Сергеевич**  
**к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ**  
**248 ауд. 8 корп., вн. тел. 1978**



## Схемы замещения

---

Первым этапом расчета любого несимметричного режима методом симметричных составляющих является составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

**Схема прямой последовательности** составляется так же, как для расчета симметричного режима (например, трехфазного КЗ).

**Схема обратной последовательности** по конфигурации совпадает со схемой прямой последовательности с той лишь разницей, что все ЭДС в ней отсутствуют. Сопротивления прямой последовательности электрических машин заменяются сопротивлениями обратной последовательности. Началом схемы прямой или обратной последовательности считается точка, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности. Концом схемы прямой или обратной последовательности считается точка, где возникла рассматриваемая несимметрия, т. е. точка короткого замыкания.



## Схема замещения

---

**Схема нулевой последовательности** существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей, так как путь ее токов отличается от пути, по которому циркулируют токи прямой и обратной последовательностей. Ее конфигурация определяется в основном положением расчетной точки КЗ и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов исходной расчетной схемы.



## Схема замещения

---

Чтобы составить схему замещения нулевой последовательности:

- 1) следует допустить, что в точке несимметричного КЗ все фазы соединены между собой накоротко и между этой точкой и землей приложено напряжение нулевой последовательности
- 2) идя от точки КЗ поочередно в разные стороны, необходимо на каждой ступени напряжения исходной расчетной схемы выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности (циркуляция этих токов возможна только в тех ветвях, которые образуют контуры для замыкания токов через землю и параллельные ей цепи)
- 3) соответственно определить элементы этой схемы, которые должны быть введены в схему замещения

Сопротивления нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду с незаземленной нейтралью, бесконечно велико, поэтому такие трансформаторы с указанными схемами соединения и все находящиеся за ними элементы исходной расчетной схемы

**в схему замещения нулевой последовательности не входят!**

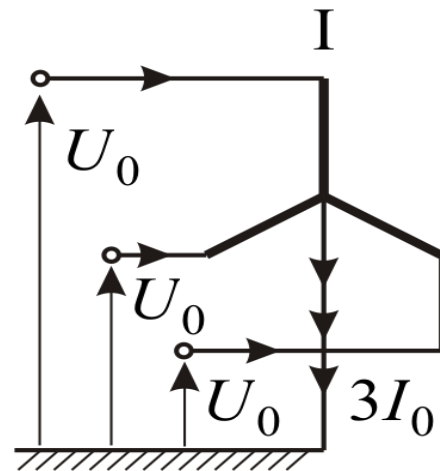
## Схема замещения

Циркуляция токов нулевой последовательности возможна только в том случае, если обмотка трансформатора, обращенная в сторону расчетной точки КЗ, соединена в звезду с заземленной нейтралью.

Если в нейтраль включено специальное сопротивление  $x_N$ , то по нему протекает ток  $3I_0$ , что учитывается включением в схему нулевой последовательности сопротивления  $3x_N$ .

В схемах прямой и обратной последовательности это сопротивление не учитывается, т.к. токи  $I_1$  и  $I_2$  через нейтраль не протекают.

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом – точку, где возникла несимметрия.





## Однократная поперечная несимметрия

---

К **поперечной нисимметрии** относятся три основных вида несимметричных КЗ: двухфазное, однофазное и двухфазное на землю. Токи и напряжения в месте КЗ определяются с учетом **граничных условий** в этом месте.

**Граничные условия при несимметрии** – это характерные соотношения для токов и напряжений в месте повреждения при данном виде несимметрии в электроустановке. При их записи принимается, что фаза А находится в условиях, отличных от условий для фаз В и С, т. е. является особой фазой. Выражения для токов получены при условии, что короткие замыкания – металлические.



## Расчет несимметричных КЗ

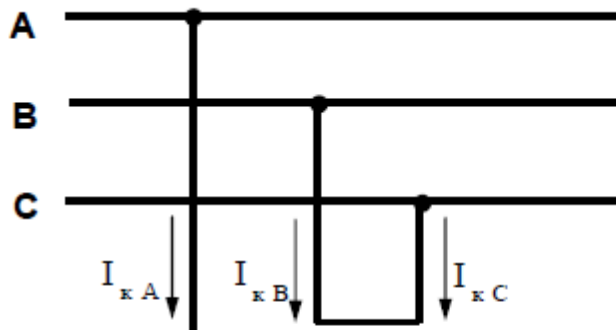
---

Для нахождения токов и напряжений по месту несимметричного короткого замыкания необходимо совместно решить три уравнения системы (1) и три уравнения граничных условий (*приведены далее*).

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{K1} &= \mathbf{E}_{\Sigma} - \mathbf{I}_{K1} j x_{1\Sigma}, \\ \mathbf{U}_{K2} &= 0 - \mathbf{I}_{K2} j x_{2\Sigma}, \\ \mathbf{U}_{K0} &= 0 - \mathbf{I}_{K0} j x_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\} (1)$$

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*.

## Двухфазное КЗ



Граничные условия:

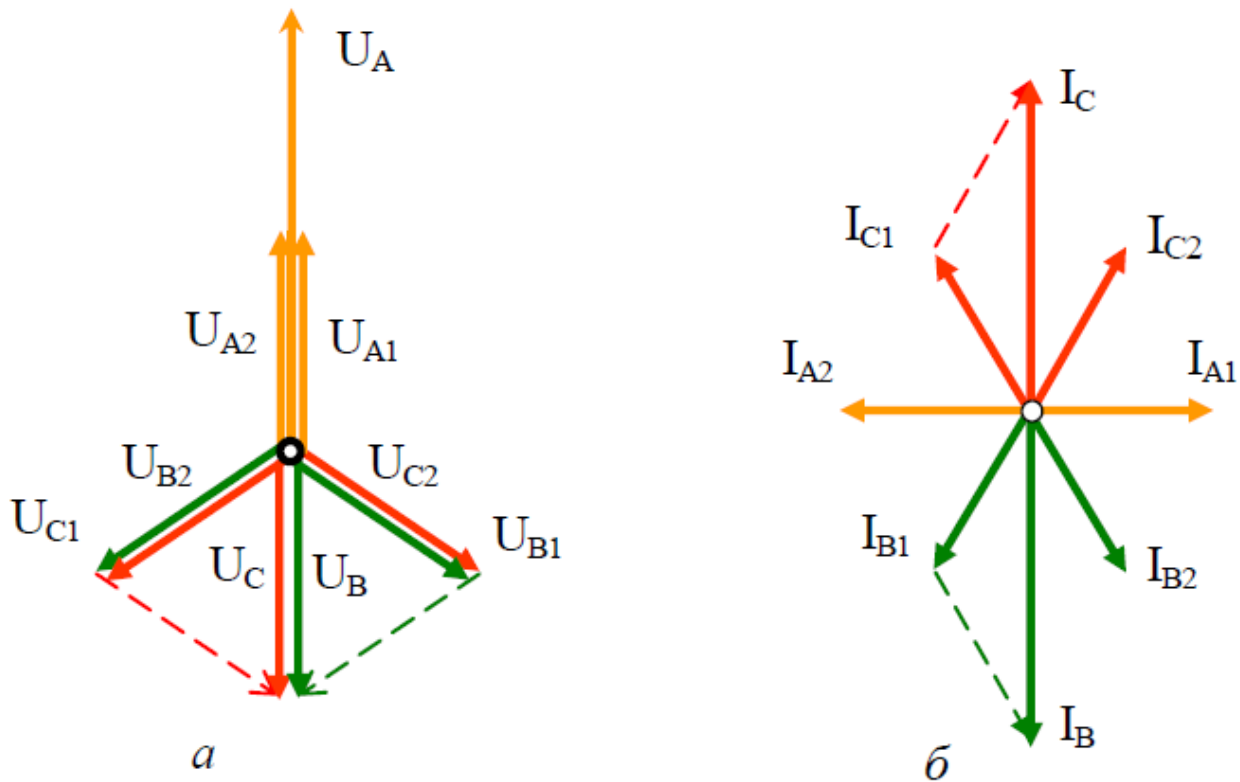
$$\begin{aligned} I_{KA}^{(2)} &= 0; & U_{KB}^{(2)} &= U_{KC}^{(2)} \text{ или} \\ I_{KB}^{(2)} &= -I_{KC}^{(2)}; & (U_{KB}^{(2)} - U_{KC}^{(2)} &= 0). \end{aligned}$$

**Двухфазное короткое замыкание** – короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

$$\begin{aligned} I_{KA1}^{(2)} &= \frac{E_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} & I_{KB}^{(2)} &= j\sqrt{3}I_{KA1}^{(2)} & U_{KA1}^{(2)} &= U_{KA2}^{(2)} = jx_{2\Sigma}I_{KA1}^{(2)} & U_{KA}^{(2)} &= 2I_{KA1}^{(2)}jx_{2\Sigma} \\ I_{KC}^{(2)} &= -j\sqrt{3}I_{KA1}^{(2)}. & & & & & U_{KB}^{(2)} &= U_{KC}^{(2)} = -\frac{U_{KA}^{(2)}}{2} \end{aligned}$$

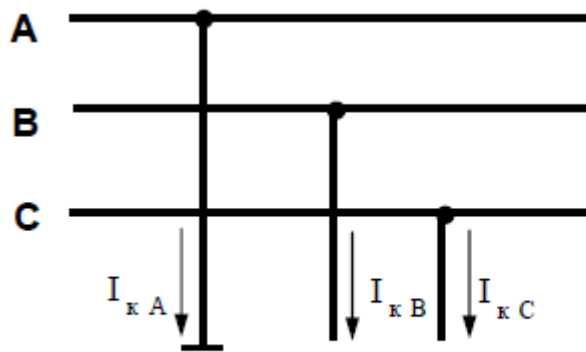


## Двухфазное КЗ



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

## Однофазное КЗ



Граничные условия:

$$\mathbf{I}_{KB}^{(1)} = 0 ; \quad \mathbf{I}_{KA1}^{(1)} = \mathbf{I}_{KA2}^{(1)} = \mathbf{I}_{KA0}^{(1)} = \frac{1}{3} \mathbf{I}_{KA}^{(1)}$$

$$\mathbf{I}_{KC}^{(1)} = 0 ; \quad \mathbf{I}_{KA}^{(1)} = 3\mathbf{I}_{KA1}^{(1)}$$

$$\mathbf{U}_{KA}^{(1)} = 0 ; \quad \mathbf{U}_{KA}^{(1)} = \mathbf{U}_{KA1}^{(1)} + \mathbf{U}_{KA2}^{(1)} + \mathbf{U}_{KA0}^{(1)} = 0$$

$$\mathbf{I}_3 = 3\mathbf{I}_{K0}^{(1)} = \mathbf{I}_{KA}^{(1)}$$

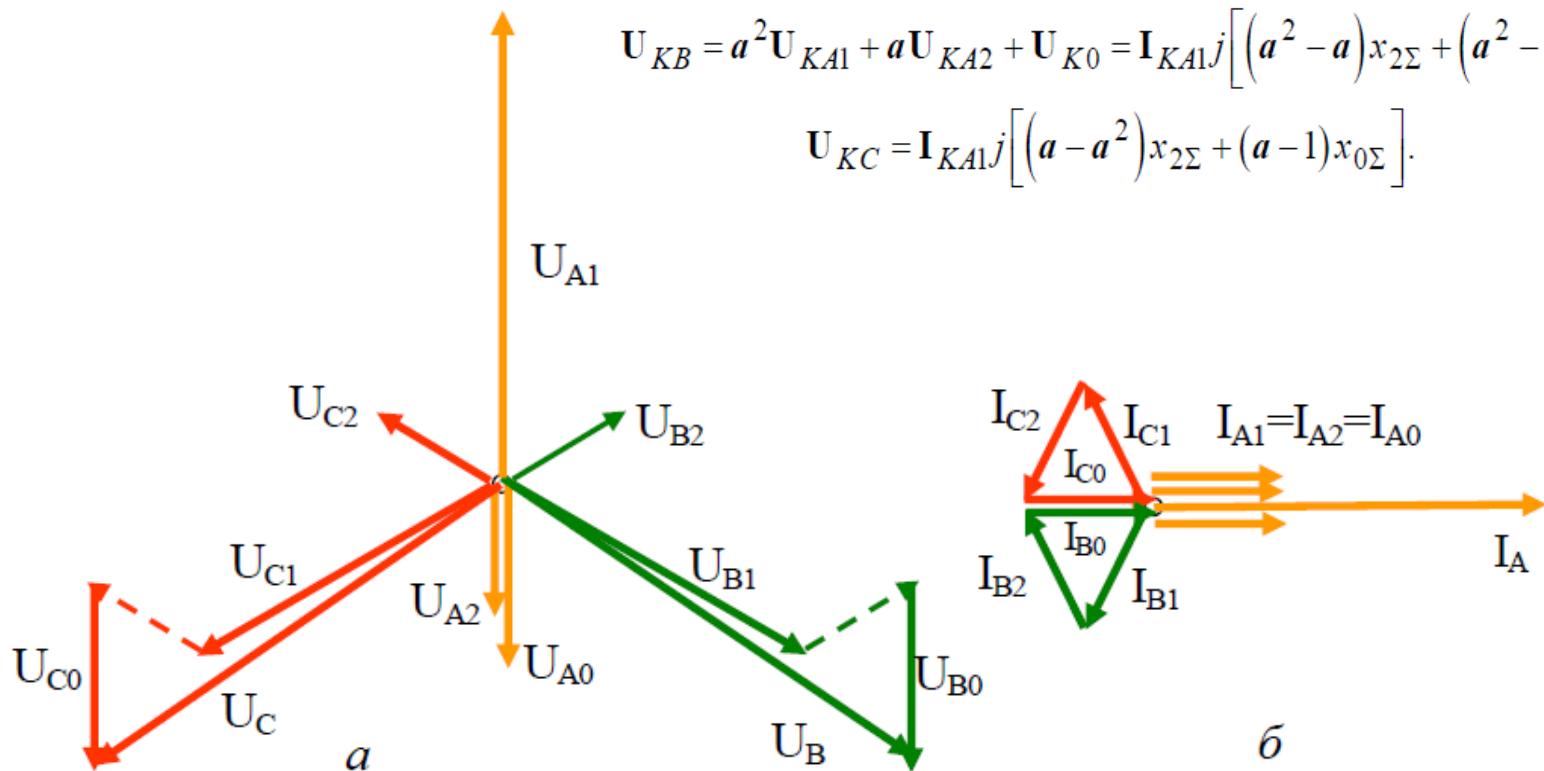
**Однофазное короткое замыкание** – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухозаземленной нейтралью, при котором с землей соединяется только одна фаза.

$$\mathbf{I}_{KA1}^{(1)} = \frac{\mathbf{E}_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} \quad \mathbf{U}_{KA1}^{(1)} = -j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})\mathbf{I}_{KA1}^{(1)} \quad \mathbf{U}_{KA2}^{(1)} = -jx_{2\Sigma}\mathbf{I}_{KA1}^{(1)}$$

$$\mathbf{U}_{KA0}^{(1)} = -jx_{0\Sigma}\mathbf{I}_{KA1}^{(1)}$$

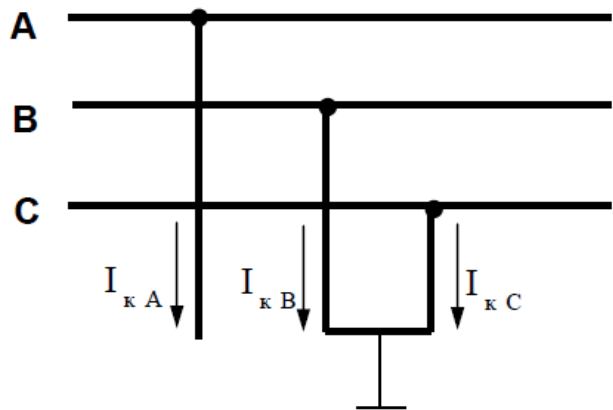
## Однофазное КЗ

$$\left. \begin{aligned} U_{KB} &= a^2 U_{KA1} + a U_{KA2} + U_{K0} = I_{KA1} j \left[ (a^2 - a) x_{2\Sigma} + (a^2 - 1) x_{0\Sigma} \right]; \\ U_{KC} &= I_{KA1} j \left[ (a - a^2) x_{2\Sigma} + (a - 1) x_{0\Sigma} \right]. \end{aligned} \right\}$$



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

## Двухфазное КЗ на землю



Граничные условия:

$$\mathbf{I}_{KA}^{(1,1)} = 0 ; \quad \mathbf{I}_{KA}^{(1,1)} = \mathbf{I}_{KA1}^{(1,1)} + \mathbf{I}_{KA2}^{(1,1)} + \mathbf{I}_{KA0}^{(1,1)} = 0$$

$$\mathbf{U}_{KB}^{(1,1)} = 0 ; \quad \mathbf{U}_{KA1}^{(1,1)} = \mathbf{U}_{KA2}^{(1,1)} = \mathbf{U}_{KA0}^{(1,1)} = \frac{1}{3} \mathbf{U}_{KA}^{(1,1)}$$

$$\mathbf{U}_{KC}^{(1,1)} = 0.$$

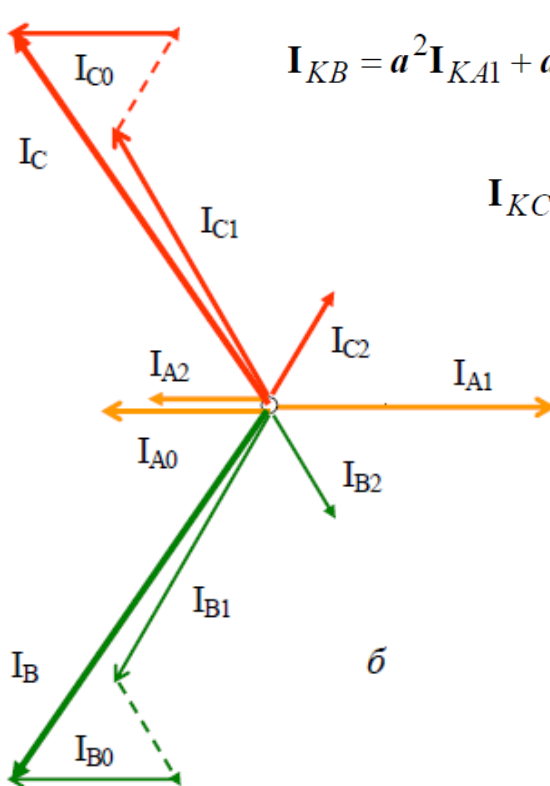
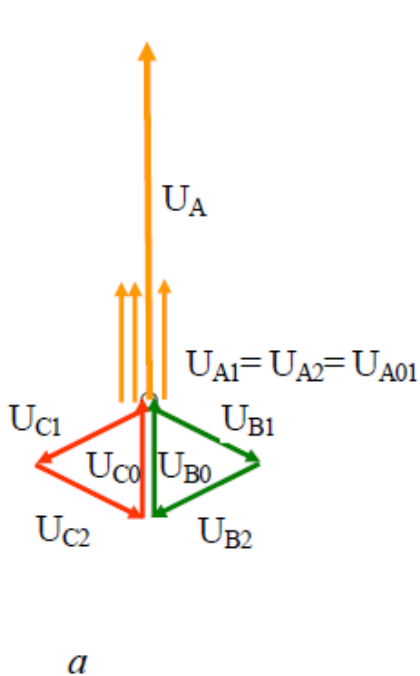
**Двухфазное короткое замыкание на землю** – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо- или эффективно заземленными нейтралью силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы.

$$\mathbf{I}_{KA0}^{(1,1)} = -\mathbf{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{x_{2\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} \quad \mathbf{I}_{KA2}^{(1,1)} = -\mathbf{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}$$

$$\mathbf{U}_{KA1}^{(1,1)} = j(x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}) \mathbf{I}_{KA1}^{(1,1)}$$

$$\mathbf{I}_{KA1}^{(1,1)} = \frac{\mathbf{E}_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma})}$$

## Двухфазное КЗ на землю



$$I_{KB} = a^2 I_{KA1} + a I_{KA2} + I_{K0} = I_{KA1} \left( a^2 - \frac{x_{2\Sigma} + a x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right);$$

$$I_{KC} = I_{KA1} \left( a - \frac{x_{2\Sigma} + a^2 x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right).$$

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

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



## Общий расчет токов КЗ

Анализ расчетных выражений для несимметричных КЗ позволяет получить обобщенные расчетные выражения справедливые для любых видов короткого замыкания.

Согласно этому правилу, **ток прямой последовательности** особой фазы **A** при любом несимметричном коротком замыкании **n** рассчитывается по выражению:

$$I_{K1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{\left( Z_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)} \right)},$$

где  $Z_{\Delta}^{(2)} = Z_{2\Sigma}$ ;  $Z_{\Delta}^{(1)} = Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}$ ;  $Z_{\Delta}^{(1,1)} = Z_{2\Sigma} // Z_{0\Sigma}$ ;  
 $E_{\Sigma}$ ,  $Z_{1\Sigma}$  – соответственно результирующие ЭДС и сопротивление  
схемы прямой последовательности;  
 $Z_{\Delta}^{(n)}$  – дополнительное сопротивление, которое характеризуют вид КЗ;  
примечание: в расчетах КЗ принимают  $Z_{2\Sigma} = Z_{1\Sigma}$ ;



## Двухфазное КЗ

модули токов в месте КЗ рассчитываются по выражениям:

$$I_K^{(1)} = 3I_{K1}^{(1)};$$

$$I_K^{(2)} = \sqrt{3}I_{K1}^{(2)};$$

$$I_K^{(1,1)} = \left( \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{Z_{2\Sigma} \cdot Z_{0\Sigma}}{(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})^2}} \right) I_{K1}^{(1,1)};$$

симметричные составляющие напряжения в месте КЗ  
рассчитываются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} U_{K1}^{(n)} &= I_{K1}^{(n)} Z_{\Lambda}^{(n)}, \\ U_{K2}^{(n)} &= -I_{K2}^{(n)} Z_{2\Sigma}, \\ U_{K0}^{(n)} &= -I_{K0}^{(n)} Z_{0\Sigma}. \end{aligned} \right\}$$



## Общий расчет токов КЗ

### *Соотношения для токов и напряжений при $K^{(2)}$*

$$\begin{aligned}U_{K0} &= 0, & \mathbf{I}_{K0} &= 0; & U_{Ka1} &= U_{Ka2}; \\ \mathbf{I}_{Ka1} &= -\mathbf{I}_{Ka2}; & U_{KA} &= 2\mathbf{I}_{Ka1}Z_{2\Sigma}; \\ \mathbf{I}_{KA} &= \sqrt{3}\mathbf{I}_{Ka1} & U_{KB} &= U_{KC} = -0,5U_{KA};\end{aligned}$$

### *Соотношения для токов и напряжений при $K^{(1)}$*

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_{Ka1} &= \mathbf{I}_{Ka2} = \mathbf{I}_{K0}; & U_{Ka1} &= \mathbf{I}_{Ka1}j(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}); \\ \mathbf{I}_{KA} &= 3\mathbf{I}_{Ka1}; & U_{K2} &= -\mathbf{I}_{Ka1}Z_{2\Sigma}; \\ & & U_{K0} &= -\mathbf{I}_{Ka1}Z_{0\Sigma};\end{aligned}$$





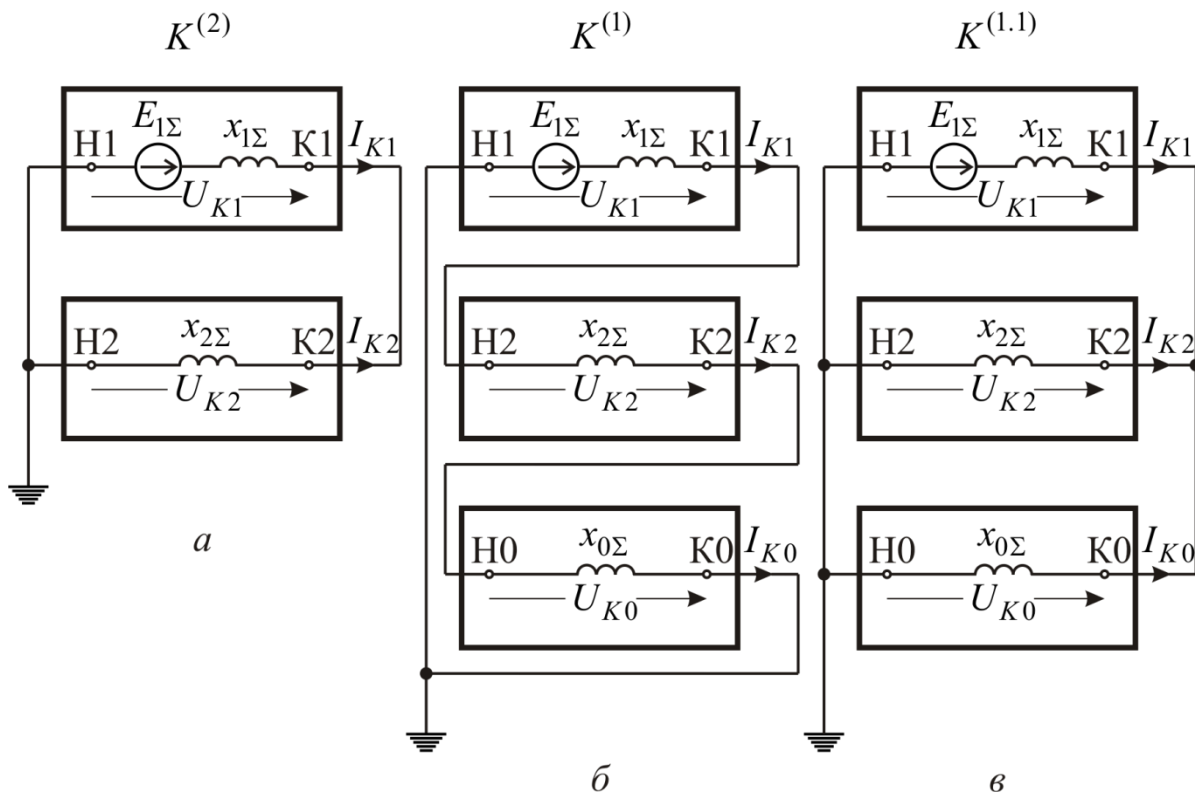
## Комплексная схема замещения

---

**Комплексная схема замещения** – электрическая схема, в которой схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей соединены сверхпроводниками через клеммы начала и конца в единую схему на основании соотношений между симметричными составляющими токов и напряжений в месте повреждения.



## Комплексная схема замещения





## Эпюры симметричных составляющих

