

Переходные процессы в электроэнергетических системах

**Доцент кафедры ЭСС ЭНИН
Юшков Анатолий Юрьевич**



Однократная поперечная несимметрия

Однократная поперечная несимметрия

- Выбор граничных условий

- Уравнения граничных условий:

$$U_{K1} = E_{\Sigma} - I_{K1} jx_{1\Sigma} \quad (1)$$

$$U_{K2} = 0 - I_{K2} jx_{2\Sigma} \quad (2)$$

$$U_{K0} = 0 - I_{K0} jx_{0\Sigma} \quad (3)$$

Двухфазное короткое замыкание – $K^{(2)}$

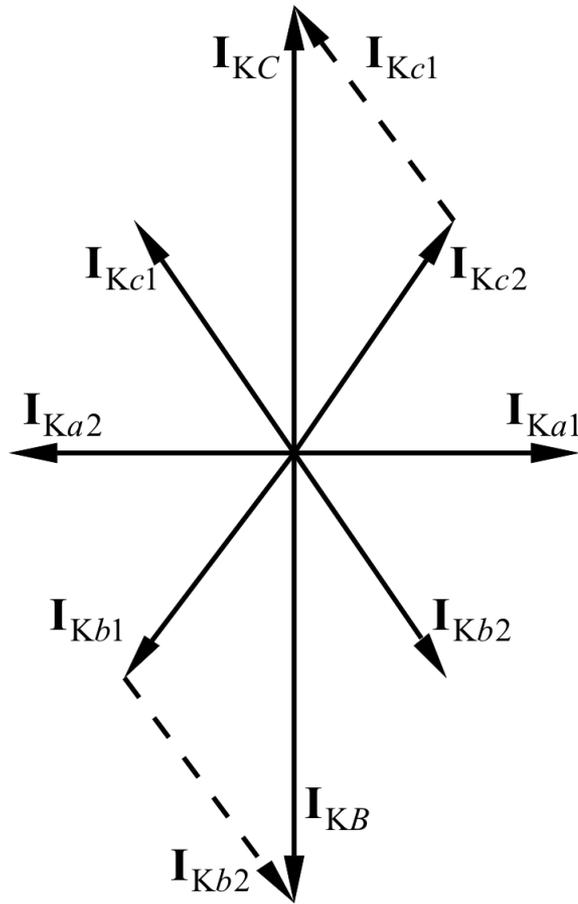
- При коротком замыкании между фазами B и C имеем граничные условия:

$$\mathbf{I}_{KA}^2 = 0 \quad (4)$$

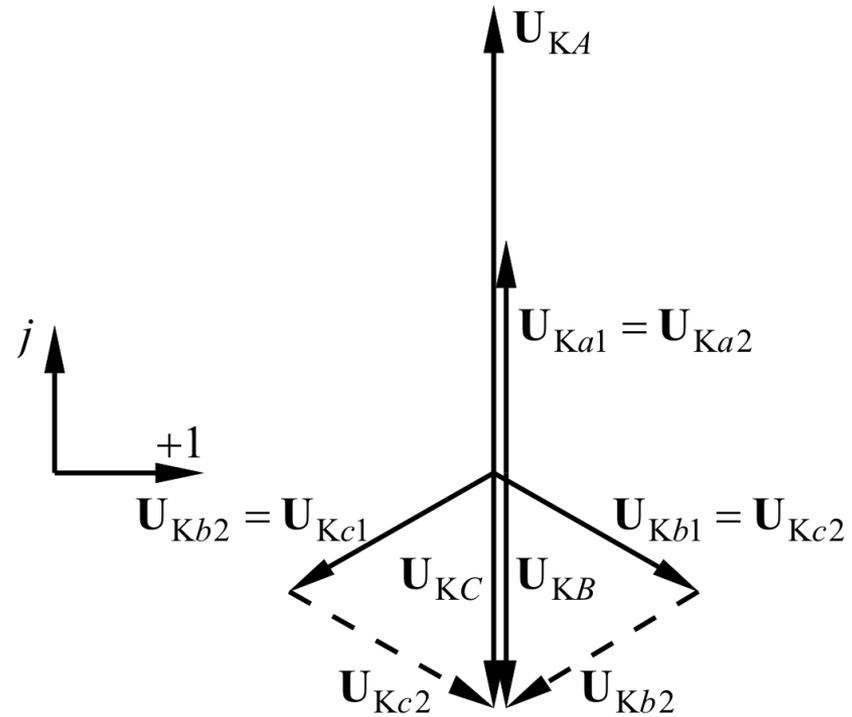
$$\mathbf{I}_{KB}^2 = -\mathbf{I}_{KC}^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_{KB}^2 - \mathbf{U}_{KC}^2 = 0 \quad (6)$$

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



a



б

Однофазное короткое замыкание – $K^{(1)}$

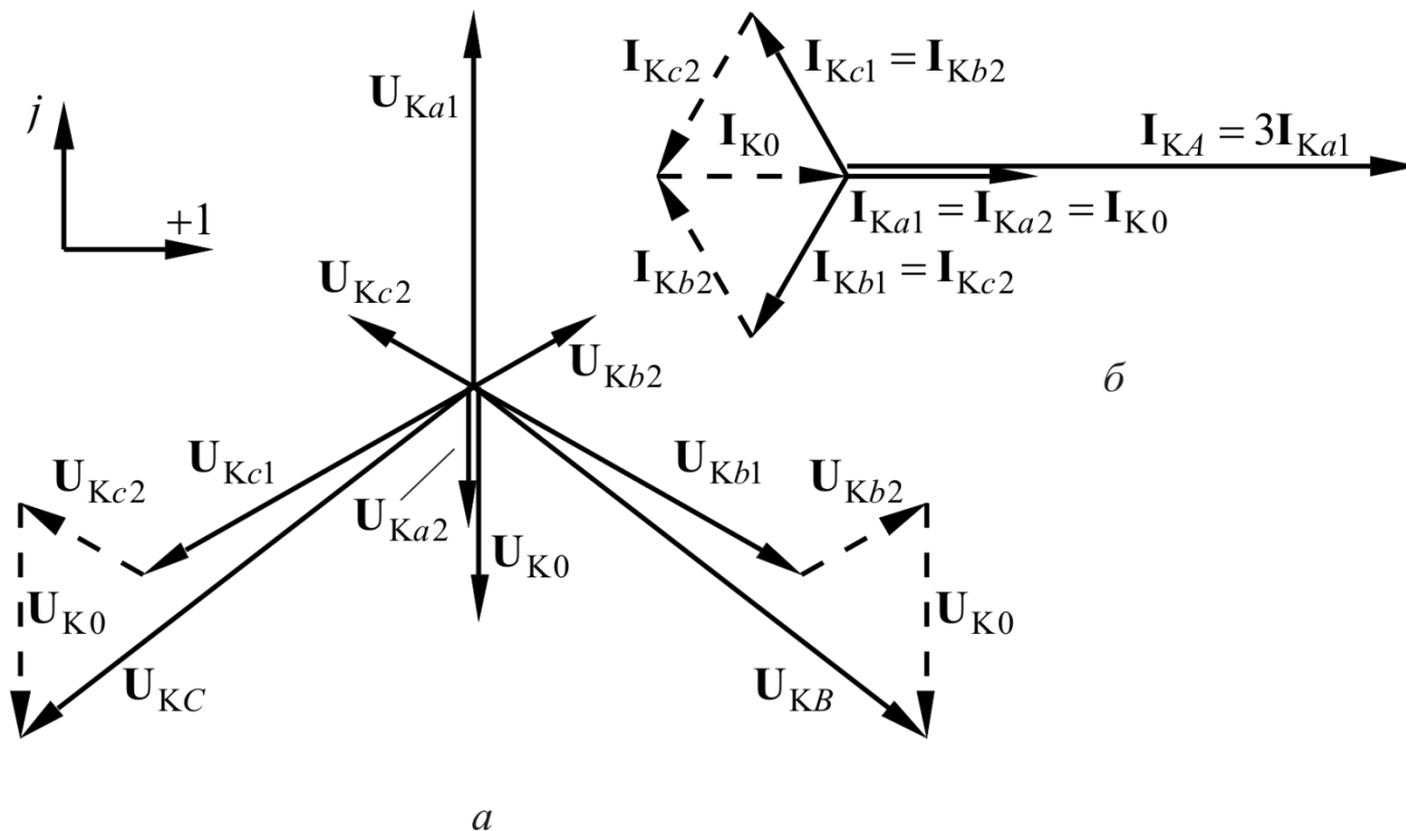
- Граничные условия при замыкании фазы A на землю имеют вид:

$$\mathbf{U}_{KA}^1 = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_{KB}^1 = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_{KC}^1 = 0 \quad (6)$$

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



Двухфазное короткое замыкание на землю – $K^{(1)}$

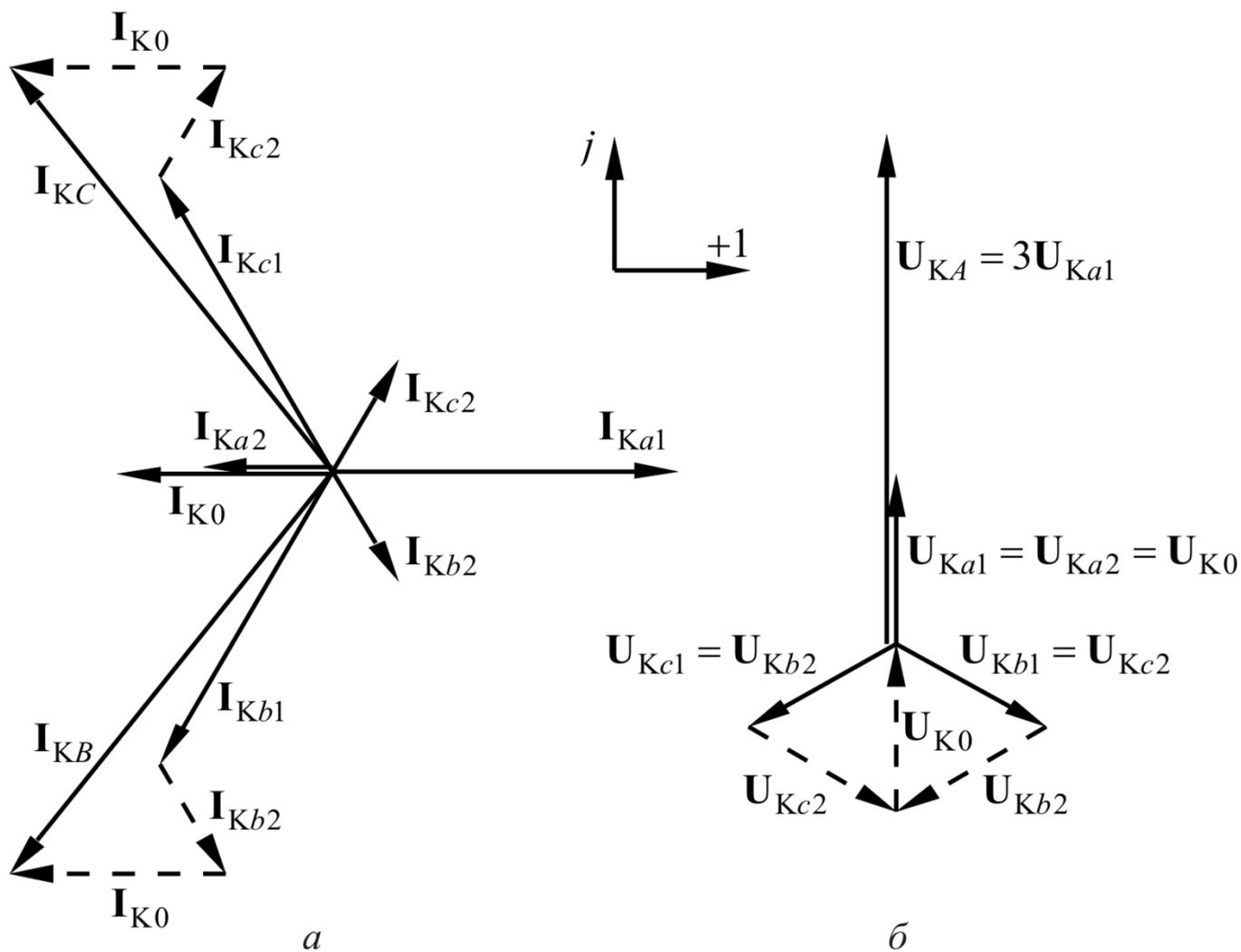
- Граничные условия при одновременном замыкании фаз B и C на землю в одной точке имеют вид:

$$\mathbf{I}_{KA}^{1.1} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_{KB}^{1.1} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{U}_{KC}^{1.1} = 0 \quad (4)$$

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



Правило эквивалентности токов нулевой последовательности

- Универсальная формула для расчета тока прямой последовательности при любом виде несимметричного КЗ

$$\mathbf{I}_{K1}^n = \frac{\mathbf{E}_\Sigma}{j x_{1\Sigma} + x_\Delta^n}$$

$$x_\Delta^2 = x_{2\Sigma}$$

$$x_\Delta^1 = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$$

$$x_\Delta^{1.1} = x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma}$$

- В свою очередь, модуль тока в месте КЗ можно вычислить по выражению

$$\mathbf{I}_{\text{К}}^n = m^n \mathbf{I}_{\text{К1}}^n$$

$$m^2 = \sqrt{3} \quad m^1 = 3 \quad m^{1.1} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}}$$

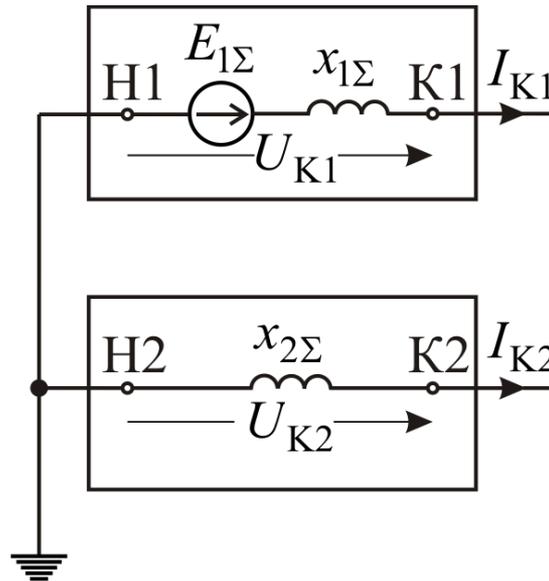
- Расчетные выражения симметричных составляющих напряжений:

$$\mathbf{U}_{\text{К1}}^n = \mathbf{I}_{\text{К1}}^n jx_{\Delta}^n \quad \mathbf{U}_{\text{К2}}^n = -\mathbf{I}_{\text{К2}}^n jx_{2\Sigma} \quad \mathbf{U}_{\text{К0}}^n = -\mathbf{I}_{\text{К0}}^n jx_{0\Sigma}$$

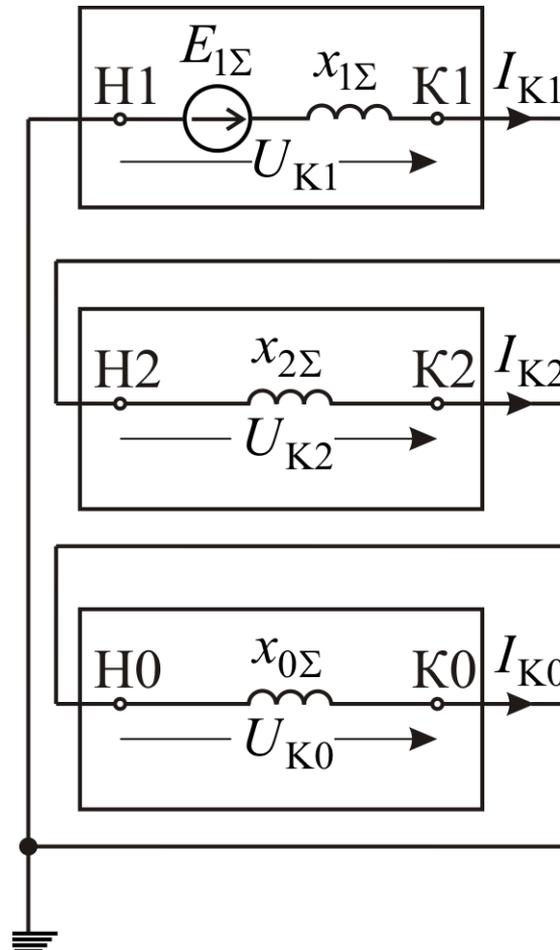
Комплексные схемы замещения

- Соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений в месте КЗ позволяют для каждого вида несимметрии соединить между собой схемы отдельных последовательностей и образовать комплексную схему замещения.
- Соединение осуществляется сверхпроводниками.
- Способ соединения зависит от вида КЗ.

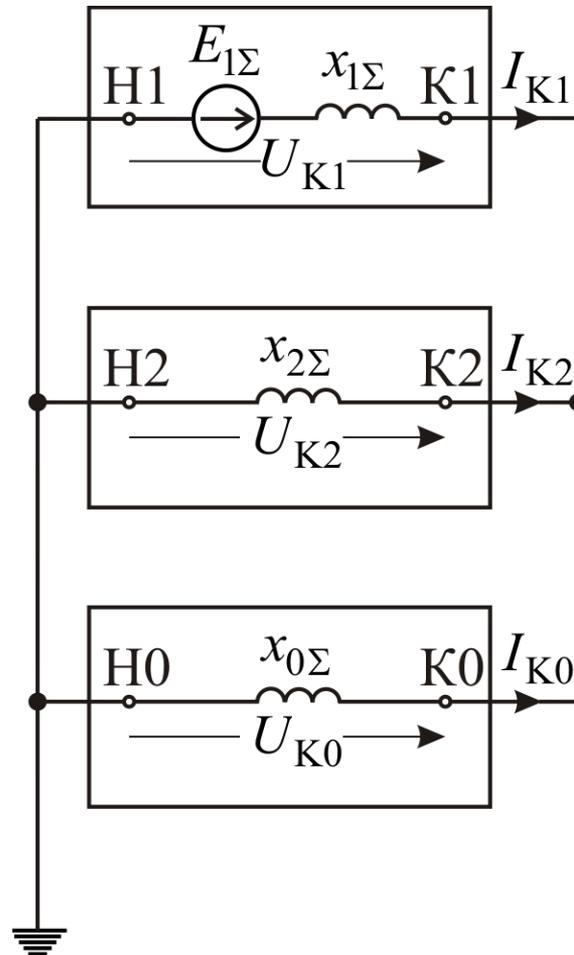
- **Комплексная схема замещения при несимметричном двухфазном КЗ**
- (Н – начало схемы, К – конец схемы)



■ Комплексная схема замещения при несимметричном однофазном КЗ



■ Комплексная схема замещения при несимметричном двухфазном КЗ на землю



Распределение симметричных составляющих токов и напряжений

- 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.

- 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.

$$\mathbf{I}_{M1} = c_{M1} \mathbf{I}_{K1}$$

$$\mathbf{I}_{M2} = c_{M2} \mathbf{I}_{K2}$$

$$\mathbf{I}_{M0} = c_{M0} \mathbf{I}_{K0}$$

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

$$U_{M1} = U_{K1} + \sum I_{1j} x_{1j},$$

$$U_{M2} = U_{K2} + \sum I_{2j} x_{2j},$$

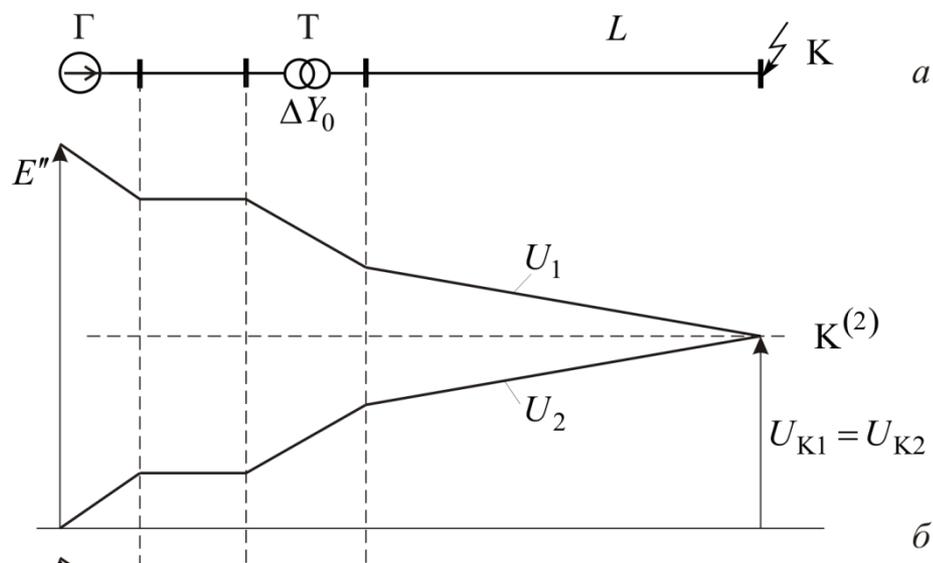
$$U_{M0} = U_{K0} + \sum I_{0j} x_{0j}.$$

- 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 комплексными коэффициентами трансформации:

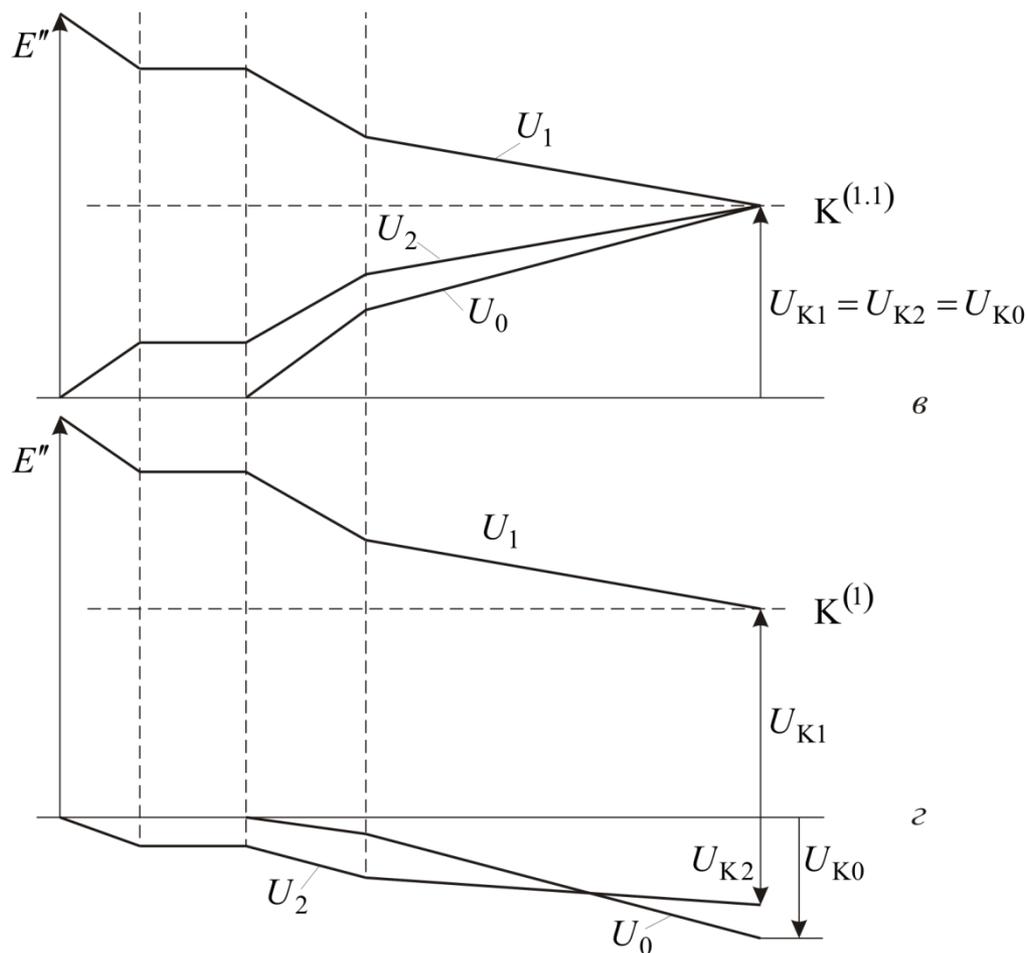
прямой последовательности $\mathbf{k}_{U_1} = ke^{j30^\circ N}$, $\mathbf{k}_{I_1} = \mathbf{K}_{U_1} = ke^{-j30^\circ N}$,

обратной последовательности $\mathbf{k}_{U_2} = \mathbf{K}_{U_1} = ke^{-j30^\circ N}$, $\mathbf{k}_{I_2} = ke^{j30^\circ N}$,

- Принципиальная схема (а) и эпюры напряжений отдельных последовательностей при двухфазном КЗ (б)



- Эпюры напряжений отдельных последовательностей при двухфазном КЗ на землю (в) и однофазном КЗ (г)





Алгоритм расчета несимметричных коротких замыканий