

Лекция 3

Краткое содержание

Глава 4. Трехфазные цепи синусоидального тока

4.8. Метод симметричных составляющих.

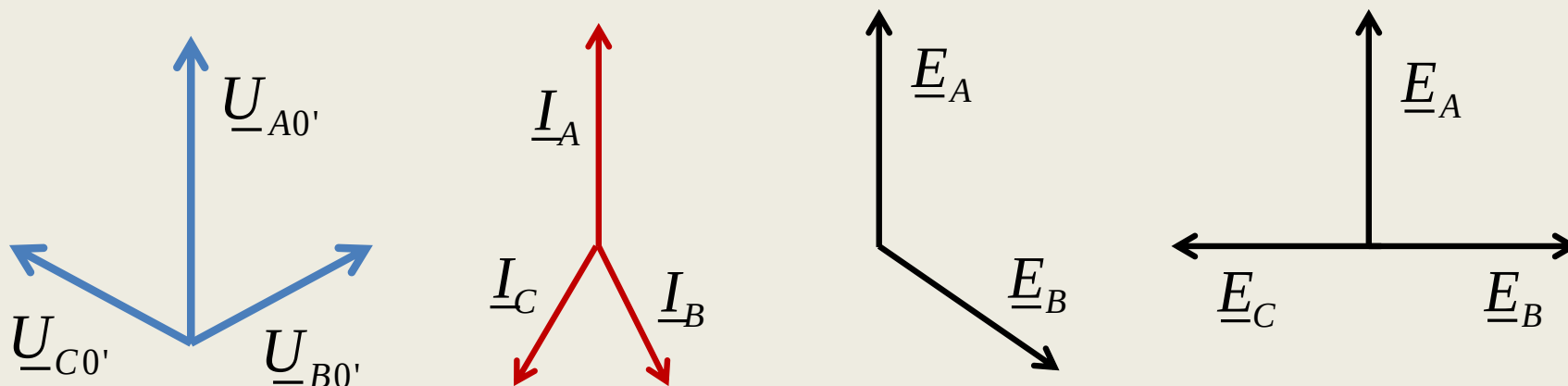
Представление несимметричной тройки ЭДС, напряжений и токов симметричными составляющими

4.9. Сопротивление на фазу для разных последовательностей

4.10. Расчет поперечной несимметрии

4.8. Метод симметричных составляющих. Представление несимметричной тройки ЭДС, напряжений и токов симметричными составляющими

Действующая в трехфазной цепи система ЭДС (возникающая система токов и напряжений) может быть несимметрична. Для расчета и характеристики несимметричных напряжений и токов используют *метод симметричных составляющих*.



Представление несимметричной тройки ЭДС, напряжений и токов симметричными составляющими

Несимметричная система любых трех синусоидальных напряжений (токов, зарядов, магнитных потоков) может раскладываться на три симметричные системы (прямой, обратной и нулевой последовательностей). Так как синусоидальные величины (токи, напряжения, ЭДС) на комплексной плоскости представляются комплексами (векторами), то несимметричная система трех векторов на комплексной плоскости может быть представлена суммой трех симметричных систем векторов. Фазные напряжения трехфазной системы могут быть представлены выражением (*разложение Фортескью*):

$$\underline{U}_A = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 & a^2 \underline{U}_1 & a \underline{U}_1 \end{bmatrix}^T$$

прямая

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 & a \underline{U}_2 & a^2 \underline{U}_2 \end{bmatrix}^T$$

обратная

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 & \underline{U}_0 & \underline{U}_0 \end{bmatrix}^T$$

нулевая

Представление симметричными составляющими

Для любых трёх векторов $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ можно определить соответствующие разложению Фортескью симметричные составляющие:

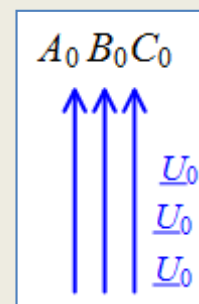
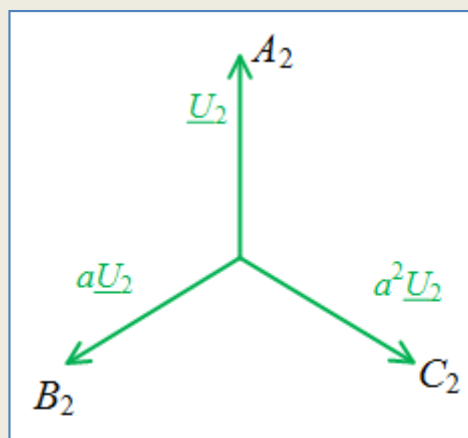
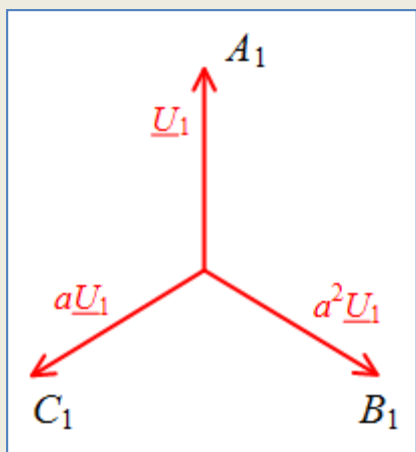
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}}_S \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix}$$



$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)$$



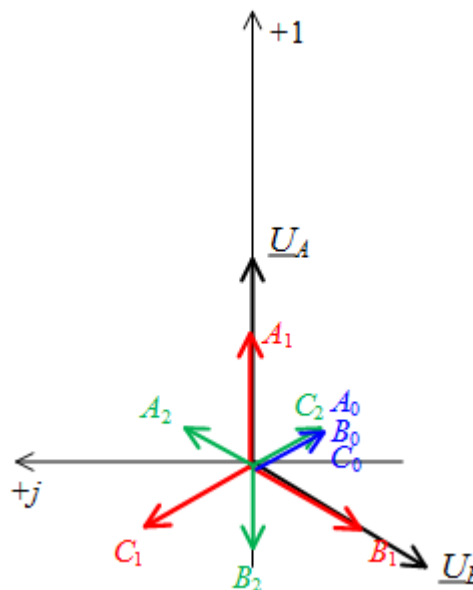
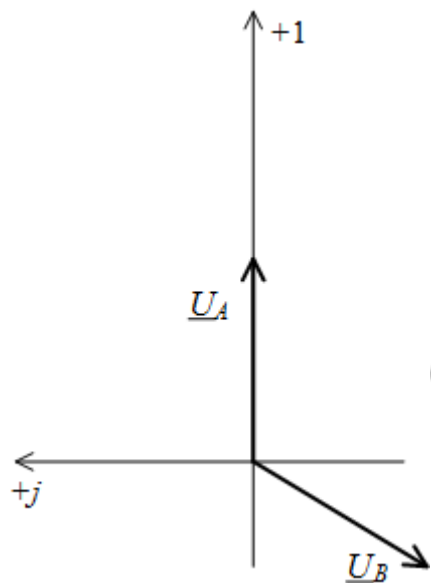
Пример разложения на симметричные составляющие

В результате аварии фазные напряжения трехфазного генератора

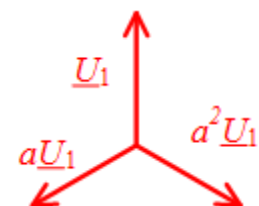
$\underline{U}_A = 210 \angle 0^\circ \text{ В}$ $\underline{U}_B = 210 \angle -120^\circ \text{ В}$ $\underline{U}_C = 0$. Определить симметричные составляющие фазных напряжений.

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \boxed{a\underline{U}_B} + a^2\underline{U}_C) \quad \underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \boxed{a^2\underline{U}_B} + a\underline{U}_C) \quad \underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \boxed{\underline{U}_B} + \underline{U}_C)$$

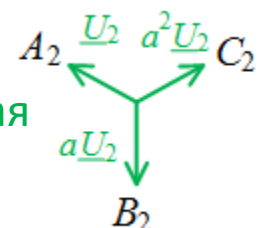
решение с помощью векторных диаграмм



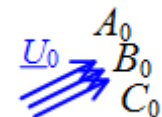
прямая



обратная



нулевая



Пример разложения на симметричные составляющие

В результате аварии фазные напряжения трехфазного генератора
 $\underline{U}_A = 210 \angle 0^\circ \text{ В}$ $\underline{U}_B = 210 \angle -120^\circ \text{ В}$ $\underline{U}_C = 0$. Определить симметричные составляющие фазных напряжений.

численный расчет

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(210 + 1 \angle 120^\circ \cdot 210 \angle -120^\circ + 0) = 140 \text{ В} \quad \text{прямая}$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(210 + 1 \angle -120^\circ \cdot 210 \angle -120^\circ + 0) = 35 + j60,62 = 70 \angle 60^\circ \text{ В} \quad \text{обратная}$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(210 + 210 \angle -120^\circ + 0) = 35 - j60,62 = 70 \angle -60^\circ \text{ В} \quad \text{нулевая}$$

проверка расчета

$$\underline{U}_A = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 140 + 70 \angle 60^\circ + 70 \angle -60^\circ = 210 \text{ В}$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 140 \angle -120^\circ + 70 \angle 180^\circ + 70 \angle -60^\circ = 210 \angle -120^\circ \text{ В}$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 140 \angle 120^\circ + 70 \angle -60^\circ + 70 \angle -60^\circ = 0$$

Метод симметричных составляющих

Расчет аварийных режимов в трехфазных цепях проводят **методом симметричных составляющих (МСС)**.

Аварийные режимы возникают при различного рода коротких замыканиях (на землю или между фаз) и обрывов фазных и линейных проводов. Различают **поперечную** и **продольную несимметрию**. Расчет аварийных режимов при динамической нагрузке основан на разложении возникающей в месте аварии несимметричной тройки напряжений и токов на составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности. Составляются эквивалентные **однофазные расчетные схемы** прямой, обратной и нулевой последовательности с использованием комплексных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности. Дополнительно составляются уравнения, определяющие **конкретный вид аварии**.

Метод симметричных составляющих

Использование метода симметричных составляющих позволяет **рассчитать токи и напряжения аварийного режима**.

Мгновенная мощность трехфазной системы в аварийном режиме не является постоянной, содержит переменную составляющую, а трехфазная цепь не является уравновешенной системой. Механический момент на валу в разные моменты времени неодинаков и электрохимические характеристики электрической машины не соответствуют номинальным.

Метод симметричных составляющих используют также для **характеристики несимметрии** напряжений (токов). Любая несимметричная нагрузка трехфазной системы приводит к тому, что токи и напряжения в ее элементах несимметричны. Типичным видом таких нагрузок является бытовая аппаратура, освещение и т.д. В промышленности несимметричными электроприемниками являются сварочное оборудование, индукционные печи, тяговые подстанции железнодорожного транспорта. До 85% суммарной нагрузки является причиной несимметрии.

Коэффициенты несимметрии

Несимметрия напряжений характеризуется **коэффициентом несимметрии напряжения** по обратной последовательности и по нулевой последовательности для основной частоты. Расчет проводится по формулам:

$$K_{2U} = \frac{U_2^{(1)}}{U_1^{(1)}} 100\% \quad K_{0U} = \frac{U_0^{(1)}}{U_1^{(1)}} 100\%$$

где $U_1^{(1)}$, $U_2^{(1)}$, $U_0^{(1)}$ - действующие значения напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности для основной частоты. При соединении обмотки фаз генераторов и фаз нагрузки "звездой" нейтральные точки соединяются нулевым проводом (четырёхпроводная система). Если нулевой провод не является идеальным (короткозамкнутым), то в несимметричном режиме напряжение нулевой последовательности $\underline{U}_0$ представляет собой напряжение смещения нейтрали, ток в нулевом проводе представляет собой ток нулевой последовательности $\underline{I}_0$. Обрыв нулевого провода приводит к перенапряжениям на фазах нагрузки и появлению напряжения смещения нейтрали (**напряжения прикосновения**).

4.9. Сопротивления на фазу для различных последовательностей

Если к симметричной трехфазной системе (например, к асинхронному двигателю) приложена система напряжений (токов) прямой, обратной или нулевой последовательности, то в фазных обмотках возникает система токов (напряжений) прямой, обратной и нулевой последовательностей. Отношение комплексных фазных напряжений к комплексным фазным токам называют **комплексными сопротивлениями прямой** $\underline{Z}_1$, **обратной** $\underline{Z}_2$ и **нулевой** $\underline{Z}_0$ последовательности. В таком случае проводят расчет трехфазных цепей **при динамической нагрузке**. При решении задач используют схемы замещения с параметрами динамической нагрузки для прямой, обратной и нулевой последовательности.

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей

Для **синхронных генераторов** сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей - разные. Нормальным режимом работы **двигателя** считается режим прямой последовательности, когда магнитное поле и ротор вращаются в одну и ту же сторону с номинальным скольжением. Если подвести к обмоткам статора двигателя систему обратной последовательности, то вращающееся магнитное поле относительно ротора будет иметь угловую скорость, почти в два раза превышающую скорость движения поля относительно статора и во много раз превышающую скорость поля относительно ротора при нормальном режиме работы. В результате резко возрастут токи, индуцированные в роторе, которые в большей степени будут ослаблять наводящее их магнитное поле. В свою очередь, уменьшение ЭДС, наводимых магнитным полем в обмотках статора, вызовет увеличение токов в статоре и, следовательно, полное сопротивление двигателя для токов обратной последовательности будет меньше его сопротивления для токов прямой последовательности, $\underline{Z}_2 < \underline{Z}_1$.

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей

Токи нулевой последовательности не создают вращающегося магнитного поля, потоки, создаваемые токами нулевой последовательности, одновременно во всех трех фазах направлены к ротору и замыкаются от ротора к статору по воздуху в торцевых частях двигателя. Сопротивление нулевой последовательности двигателя существенно отличается от сопротивления прямой и обратной последовательности. При отсутствии нулевого провода токов нулевой последовательности в двигателе не возникает. Расчет сопротивлений $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_0$ по конструктивным параметрам машины не сложен, так как эти сопротивления определяются для симметричных режимов, в частности и при круговом вращающемся магнитном поле. Расчет сопротивлений при действительных несимметричных токах в обмотках оказывается сложным, так как вращающееся магнитное поле при этом не является круговым и сопротивления сложным образом зависят от характера несимметрии токов.

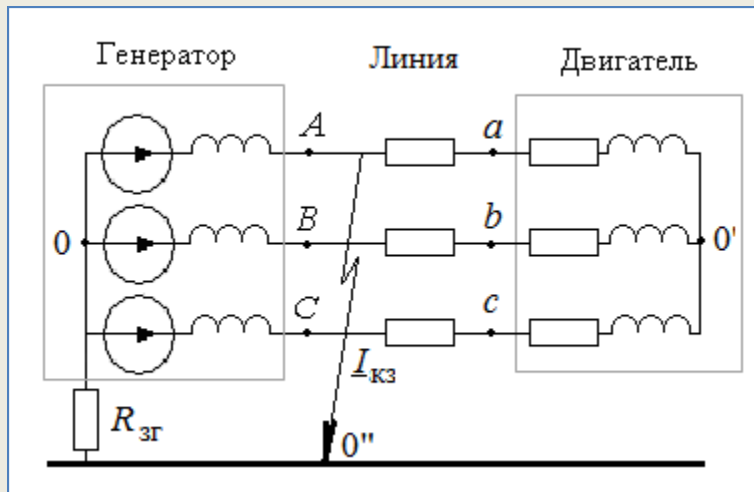
Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей

Для **линии электропередачи** $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$, но отличаются от $\underline{Z}_0$. В методе симметричных составляющих в однофазной схеме нулевой последовательности учитывают наличие нулевого провода утроением полного сопротивления нейтрального провода.

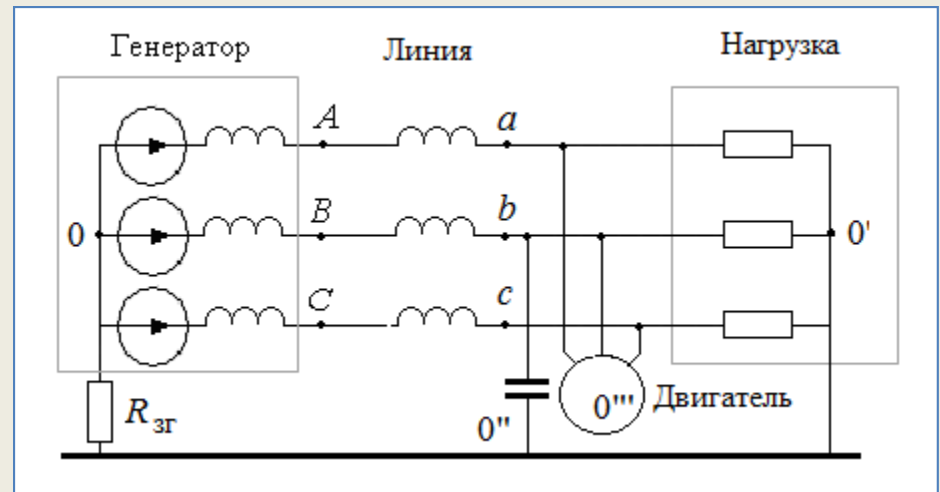
Наиболее резкая несимметрия токов в цепях с машинами наблюдается при **коротких замыканиях** в цепи, поэтому МСС получил наиболее широкое применение при расчете токов короткого замыкания в электрических цепях с динамической нагрузкой. МСС можно использовать при расчете токов короткого замыкания других видов несимметрий и при статической нагрузке, считая $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_0$.

4.10. Расчет поперечной несимметрии

Поперечная несимметрия определяется при разных замыканиях с фазы на землю (однофазных замыканий), при замыканиях между фаз. В таком случае напряжения несимметричного участка **рассматриваются относительно земли**.



короткое замыкание с фазы A
на землю



замыкание с фазы B
на землю

Алгоритм расчета поперечной несимметрии МСС

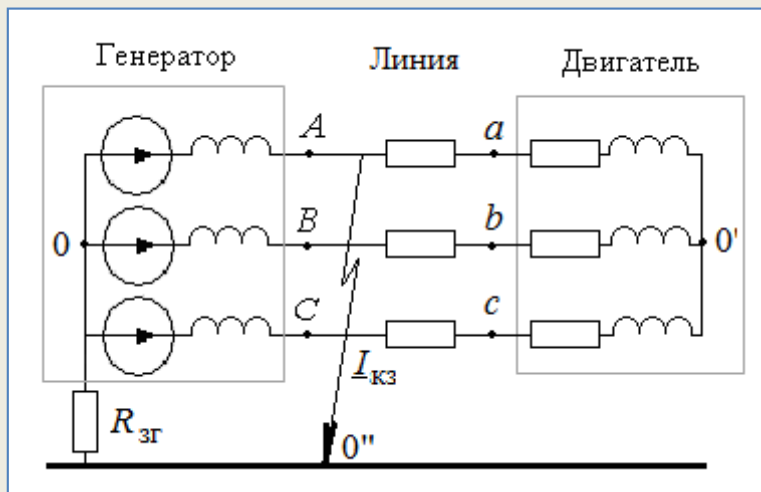
1. **Выделяем несимметричный участок, отмечаем и маркируем напряжения** несимметричного участка (относительно земли).
2. Несимметричную тройку напряжений **заменяем системой несимметричных ЭДС**. Отмечаем токи несимметричного участка.
3. Используем **разложение несимметричной системы напряжений на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей** (разложение Фортескью), в таком случае **несимметричный участок представляется девятью ЭДС** (по три в каждой фазе). Еще три ЭДС прямой последовательности содержит трехфазный генератор.
4. Составляем **однофазные расчетные схемы** отдельно для токов **прямой, обратной и нулевой последовательности** и уравнения, связывающие ток и напряжение отдельных последовательностей $\underline{U}_1(I_1), \underline{U}_2(I_2)$ и $\underline{U}_0(I_0)$. Получаем **три уравнения**, имея шесть неизвестных.
5. **Дополнительные три уравнения** составляются в соответствии с конкретным видом аварии и связывают полные токи и напряжения несимметричного участка.
6. **Решается система шести уравнений** для расчета **симметричных составляющих токов и напряжений несимметричного участка**. По расчетным схемам прямой, обратной и нулевой последовательности определяются **симметричные составляющие** остальных **токов и напряжений** трехфазной цепи.
7. В соответствии с разложением на симметричные составляющие определяются искомые токи и напряжения. **Проверка решения** - по законам Кирхгофа.

Расчет поперечной несимметрии МСС

Рассмотрим **короткое замыкание фазы А на землю**.

Параметры элементов: фазная ЭДС генератора; сопротивления генератора, линии, нагрузки для прямой, обратной и нулевой последовательностей; сопротивление заземлителя.

Сопротивление двигателя для токов нулевой последовательности часто не указывают в исходных данных, так как при отсутствии соединения общей точки двигателя с землей токов нулевой последовательности в двигателе нет.



Дано: E_{ϕ}

$$\underline{Z}_{\Gamma 1} \quad \underline{Z}_{\Gamma 2} \quad \underline{Z}_{\Gamma 0}$$

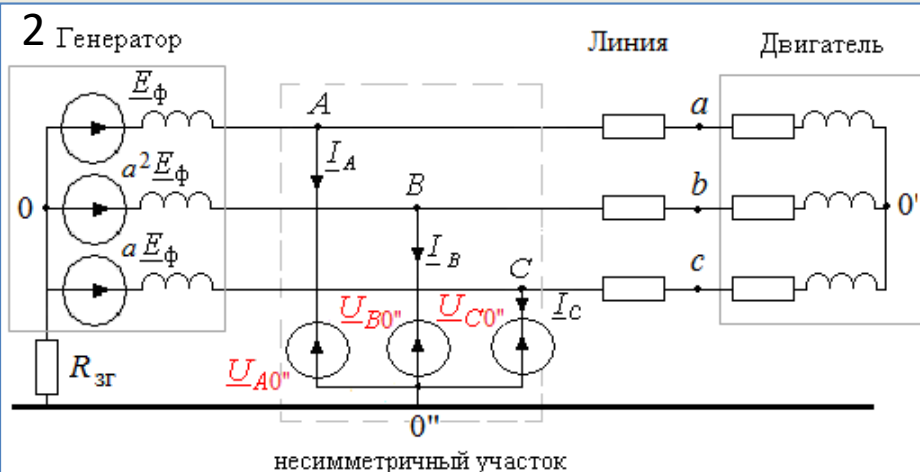
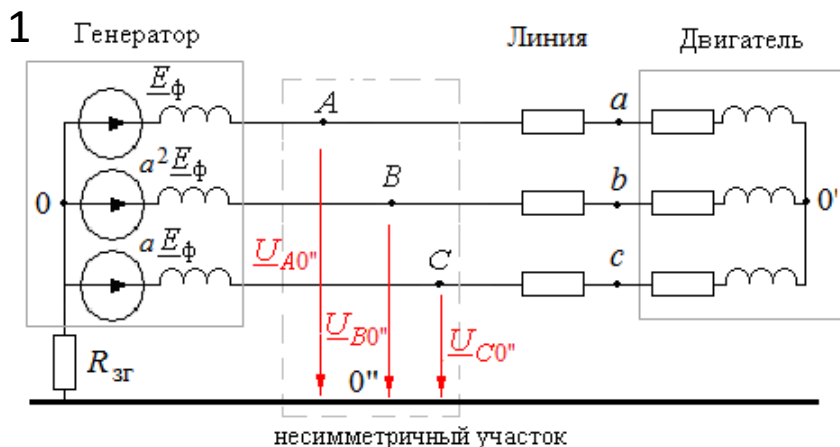
$$\underline{Z}_{\text{Л}1} = \underline{Z}_{\text{Л}2} \quad \underline{Z}_{\text{Л}0}$$

$$\underline{Z}_{\text{Д}1} \quad \underline{Z}_{\text{Д}2} \quad \left[\underline{Z}_{\text{Д}0} \right]$$

$$R_{\text{зг}} \quad \left[\underline{Z}_{\text{зг}} \right]$$

Расчет поперечной несимметрии МСС

1. **Выделяем несимметричный участок, отмечаем и маркируем напряжения** несимметричного участка (относительно земли). В данном случае несимметричный участок находится между генератором и линией. Представим напряжения несимметричного участка как $\underline{U}_{A0''}$ $\underline{U}_{B0''}$ $\underline{U}_{C0''}$
2. Несимметричную тройку напряжений **заменяем системой несимметричных ЭДС**. Отмечаем токи несимметричного участка. По теореме компенсации напряжения несимметричного участка можно представить в виде системы трех ЭДС. Введем расчетные $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ - токи несимметричного участка.



Расчет поперечной несимметрии МСС

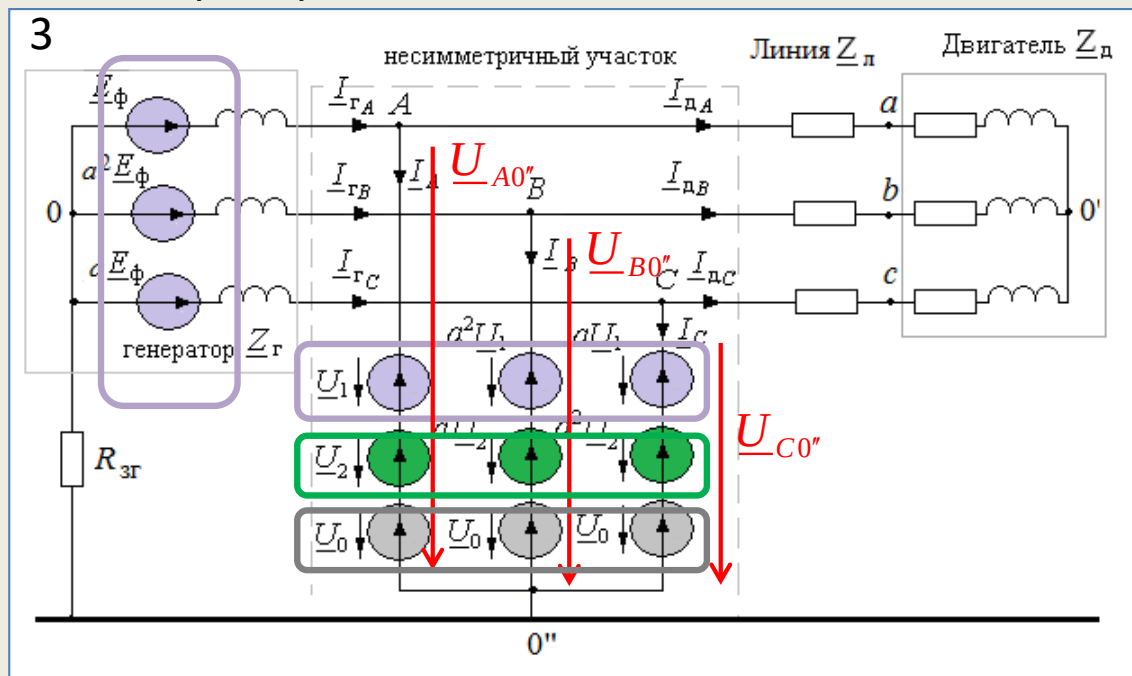
3. Используем *разложение Фортескью*

$$\underline{U}_{A0''} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0$$

$$\underline{U}_{B0''} = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0$$

$$\underline{U}_{C0''} = a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0$$

Несимметричный участок представляется девятью ЭДС (по три в каждой фазе) . Еще три ЭДС прямой последовательности содержит трехфазный генератор.



Аналогично по симметричным составляющим *прямой*, *обратной* и *нулевой* последовательности раскладываются токи несимметричного участка, генератора, линии (двигателя).

$$\underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0$$

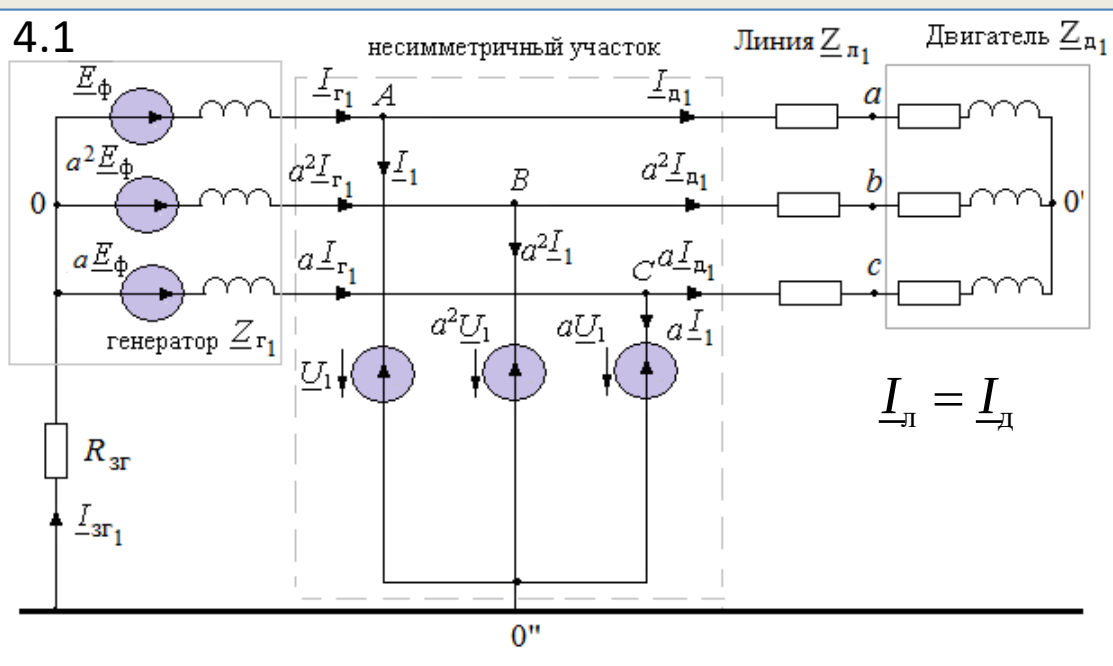
$$\underline{I}_B = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0$$

$$\underline{I}_C = a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0$$

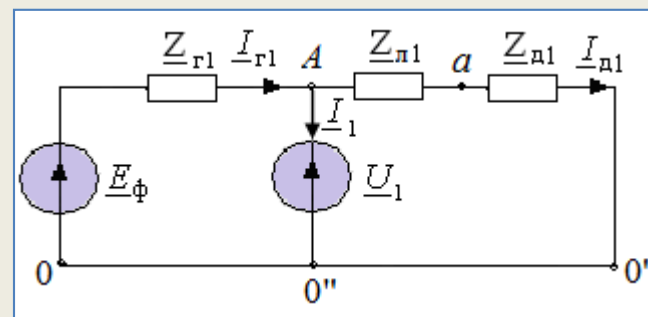
Схемы замещения прямой последовательности

4. Составляем **однофазные расчетные схемы** отдельно для токов **прямой**, **обратной** и **нулевой последовательности**

Прямая последовательность представлена фазными ЭДС источника и составляющими несимметричного участка. Составляем трехфазную расчетную схему прямой последовательности:



Однофазная расчетная схема прямой последовательности фазы A $\varphi_0 = \varphi_{0'} = \varphi_{0''}$



Любым методом составляем уравнение (МЭГ)

$$\underline{I}_1(\underline{U}_1) \quad (1)$$

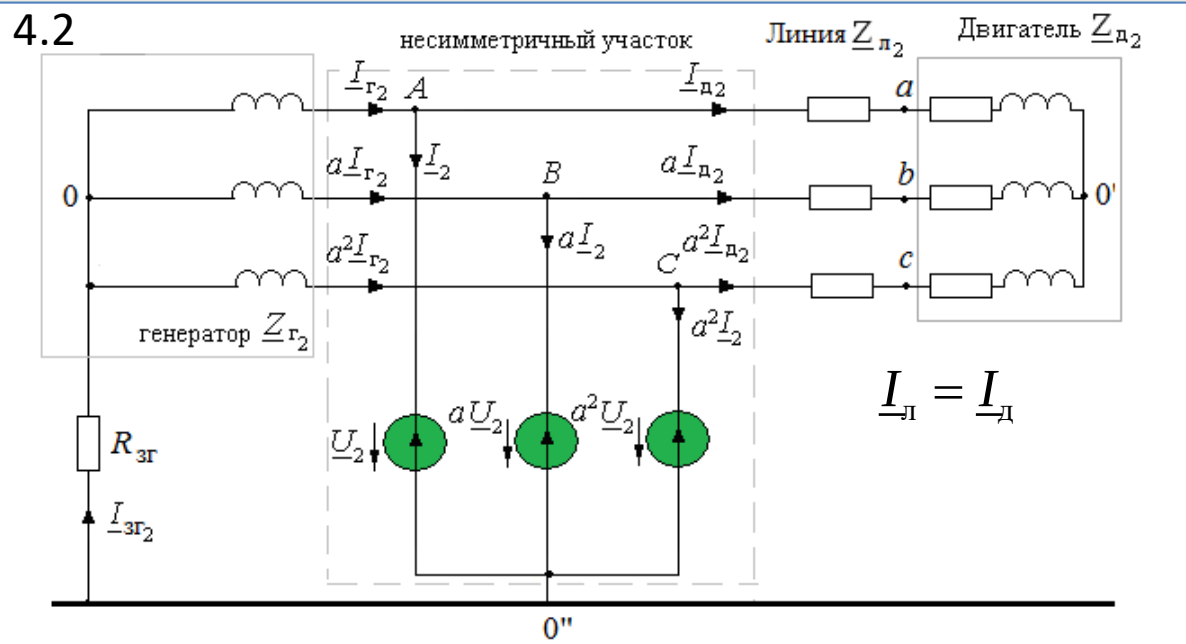
Так как $\underline{I}_{3r1} = \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_1 = 0$ то $\varphi_0 = \varphi_{0''}$

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{\phi} + a^2 \underline{E}_{\phi} + a \underline{E}_{\phi} &= 0 \\ \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \text{следовательно } \varphi_0 = \varphi_{0'}$$

Схемы замещения обратной последовательности

4. Составляем **однофазные расчетные схемы** отдельно для токов **прямой, обратной** и **нулевой последовательности**

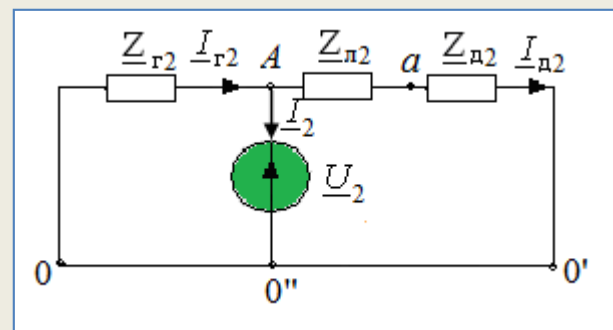
Обратная последовательность представлена только составляющими несимметричного участка. Составляем трехфазную расчетную схему обратной последовательности:



Так как $\underline{I}_{зг2} = \underline{I}_{г2} + a^2\underline{I}_{г2} + a\underline{I}_{г2} = 0$ то $\varphi_0 = \varphi_{0''}$

$\underline{U}_{г2} + a^2\underline{U}_{г2} + a\underline{U}_{г2} = 0$ следовательно $\varphi_0 = \varphi_{0'}$

**Однофазная
расчетная схема
обратной последовательности
фазы A** $\varphi_0 = \varphi_{0'} = \varphi_{0''}$



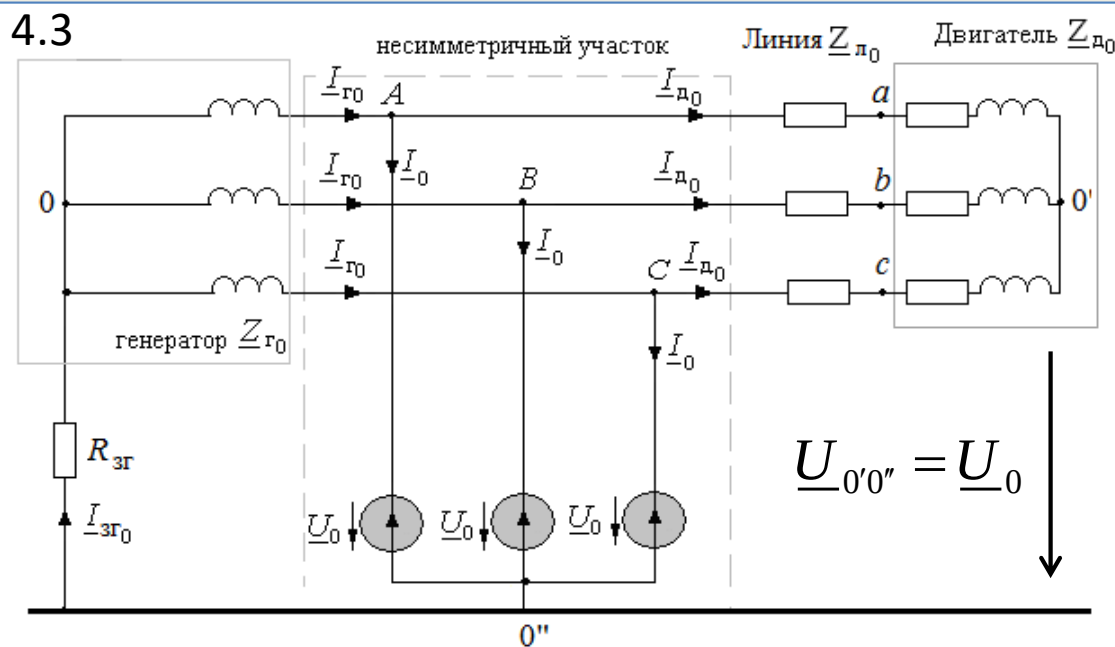
Любым методом составляем уравнение (МЭГ)

$$\underline{I}_2(\underline{U}_2) \quad (2)$$

Схемы замещения нулевой последовательности

4. Составляем *однофазные расчетные схемы* отдельно для токов *прямой*, *обратной* и *нулевой последовательности*

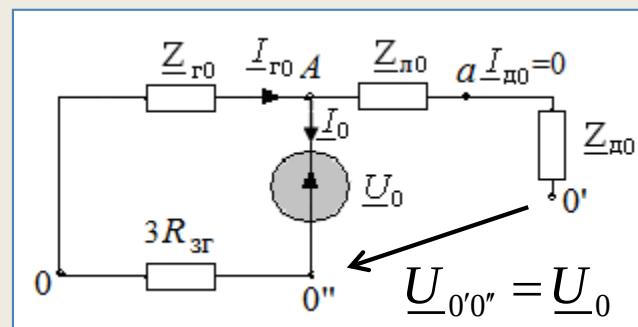
Нулевая последовательность представлена только составляющими несимметричного участка. Составляем трехфазную расчетную схему нулевой последовательности:



Так как $\underline{I}_{3г0} = \underline{I}_0 + \underline{I}_0 + \underline{I}_0 = 3\underline{I}_0$ то $\varphi_{0''} - \varphi_0 = 3\underline{I}_0 R_{3г}$

$\underline{I}_{д0} + \underline{I}_{д0} + \underline{I}_{д0} = 0$ следовательно $\underline{I}_{д0} = 0$

Однофазная
расчетная схема
нулевой последовательности
фазы А $\varphi_0 \neq \varphi_{0''}$

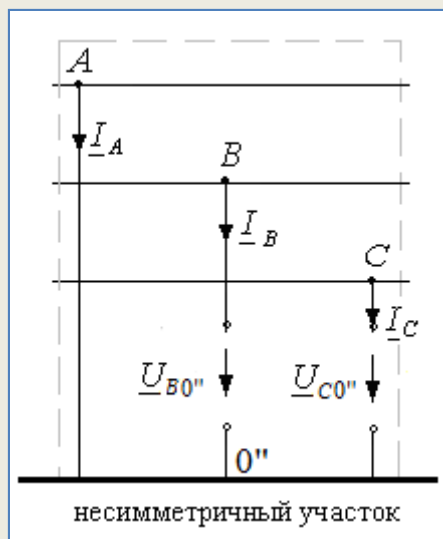


Любым методом составляем уравнение (МЭГ)

$$\underline{I}_0(\underline{U}_0) \quad (3)$$

Дополнительные уравнения (граничные условия)

5. **Дополнительные три уравнения** составляются в соответствии с конкретным видом аварии и связывают полные токи и напряжения несимметричного участка. Соотношения для токов и напряжений отдельно для прямой (1), обратной (2) и нулевой (3) последовательностей дополняются уравнениями для полных токов и напряжений несимметричного участка ("граничные условия" или "дополнительные уравнения"). В данном примере произошло короткое замыкание фазы А на землю. Схематично данная несимметрия представима следующим образом:



Необходимо рассчитать ненулевой ток $\underline{I}_A$ и ненулевые напряжения $\underline{U}_{B0''}, \underline{U}_{C0''}$. По условию $\underline{U}_{A0''} = 0$ (короткое замыкание), при отсутствии замыканий фаз В и С на землю $\underline{I}_B = 0, \underline{I}_C = 0$. Таким образом данная несимметрия описывается дополнительными уравнениями:

$$\underline{U}_{A0''} = 0 \quad \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4)$$

$$\underline{I}_B = 0 \quad a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (5)$$

$$\underline{I}_C = 0 \quad a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6)$$

Расчет токов и напряжений трехфазной цепи

6. Решается система **шести уравнений** для расчета **симметричных составляющих токов и напряжений несимметричного участка**. По расчетным схемам прямой, обратной и нулевой последовательности определяются **симметричные составляющие** остальных **токов и напряжений** трехфазной цепи (схемы 6.1-6.3).

$$\underline{I}_1(\underline{U}_1) \quad (1)$$

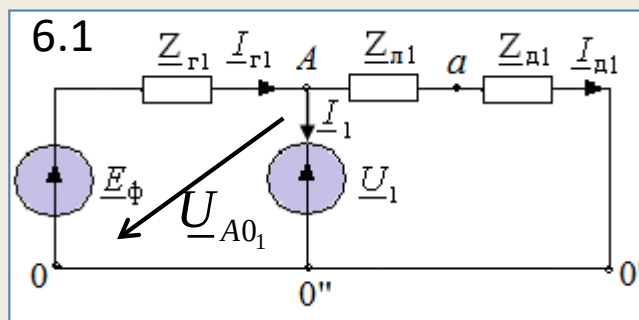
$$\underline{I}_2(\underline{U}_2) \quad (2)$$

$$\underline{I}_0(\underline{U}_0) \quad (3)$$

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4)$$

$$a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (5)$$

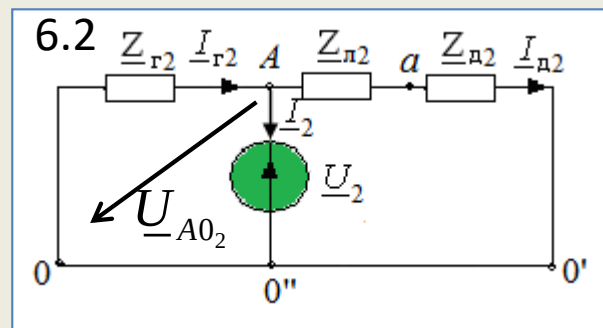
$$a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6)$$



$$\underline{I}_{r1} = \frac{\underline{E}_\phi - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{r1}}$$

$$\underline{U}_{A0_1} = \underline{U}_1$$

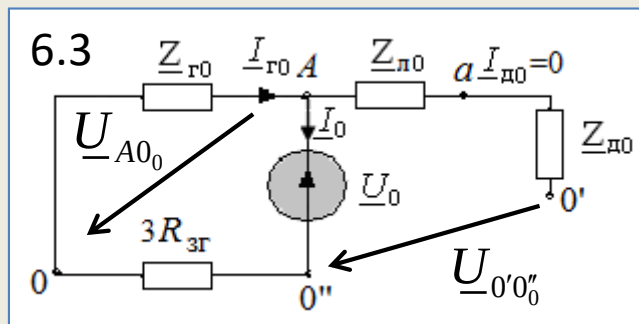
$$\underline{U}_{0'0'_1} = 0$$



$$\underline{I}_{r2} = -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{r2}}$$

$$\underline{U}_{A0_2} = \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_{0'0'_2} = 0$$



$$\underline{I}_{r0} = \underline{I}_0 \quad \underline{U}_{A0_0} = -\underline{I}_{r0} \underline{Z}_{r0} \quad \underline{U}_{0'0'_0} = \underline{U}_0$$

Система уравнений для расчета симметричных составляющих токов и напряжений

6. В соответствии с разложением на симметричные составляющие определяются искомые токи и напряжения.

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{r1} &= \frac{\underline{E}_\phi - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{r1}} \\ \underline{I}_{r2} &= -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{r2}} \\ \underline{I}_{r0} &= \underline{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

Фазные токи генератора

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{rA} &= \underline{I}_{r1} + \underline{I}_{r2} + \underline{I}_{r0} \\ \underline{I}_{rB} &= a^2 \underline{I}_{r1} + a \underline{I}_{r2} + \underline{I}_{r0} \\ \underline{I}_{rC} &= a \underline{I}_{r1} + a^2 \underline{I}_{r2} + \underline{I}_{r0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{л1} = \underline{I}_{д1} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{л1} + \underline{Z}_{д1}} \\ \underline{I}_{л2} = \underline{I}_{д2} &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{л2} + \underline{Z}_{д2}} \\ \underline{I}_{л0} = \underline{I}_{д0} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Фазные токи

**двигателя
(линейные токи)**

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{лA} = \underline{I}_{дA} &= \underline{I}_{л1} + \underline{I}_{л2} + \underline{I}_{л0} \\ \underline{I}_{лB} = \underline{I}_{дB} &= a^2 \underline{I}_{л1} + a \underline{I}_{л2} + \underline{I}_{л0} \\ \underline{I}_{лC} = \underline{I}_{дC} &= a \underline{I}_{л1} + a^2 \underline{I}_{л2} + \underline{I}_{л0} \end{aligned} \right\}$$

Ток короткого замыкания $\underline{I}_{кз} = \underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 3\underline{I}_1$

Фазные напряжения генератора

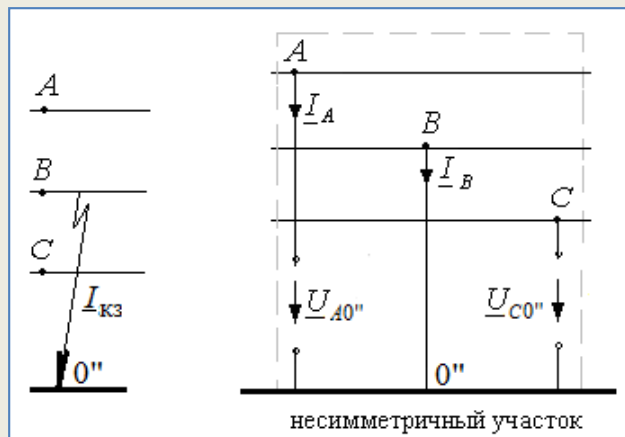
$$\begin{aligned} \underline{U}_{A0} &= \underline{U}_{A0_1} + \underline{U}_{A0_2} + \underline{U}_{A0_0} \\ \underline{U}_{B0} &= a^2 \underline{U}_{A0_1} + a \underline{U}_{A0_2} + \underline{U}_{A0_0} \\ \underline{U}_{C0} &= a \underline{U}_{A0_1} + a^2 \underline{U}_{A0_2} + \underline{U}_{A0_0} \end{aligned}$$

проверка расчета

$$\underline{I}_{rA} = \underline{I}_A + \underline{I}_{дA} \quad \underline{I}_{rB} = \underline{I}_{дB} \quad \underline{I}_{rC} = \underline{I}_{дC}$$

Дополнительные уравнения (граничные условия)

Дополнительные три уравнения составляются в соответствии с конкретным видом аварии и связывают полные токи и напряжения несимметричного участка (определяют **частное** решение).

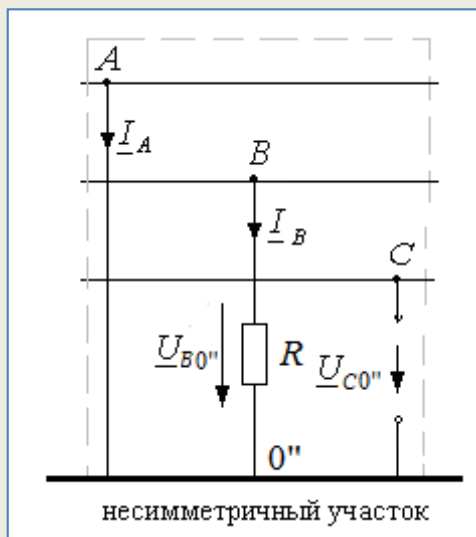


Короткое замыкание фазы В на землю

$$\underline{U}_{B0''} = 0 \quad a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4)$$

$$\underline{I}_A = 0 \quad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (5)$$

$$\underline{I}_C = 0 \quad a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6)$$



Короткое замыкание фазы А на землю и замыкание фазы В на землю через двухполюсник R

$$\underline{U}_{A0''} = 0 \quad \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4)$$

$$\underline{U}_{B0''} = R \underline{I}_B$$

$$a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = R (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \quad (5)$$

$$\underline{I}_C = 0 \quad a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6)$$

Автор доц. каф. ТОЭ НИУ «МЭИ»
Жохова М.П.



ZhokhovaMP@mpei.ru