

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

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

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**):

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

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

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

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

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

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

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

Пример 1 В результате аварии фазные напряжения трехфазного генератора $\underline{U}_A = 210 \angle 0^\circ$ В, $\underline{U}_B = 210 \angle -120^\circ$ В, $\underline{U}_C = 0$. Определить симметричные составляющие фазных напряжений (рис. 1).

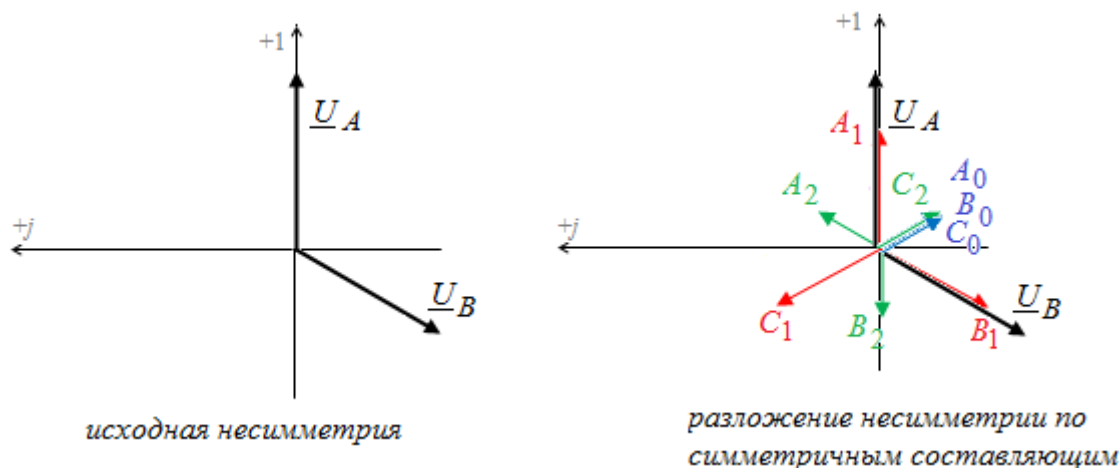


Рис. 1 Разложение системы несимметричных векторов (комплексных напряжений) по симметричным составляющим

Рассчитаем симметричные составляющие для заданной несимметрии (рис. 2):

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

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

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

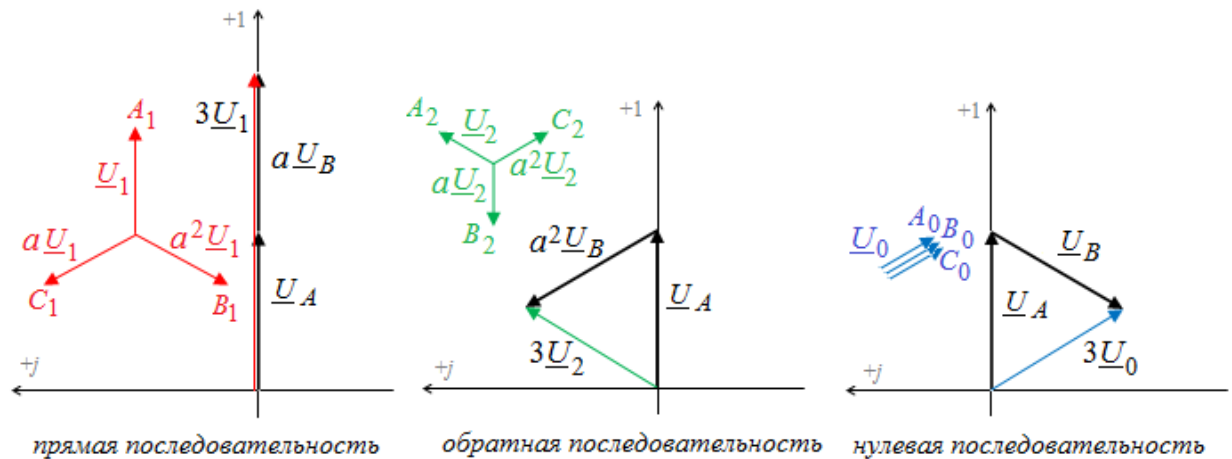


Рис. 2. Определение симметричных составляющих

Проверка расчета:

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

$$\underline{U}_B = a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 140\angle -120^\circ + 70\angle 180^\circ + 70\angle -60^\circ = -105 - j181,87 = 210\angle -120^\circ$$

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

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 обрывах 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 расчетные схемы прямой, обратной и нулевой последовательности с использованием комплексных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности. Дополнительно составляются уравнения, определяющие конкретный вид аварии.

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 электромеханические 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. Несимметрия напряжений характеризуется *коэффициентом несимметрии напряжения* по обратной последовательности K_{2U} и по нулевой последовательности K_{0U} для основной частоты.

Расчет проводится по формулам: $K_{2U} = \frac{U_2^{(1)}}{U_1^{(1)}} 100\%$, $K_{0U} = \frac{U_0^{(1)}}{U_1^{(1)}} 100\%$, 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. Обрыв нулевого провода приводит к перенапряжениям на фазах нагрузки и появлению напряжения смещения нейтрали (напряжения прикосновения).

4.9 Сопротивления на фазу для токов 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 Z_1 , обратной Z_2 и нулевой Z_0** последовательности. В таком случае проводят расчет трехфазных цепей **при динамической нагрузке**. При решении задач используют схемы замещения асинхронного двигателя для прямой, обратной и нулевой последовательности. Также как и в случае синхронных генераторов сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей для асинхронного двигателя - 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, $\underline{Z}_2 < \underline{Z}_1$. 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 \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 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.

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 утروением 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 и других видов несимметрий и при статической нагрузке.

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.

Расчет методом симметричных составляющих содержит несколько этапов:

1. Выделяем несимметричный участок и отмечаем напряжения несимметричного участка.

2. Несимметричную тройку напряжений заменяем системой несимметричных ЭДС. Отмечаем токи несимметричного участка.

3. Используем разложение несимметричной системы напряжений на симметричные составляющие прямой \underline{U}_1 , обратной \underline{U}_2 и нулевой \underline{U}_0 последовательностей (разложение Фортескью), в таком случае несимметричный участок представляется получаем девятью ЭДС (по три в каждой фазе). Еще три ЭДС прямой последовательности содержит трехфазный генератор.

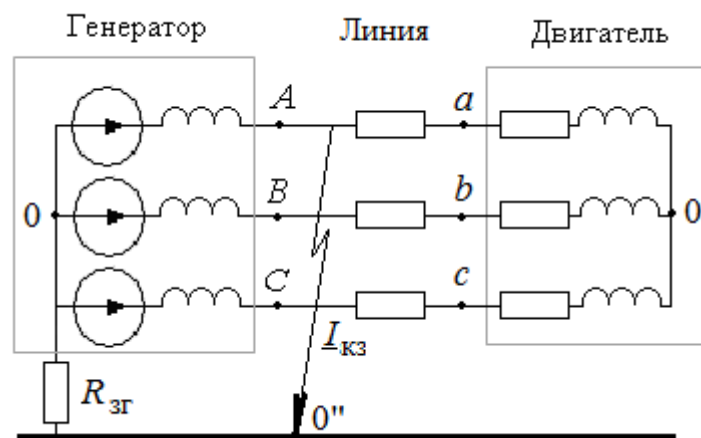
4. Составляем расчетные схемы отдельно для токов прямой, обратной и нулевой последовательности и уравнения, связывающие ток и напряжение отдельных последовательностей $\underline{U}_1(\underline{I}_1)$, $\underline{U}_2(\underline{I}_2)$ и $\underline{U}_0(\underline{I}_0)$. Получаем три уравнения, имея 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.

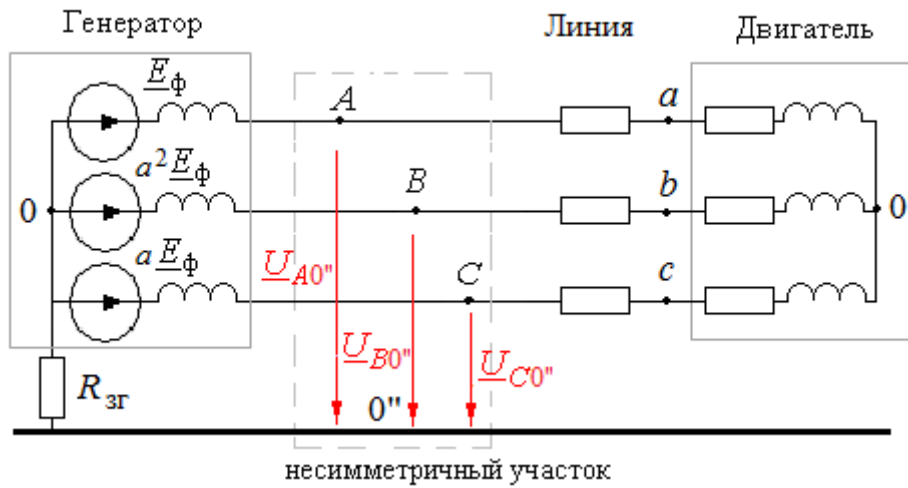
7. В соответствии с разложением на симметричные составляющие определяются искомые токи и напряжения. Проверка решения - по законам Кирхгофа.

Рассмотрим **короткое замыкание фазы А на землю**. Фазная ЭДС генератора E_ϕ ; сопротивления генератора Z_{r1} , Z_{r2} , Z_{r0} ; линии $Z_{л1} = Z_{л2}, Z_{л0}$; двигателя $Z_{д1}$, $Z_{д2}$, $Z_{д0}$ ¹; сопротивление заземлителя $R_{зг}$.

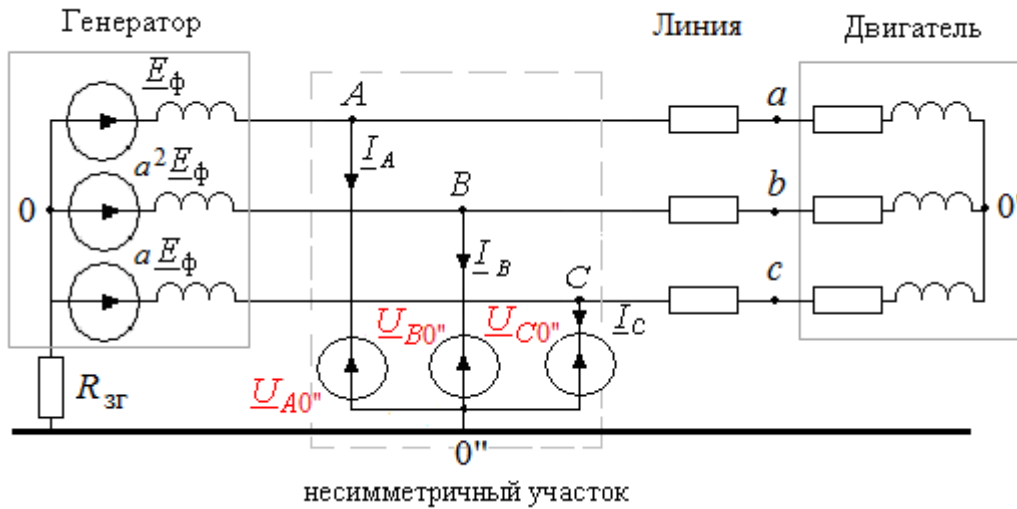


В данном случае несимметричный участок находится между генератором и линией. Представим напряжения несимметричного участка как $\underline{U}_{A0''}$, $\underline{U}_{B0''}$ и $\underline{U}_{C0''}$:

¹ Сопротивление двигателя для токов нулевой последовательности часто не указывают в исходных данных, так как токов нулевой последовательности в двигателе нет.



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.

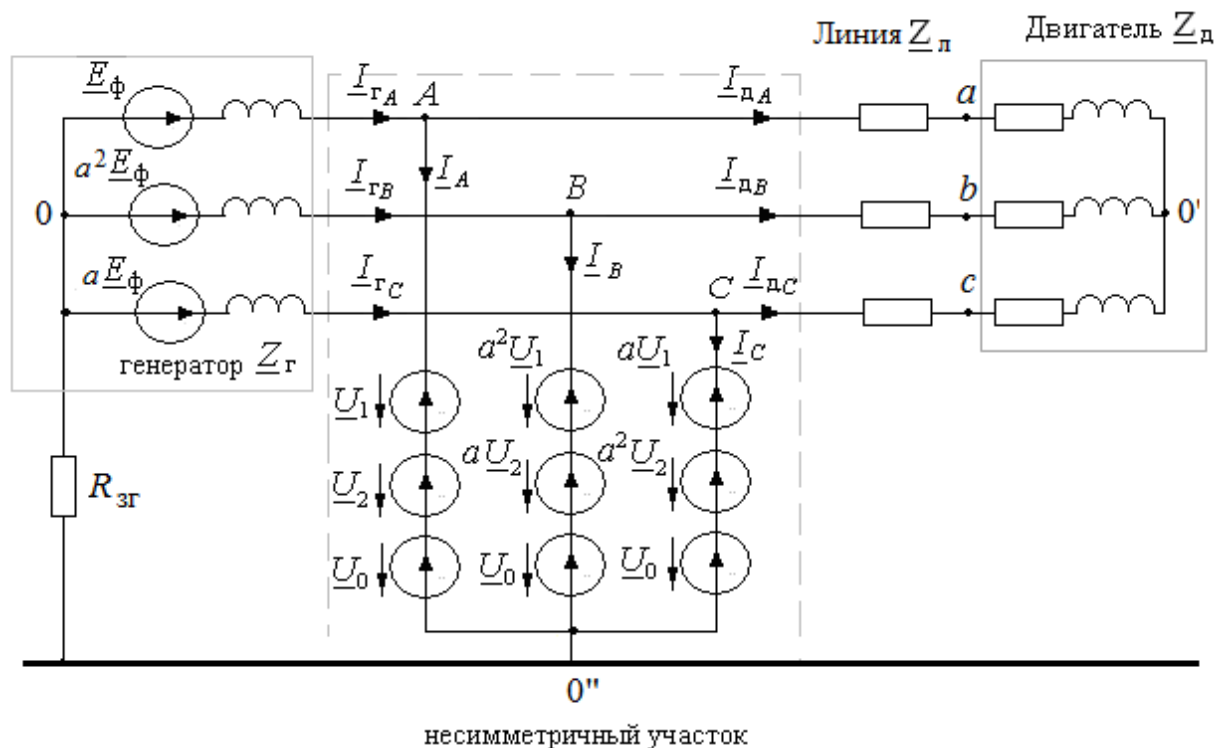


Воспользуемся аналитическим разложением системы векторов несимметричного напряжения на симметричные составляющие прямой \underline{U}_1 , обратной \underline{U}_2 и нулевой \underline{U}_0 последовательностей:

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

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

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



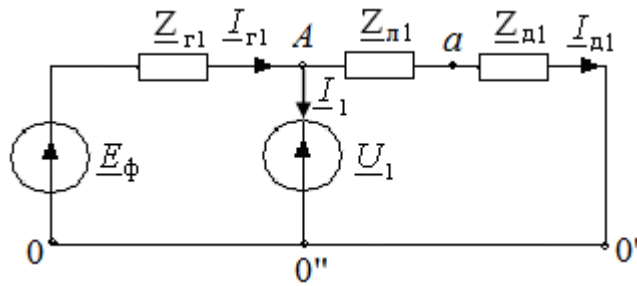
Для \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C - токов несимметричного участка также есть симметричные составляющие прямой \underline{I}_1 , обратной \underline{I}_2 и нулевой \underline{I}_0 последовательностей:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_B &= a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_C &= a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0\end{aligned}$$

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

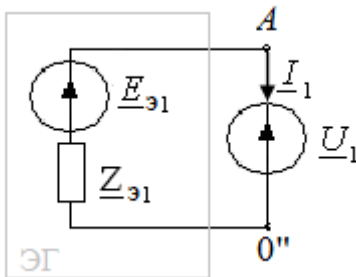
При этом токи прямой последовательности образованы источниками прямой последовательности (\underline{E}_ϕ и \underline{U}_1), токи обратной последовательности - источником обратной последовательности (\underline{U}_2), токи нулевой последовательности - источником нулевой последовательности (\underline{U}_0). Составим **однофазные схемы замещения фазы А для расчета токов прямой, обратной и нулевой последовательности:**

а) расчетная схема фазы А прямой последовательности (\underline{E}_ϕ и \underline{U}_1):



Так как для прямой последовательности в симметричном режиме $\underline{\Phi}_0 = \underline{\Phi}_{0'} = \underline{\Phi}_{0''}$, $\underline{I}_{\text{вр}1} = 0$, в расчетной схеме соединим точки 0, 0' и 0''.

В расчетной схеме неизвестны токи прямой последовательности \underline{I}_1 , \underline{I}_{r1} , $\underline{I}_{\text{л}1} = \underline{I}_{\text{д}1}$ и \underline{U}_1 . Применим метод эквивалентного генератора для формирования уравнения связи $\underline{I}_1(\underline{U}_1)$:



Параметры эквивалентного генератора (ЭГ):

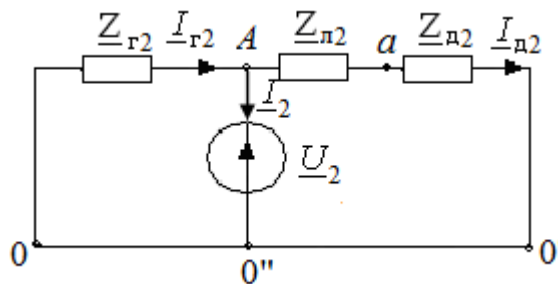
$$\underline{E}_{\text{э}1} = \frac{\underline{E}_{\phi}}{\underline{Z}_{r1} + \underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\text{д}1}} (\underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\text{д}1})$$

$$\underline{Z}_{\text{э}1} = \frac{\underline{Z}_{r1} \cdot (\underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\text{д}1})}{\underline{Z}_{r1} + \underline{Z}_{\text{л}1} + \underline{Z}_{\text{д}1}}$$

По схеме эквивалентного генератора уравнение связи

$$\underline{I}_1(\underline{U}_1): \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_{\text{э}1} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{э}1}} \quad \text{или} \quad \underline{U}_1 = \underline{E}_{\text{э}1} - \underline{I}_1 \underline{Z}_{\text{э}1} \quad (1)$$

б) расчетная схема фазы A обратной последовательности (\underline{U}_2):

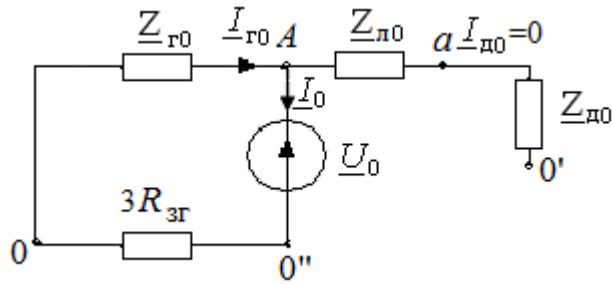


Аналогично для обратной последовательности $\underline{\Phi}_0 = \underline{\Phi}_{0'} = \underline{\Phi}_{0''}$, $\underline{I}_{\text{вр}2} = 0$. Определим

$$\underline{Z}_{\text{э}2} = \frac{\underline{Z}_{r2} \cdot (\underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\text{д}2})}{\underline{Z}_{r2} + \underline{Z}_{\text{л}2} + \underline{Z}_{\text{д}2}}.$$

$$\underline{\text{Уравнение связи}} \underline{I}_2(\underline{U}_2): \underline{I}_2 = -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{\text{э}2}} \quad \text{или} \quad \underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_{\text{э}2} \quad (2)$$

в) расчетная схема фазы A нулевой последовательности (\underline{U}_0):

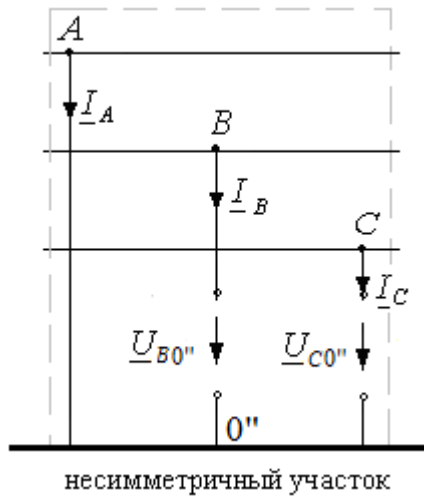


Для токов нулевой последовательности $\underline{I}_{л0} = \underline{I}_{д0} = 0$, $\underline{I}_{г0} = \underline{I}_0$, $\underline{I}_{зг0} = 3\underline{I}_0$.

Напряжение $\underline{U}_{0'0} = \underline{Z}_{зг} \underline{I}_{зг0} = 3\underline{Z}_{зг} \underline{I}_0$, в расчетной схеме для определения тока \underline{I}_0 это учтено как $3\underline{Z}_{зг}$.

Уравнение связи $I_0(U_0)$: $\underline{I}_0 = -\frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{э0}}$ или $\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_{э0}$ (3)

Соотношения для токов и напряжений отдельно для прямой (1), обратной (2) и нулевой (3) последовательностей дополняются уравнениями для полных токов $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ и напряжений $\underline{U}_{A0'}, \underline{U}_{B0'}, \underline{U}_{C0'}$ 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:

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

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

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

Для определения симметричных составляющих токов $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ и напряжений $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$ несимметричного участка составлены **шесть уравнений**:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{E}_{э1} - \underline{I}_1 \underline{Z}_{э1} & (1) \\ \underline{U}_2 &= -\underline{I}_2 \underline{Z}_{э2} & (2) \\ \underline{U}_0 &= -\underline{I}_0 \underline{Z}_{э0} & (3) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{общие уравнения (определяются местом и типом} \\ \text{несимметрии)} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= 0 & (4) \\ a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= 0 & (5) \\ a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= 0 & (6) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{дополнительные уравнения при коротком} \\ \text{замыкании фазы А на землю} \end{array}$$

Для решения системы из шести уравнений и нахождения неизвестных $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ и $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$ можно использовать различные математические программы, но в данном случае решение достаточно простое. Вычитая из (5)-го уравнения (6)-е получаем

$$\begin{aligned} (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) - (a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0) &= 0 \\ (a^2 - a) \underline{I}_1 - (a^2 - a) \underline{I}_2 &= 0 \Rightarrow \underline{I}_1 = \underline{I}_2 \end{aligned}$$

Тогда с учетом $\underline{I}_1 = \underline{I}_2$ и подстановки соотношения $a^2 + a + 1 = 0$ в (5)-е уравнение следует, что $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0$. В (4)-е уравнение подставляем выражения (1), (2) и (3) и полученное соотношение:

$$(\underline{E}_{\varphi 1} - \underline{I}_1 \underline{Z}_{\varphi 1}) + (-\underline{I}_2 \underline{Z}_{\varphi 2}) + (-\underline{I}_0 \underline{Z}_{\varphi 0}) = 0 \Rightarrow \underline{E}_{\varphi 1} - \underline{I}_1 (\underline{Z}_{\varphi 1} + \underline{Z}_{\varphi 2} + \underline{Z}_{\varphi 0}) = 0.$$

Симметричные составляющие токов несимметричного участка:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_{\varphi 1}}{\underline{Z}_{\varphi 1} + \underline{Z}_{\varphi 2} + \underline{Z}_{\varphi 0}}.$$

Ток короткого замыкания

$$\underline{I}_{\text{кз}} = \underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 3 \underline{I}_1.$$

Симметричные составляющие напряжений несимметричного участка:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{E}_{\varphi 1} - \underline{I}_1 \underline{Z}_{\varphi 1} \\ \underline{U}_2 &= -\underline{I}_2 \underline{Z}_{\varphi 2} \\ \underline{U}_0 &= -\underline{I}_0 \underline{Z}_{\varphi 0} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{симметричные составляющие напряжений несимметричного} \\ \text{участка} \end{array}$$

Проверка: $\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0.$

Расчет токов генератора. По расчетным схемам прямой, обратной и нулевой последовательности фазы А определим симметричные составляющие фазных токов генератора:

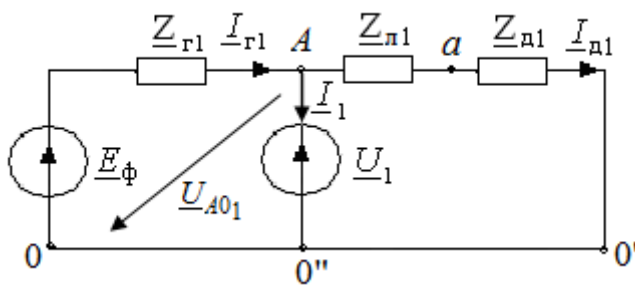
$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{r1} &= \frac{\underline{E}_\phi - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{r1}} \\ \underline{I}_{r2} &= -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{r2}} \\ \underline{I}_{r0} &= \underline{I}_0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \underline{I}_{rA} &= \underline{I}_{r1} + \underline{I}_{r2} + \underline{I}_{r0} \\ \underline{I}_{rB} &= a^2 \underline{I}_{r1} + a \underline{I}_{r2} + \underline{I}_{r0} \\ \underline{I}_{rC} &= a \underline{I}_{r1} + a^2 \underline{I}_{r2} + \underline{I}_{r0} \end{aligned}$$

Ток в сопротивлении заземлителя генератора в аварийном режиме равен току короткого замыкания:

$$\underline{I}_{зг} = \underline{I}_{rA} + \underline{I}_{rB} + \underline{I}_{rC} = 3\underline{I}_{r0}$$

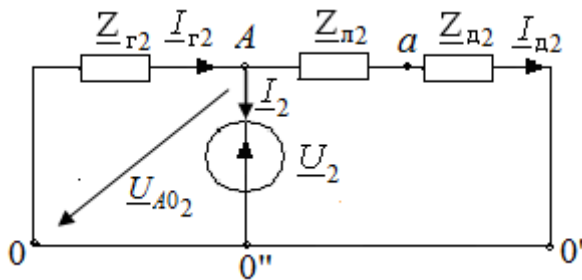
Фазные напряжения генератора. Определим напряжения \underline{U}_{A0} , \underline{U}_{B0} и \underline{U}_{C0} через симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности:

а) прямая последовательность



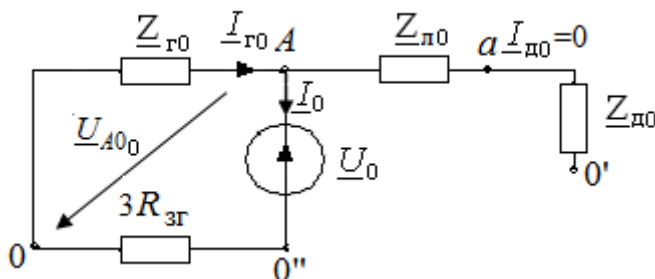
$$\begin{aligned} \underline{U}_{A0_1} &= \underline{U}_{A0'_1} = \underline{U}_{A0'_1} = \underline{U}_1 \\ \underline{U}_{0''0_1} &= 0 \end{aligned}$$

б) обратная последовательность



$$\begin{aligned} \underline{U}_{A0_2} &= \underline{U}_{A0'_2} = \underline{U}_{A0'_2} = \underline{U}_2 \\ \underline{U}_{0''0_2} &= 0 \end{aligned}$$

в) нулевая последовательность



$$\begin{aligned} \underline{U}_{A0_0} &= -\underline{I}_{r0} \underline{Z}_{r0} \\ \underline{U}_{A0'_0} &= \underline{U}_0 \\ \underline{U}_{A0''_0} &= 0 \\ \underline{U}_{0''0_0} &= 3\underline{I}_{r0} \underline{Z}_{зг} = 3\underline{I}_0 \underline{Z}_{зг} \end{aligned}$$

Из рассчитанных симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A0} &= \underline{U}_{A0_1} + \underline{U}_{A0_2} + \underline{U}_{A0_0} \\ \underline{U}_{B0} &= a^2 \underline{U}_{A0_1} + a \underline{U}_{A0_2} + \underline{U}_{A0_0} \\ \underline{U}_{C0} &= a \underline{U}_{A0_1} + a^2 \underline{U}_{A0_2} + \underline{U}_{A0_0} \end{aligned} \right\} \text{ фазные напряжения генератора}$$

Проверка: $\underline{U}_{A0} = \underline{U}_{0''}$ (короткое замыкание фазы А на землю, следовательно $\underline{\varphi}_A = \underline{\varphi}_{0''}$).

Линейные напряжения на генераторе:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}; \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{B0} - \underline{U}_{C0}; \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{C0} - \underline{U}_{A0}.$$

Расчет токов линии и двигателя. По расчетным схемам прямой, обратной и нулевой последовательности фазы А определим симметричные составляющие линейных токов и фазных токов двигателя:

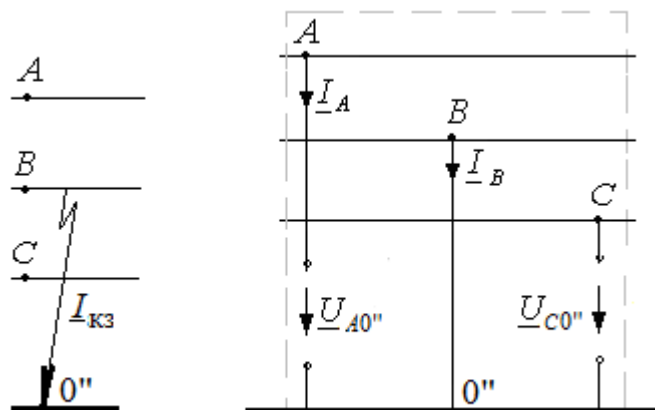
$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{\pi 1} = \underline{I}_{\pi 1} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\pi 1} + \underline{Z}_{\pi 1}} \\ \underline{I}_{\pi 2} = \underline{I}_{\pi 2} &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{\pi 2} + \underline{Z}_{\pi 2}} \\ \underline{I}_{\pi 0} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \underline{I}_{\pi A} = \underline{I}_{\pi A} &= \underline{I}_{\pi 1} + \underline{I}_{\pi 2} + \underline{I}_{\pi 0} \\ \underline{I}_{\pi B} = \underline{I}_{\pi B} &= a^2 \underline{I}_{\pi 1} + a \underline{I}_{\pi 2} + \underline{I}_{\pi 0} \\ \underline{I}_{\pi C} = \underline{I}_{\pi C} &= a \underline{I}_{\pi 1} + a^2 \underline{I}_{\pi 2} + \underline{I}_{\pi 0} \end{aligned}$$

Проверка (выполнение 1^{го} закона Кирхгофа):

$$\underline{I}_{\pi A} = \underline{I}_A + \underline{I}_{\pi A}; \underline{I}_{\pi B} = \underline{I}_{\pi B}; \underline{I}_{\pi C} = \underline{I}_{\pi C}$$

Расчет фазных и линейных напряжений двигателя проводится аналогично.

При коротком замыкании фазы В на землю



несимметричный участок

уравнения (1), (2) и (3) будут аналогичны, в дополнительных уравнениях задают

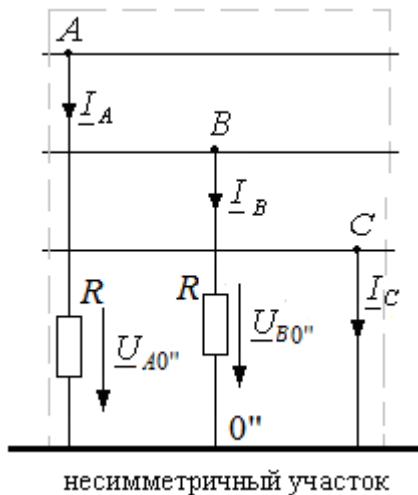
$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{BN} = 0 \quad \text{или} \quad a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4) \\ \underline{I}_A = 0 \quad \text{или} \quad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (5) \\ \underline{I}_C = 0 \quad \text{или} \quad a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6) \end{aligned} \right\}$$

При коротком замыкании фазы С на землю уравнения (1), (2) и (3) также будут аналогичны, в дополнительных уравнениях задают

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{CN} = 0 \quad \text{или} \quad a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4) \\ \underline{I}_A = 0 \quad \text{или} \quad \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (5) \\ \underline{I}_B = 0 \quad \text{или} \quad a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6) \end{aligned} \right\}$$

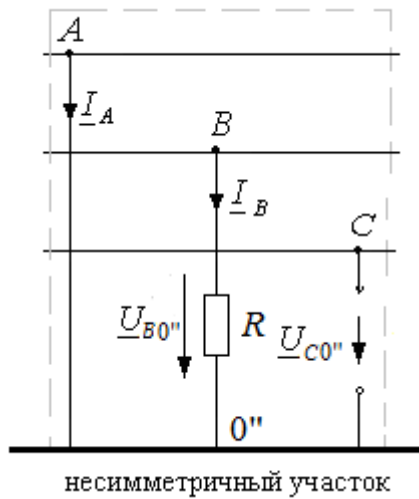
Совместное решение шести уравнений позволяет рассчитать симметричные составляющие токов и напряжений несимметричного участка, потом рассчитать полные токи и напряжения всех участков трехфазной цепи.

При поперечной несимметрии возможно замыкание нескольких фаз на землю. Если замыкание на землю происходит через двухполюсник (имеющий резистивный или реактивный характер), то в дополнительных уравнениях используют закон Ома в комплексной форме.



Замыкание фаз А и В на землю через двухполюсник R и короткое замыкание с фазы С на землю описывается дополнительными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A0''} = R \underline{I}_A \quad \text{или} \\ \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = R(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \quad (4) \\ \underline{U}_{B0''} = R \underline{I}_B \quad \text{или} \\ a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = R(a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \quad (5) \\ \underline{U}_{C0''} = 0 \quad \text{или} \quad a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (6) \end{aligned} \right\}$$



Короткое замыкание фазы А на землю и замыкание фазы В на землю через двухполюсник R описывается дополнительными уравнениями:

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

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

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

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