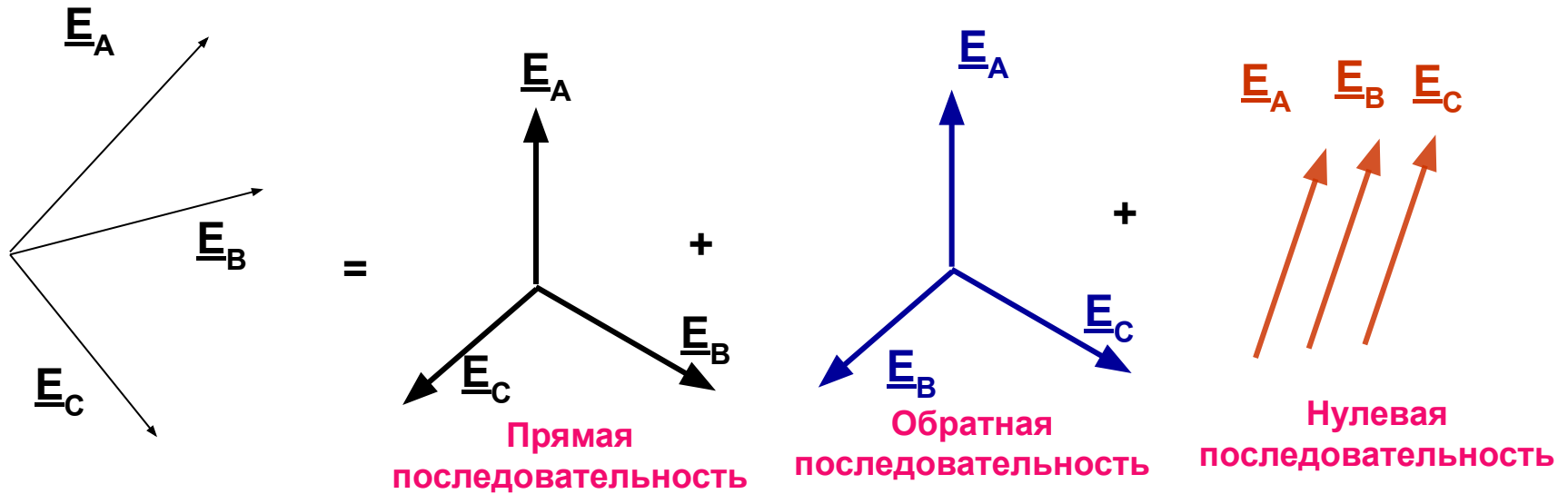


Метод симметричных составляющих

- 1.Разложение несимметричной системы ЭДС на симметричные составляющие.
- 2.Сопротивления фаз динамической нагрузки для токов различной последовательности.
- 3.Расчет простых электрических цепей методом симметричных составляющих.
- 4.Расчет сложных электрических цепей методом симметричных составляющих.

Переменный ток



$$\begin{aligned} \underline{E}_{A1} &= E_{A1} \angle 0^\circ & \underline{E}_{B1} &= E_{A1} \angle -120^\circ & \underline{E}_{C1} &= E_{A1} \angle +120^\circ \\ \underline{E}_{A2} &= E_{A2} \angle 0^\circ & \underline{E}_{B2} &= E_{A2} \angle +120^\circ & \underline{E}_{C2} &= E_{A2} \angle -120^\circ \\ \underline{E}_{A0} &= E_{A0} \angle 0^\circ & \underline{E}_{B0} &= E_{A0} \angle 0^\circ & \underline{E}_{C0} &= E_{A0} \angle 0^\circ \end{aligned}$$

Введем обозначение $\mathbf{a} = e^{j120^\circ}$ -вращающий множитель

Перепишем симметричные составляющие с учетом вращающего множителя

$$\underline{E}_{A1} = E_A \angle 0^0$$

$$\underline{E}_{B1} = \underline{E}_A a^2$$

$$\underline{E}_{C1} = \underline{E}_A a$$

$$\underline{E}_{A2} = E_{A2} \angle 0^0$$

$$\underline{E}_{B2} = \underline{E}_{A2} a$$

$$\underline{E}_{C2} = \underline{E}_{A2} a^2$$

$$\underline{E}_{A0} = E_A \angle 0^0$$

$$\underline{E}_{B0} = \underline{E}_{A0} \angle 0^0$$

$$\underline{E}_{C0} = \underline{E}_{A0} \angle 0^0$$

$$\underline{E}_A = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_0$$

$$\underline{E}_B = \underline{E}_{B1} + \underline{E}_{B2} + \underline{E}_0$$

$$\underline{E}_C = \underline{E}_{C1} + \underline{E}_{C2} + \underline{E}_0$$

$$a^3 = 1$$

$$a^4 = a$$

$$a^5 = a^2$$

Переменный ток

$$\begin{array}{l}
 1) \quad \underline{E}_A = \underline{E}_{a1} + \underline{E}_{a2} + \underline{E}_0 \\
 2) \quad \underline{E}_B = \underline{E}_A a^2 + \underline{E}_{A2} a + \underline{E}_0 \quad \left| \begin{array}{l} \times a \\ \times a^2 \end{array} \right. \\
 3) \quad \underline{E}_C = \underline{E}_A a + \underline{E}_A a^2 + \underline{E}_0 \quad \left| \begin{array}{l} \times a^2 \\ \times a \end{array} \right.
 \end{array}$$

Сложим уравнения 1,2,3

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = \underline{E}_{A1} \underbrace{(1 + a + a^2)}_{=0} + \underline{E}_{A2} \underbrace{(1 + a + a^2)}_{=0} + 3\underline{E}_0$$

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

$$\begin{array}{l}
 \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A1}} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A2}} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{0}} \quad 4. \\
 \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{B}} \mathbf{a} = \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A1}} \mathbf{a}^3 + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A2}} \mathbf{a}^2 + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{0}} \mathbf{a} \quad 5. \\
 \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{C}} \mathbf{a}^2 = \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A1}} \mathbf{a}^3 + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A2}} \mathbf{a}^4 + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{0}} \mathbf{a}^2 \quad 6.
 \end{array}$$

Сложим уравнения 4,5,6 системы 1.

$$\underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A}} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{B}} \mathbf{a} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{C}} \mathbf{a}^2 = \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A1}} \underbrace{(1 + \mathbf{a}^3 + \mathbf{a}^3)}_{\mathfrak{3}} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A2}} \underbrace{(1 + \mathbf{a}^2 + \mathbf{a}^4)}_{\mathfrak{0}} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{0}} \underbrace{(1 + \mathbf{a} + \mathbf{a}^2)}_{\mathfrak{0}} =$$

$$\underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A}} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{B}} \mathbf{a} + \underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{C}} \mathbf{a}^2 = 3\underline{\mathbf{E}}_{\mathbf{A1}}$$

$$\underline{\underline{E}}_{A1} = \frac{1}{3} (\underline{\underline{E}}_A + \underline{\underline{E}}_B a + \underline{\underline{E}}_C a^2)$$

$$2. \left\{ \begin{array}{l} \underline{\underline{E}}_A = \underline{\underline{E}}_{A1} + \underline{\underline{E}}_{A2} + \underline{\underline{E}}_0 \quad 7. \\ \underline{\underline{E}}_B a^2 = \underline{\underline{E}}_{A1} a^4 + \underline{\underline{E}}_{A2} a^3 + \underline{\underline{E}}_0 a^2 \quad 8. \\ \underline{\underline{E}}_C a = \underline{\underline{E}}_{A1} a^2 + \underline{\underline{E}}_{A2} a^3 + \underline{\underline{E}}_0 a \quad 9. \end{array} \right.$$

Сложим уравнения 7,8,9 системы 2.

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B a^2 + \underline{E}_C a = \underline{E}_{A1} \underbrace{(1 + a^4 + a^2)}_{\text{0}} + \underline{E}_{A2} \underbrace{(1 + a^3 + a^3)}_{\text{0}} + \underline{E}_0 \underbrace{(1 + a^2 + a)}_{\text{0}} =$$

$$= \underline{E}_A + \underline{E}_B a^2 + \underline{E}_C a = 3\underline{E}_{A2}$$

$$\underline{E}_{A2} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + \underline{E}_B a^2 + \underline{E}_C a)$$

$$\underline{E}_{A1} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + \underline{E}_B a + \underline{E}_C a^2)$$

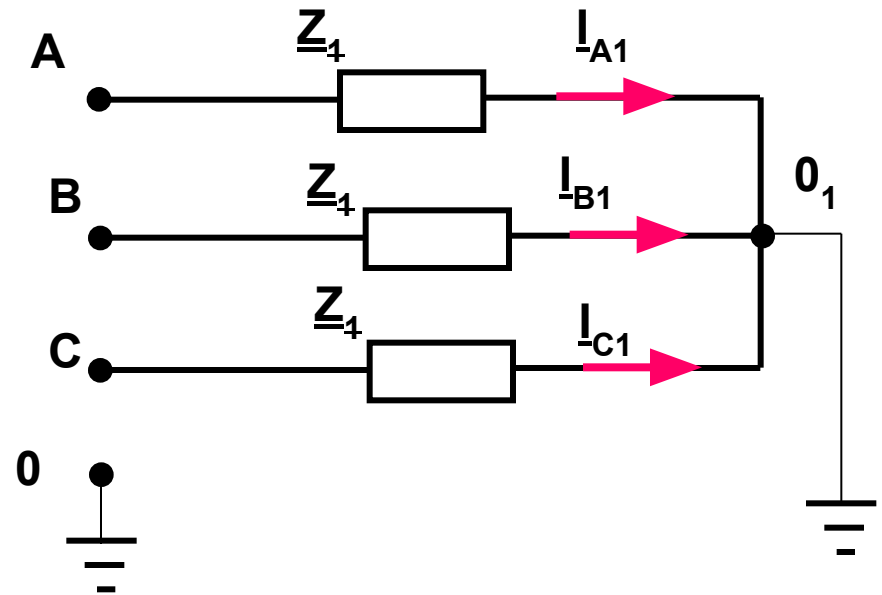
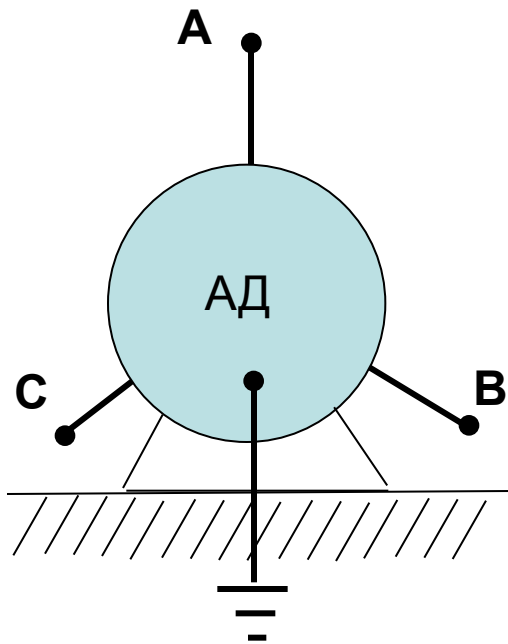
$$\underline{E}_{A2} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + \underline{E}_B a^2 + \underline{E}_C a)$$

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

**Система уравнений для
определения симметричных
составляющих
несимметричной системы
фазных эдс**

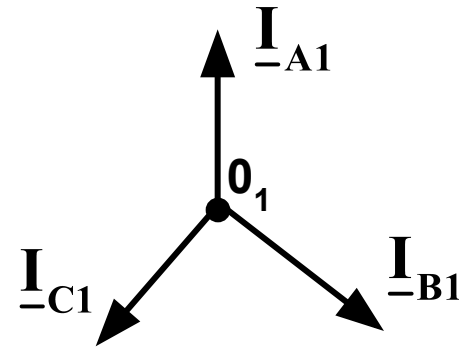
Сопротивления фаз динамической нагрузки для токов различной последовательности

Сопротивления фаз для токов прямой последовательности



На двигатель подается система напряжений прямой последовательности. Отношение фазного напряжения прямой последовательности к фазному току прямой последовательности называется фазным сопротивлением прямой последовательностью.

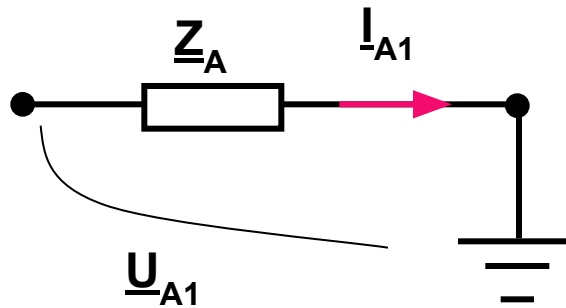
$$\frac{\underline{U}_{A1}}{\underline{I}_{A1}} = \frac{\underline{U}_{B1}}{\underline{I}_{B1}} = \frac{\underline{U}_{C1}}{\underline{I}_{C1}} = \underline{Z}_1$$



Ток в нейтральном проводе, как и в любой симметричной трехфазной цепи, равен нулю.

$$\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{01} = 0$$

Как и в любой симметричной трехфазной цепи, расчет прямой последовательности можно производить на одну фазу. Схема замещения:

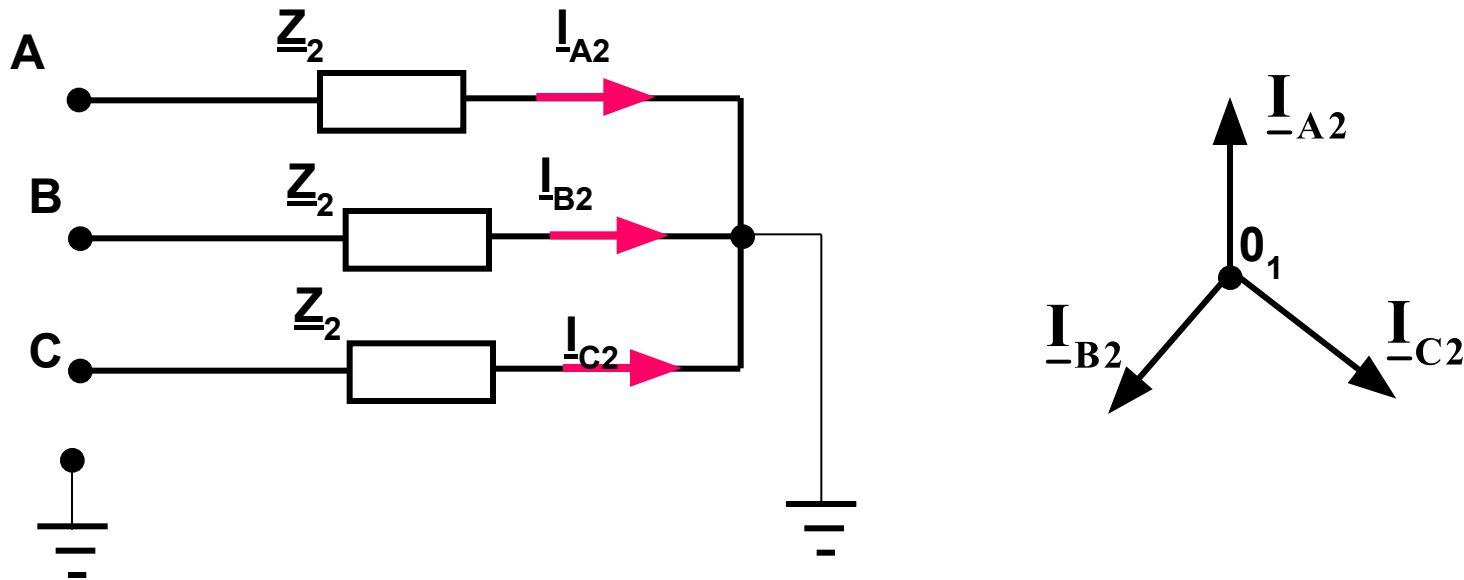


$$\underline{I}_{o1} = 0$$

Сопротивления фаз для токов обратной последовательности

На двигатель подается система напряжений обратной последовательности. Электромагнитное поле при этом начинает вращаться против часовой стрелки. В этом же направлении будет увлекаться и ротор двигателя.

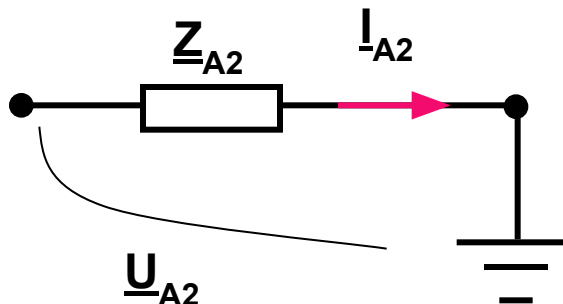
Для того чтобы ротор двигателя вращался в первоначальном (т.е. по часовой стрелке) направлении, к валу ротора пристыковывается другой двигатель. С его помощью ротор испытываемого двигателя вращается в том же , что и в первом случае направлении, и с той же скоростью.



$$\frac{\underline{U}_{A2}}{\underline{I}_{A2}} = \frac{\underline{U}_{B2}}{\underline{I}_{B2}} = \frac{\underline{U}_{C2}}{\underline{I}_{C2}} = \underline{Z}_2$$

Во всех силовых электротехнических устройствах (трехфазных электродвигателях, генераторах и т.д.) $\underline{Z}_2 \ll \underline{Z}_1$ поэтому эксперимент по определению \underline{Z}_2 проводится при пониженном напряжении.

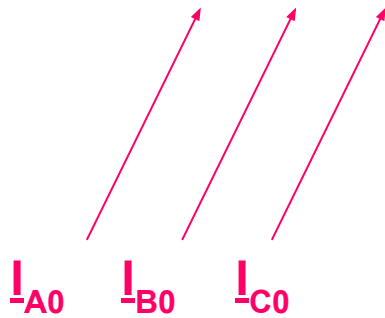
Расчет для обратной последовательности проводится на одну фазу, как для симметричной трехфазной электрической цепи



$$\underline{I}_{o2} = 0$$

Сопротивления фаз для токов нулевой последовательности

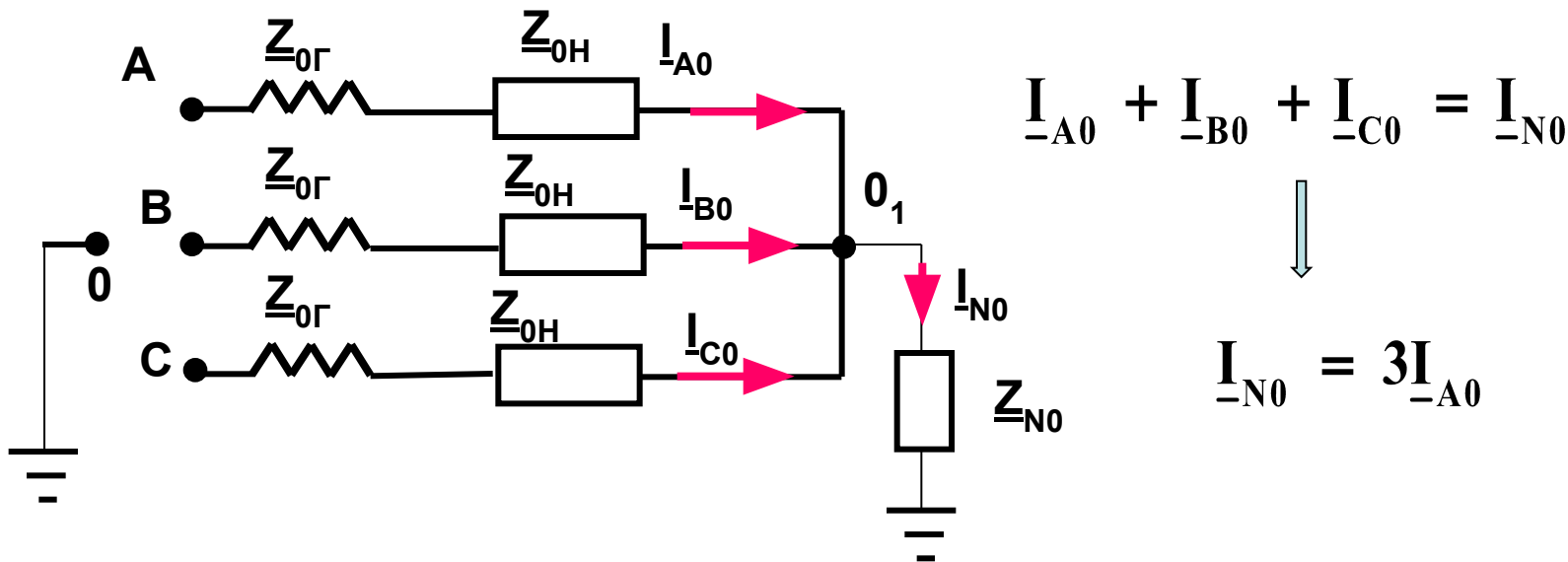
Все фазы двигателя запитываются от однофазной сети, но так как $Z_0 \ll Z_1$ и Z_2 , опыт проводится при пониженном напряжении. Поскольку ротор электродвигателя в данном случае вращаться не будет, его приводят во вращение дополнительным двигателем с той же самой скоростью, что и для опытов прямой и обратной последовательностей. В результате в фазах электродвигателя возникают токи нулевой последовательности.



$$\frac{\underline{U}_{A0}}{\underline{I}_{A0}} = \frac{\underline{U}_{B0}}{\underline{I}_{B0}} = \frac{\underline{U}_{C0}}{\underline{I}_{C0}} = \underline{Z}_{A0}$$

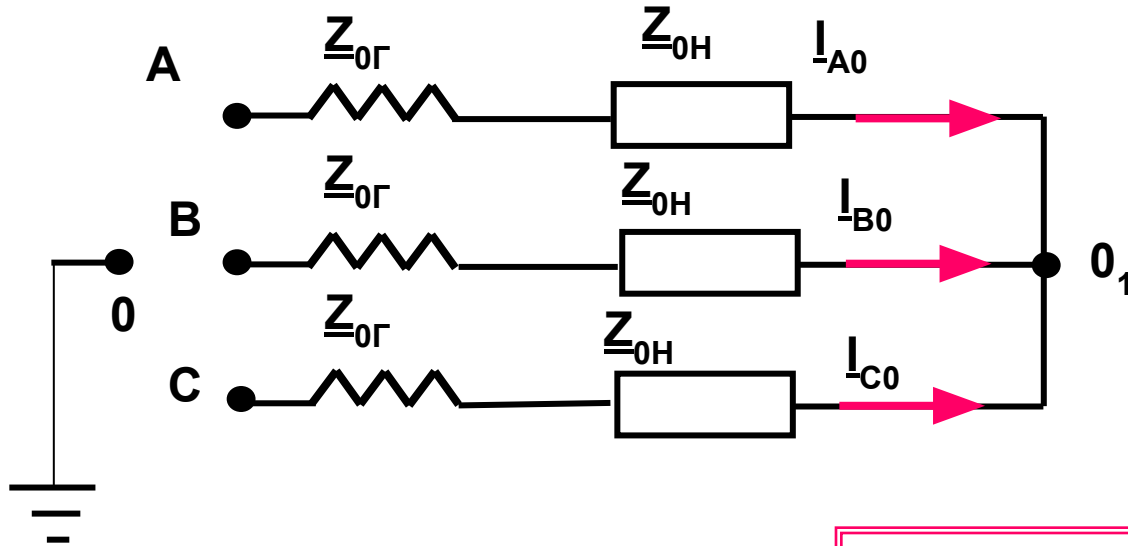
Режим нулевой последовательности отличается от режима прямой и обратной последовательностей рядом особенностей

а) с нулевым проводом



В трехфазной электрической цепи при несимметричной системе фазных напряжений генератора по нулевому проводу протекает **утроенный фазный ток нулевой последовательности**.

б) Без нулевого провода

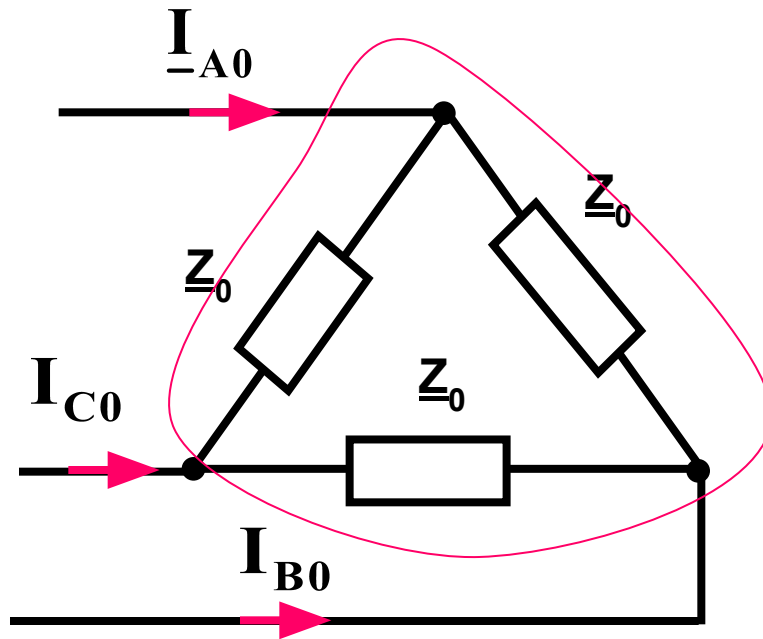


$$\underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{C0} = \underline{I}_{N0} = 3\underline{I}_{A0} = 0$$

$$\underline{I}_{A0} = 0$$

При соединении звезда – звезда без нулевого провода токов нулевой последовательности в трехфазной цепи нет.

с) рассмотрим участок цепи соединенный треугольником



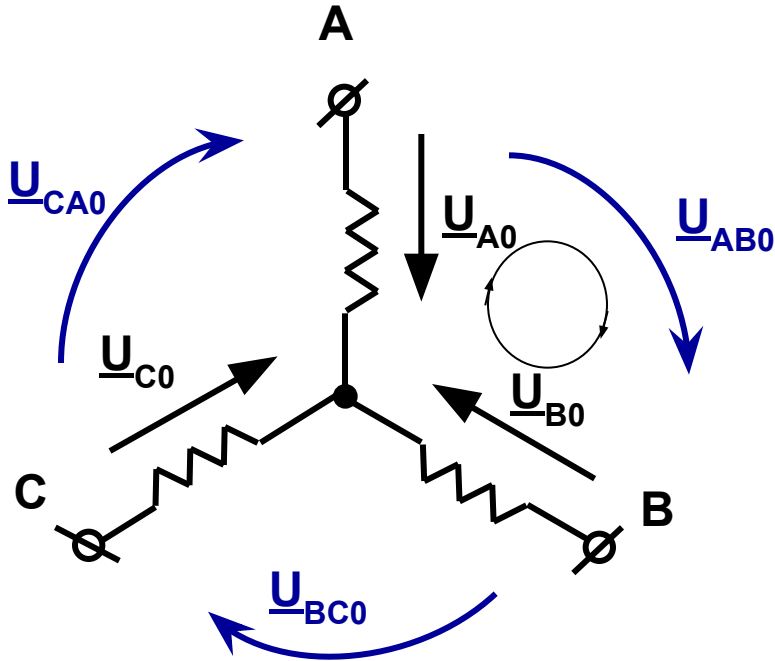
$$\underline{I}_{A0} + \underline{I}_{B0} + \underline{I}_{C0} = 0$$

$$\underline{I}_{A0} = \underline{I}_{B0} = \underline{I}_{C0} = \underline{I}_0$$

$$3\underline{I}_0 = 0 \Rightarrow \underline{I}_0 = 0$$

При соединении нагрузки треугольником **токов нулевой последовательности в ней нет.**

Переменный ток



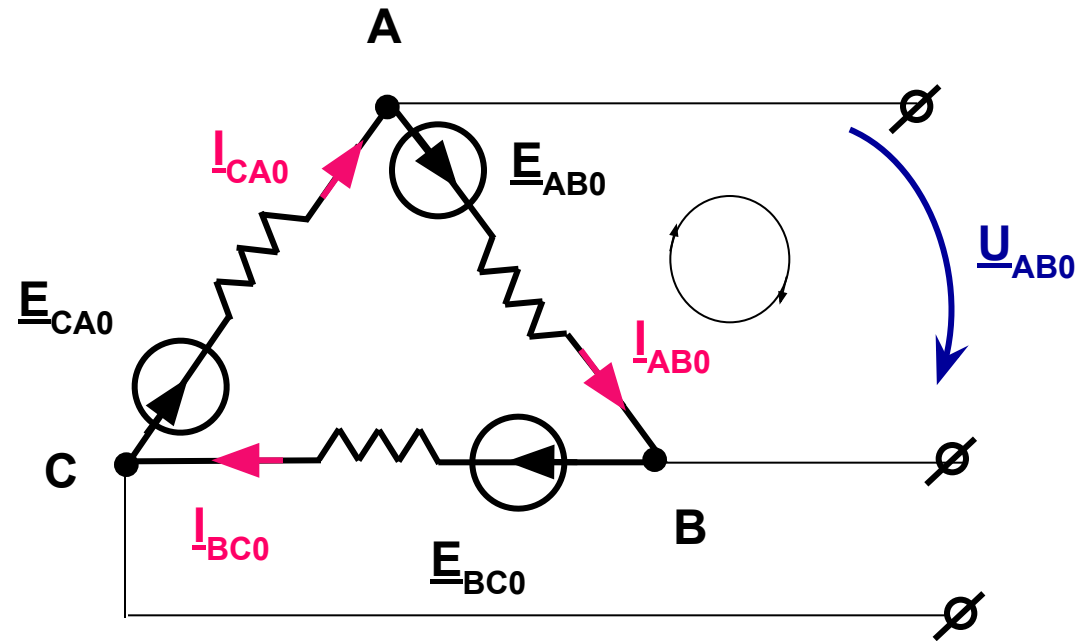
$$\underline{U}_{AB_0} + \underline{U}_{b_0} - \underline{U}_{A_0} = 0$$

$$\underline{U}_{b_0} = \underline{U}_{A_0}$$

$$\underline{U}_{AB_0} = 0$$

При соединении генератора звезда - звезда в линейных напряжениях отсутствуют напряжение нулевой последовательности.

Переменный ток

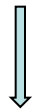


$$\underline{E}_{AB0} = \underline{E}_{BC0} = \underline{E}_{CA0} = \underline{E}_0$$

$$\underline{I}_{AB0} = \underline{I}_{BC0} = \underline{I}_{CA0} = \underline{I}_0$$

$$\underline{E}_{AB0} + \underline{E}_{BC0} + \underline{E}_{CA0} = 3\underline{I}_0 \underline{Z}_{0\tilde{A}} \quad 3\underline{E}_0 = 3\underline{I}_0 \underline{Z}_{0\tilde{A}} \quad \underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_0}{\underline{Z}_{0\tilde{A}}}$$

$$\underline{U}_{AB0} - \underline{I}_0 \underline{Z}_{0\tilde{A}} = -\underline{\dot{A}}_{AB0}$$



Переменный ток

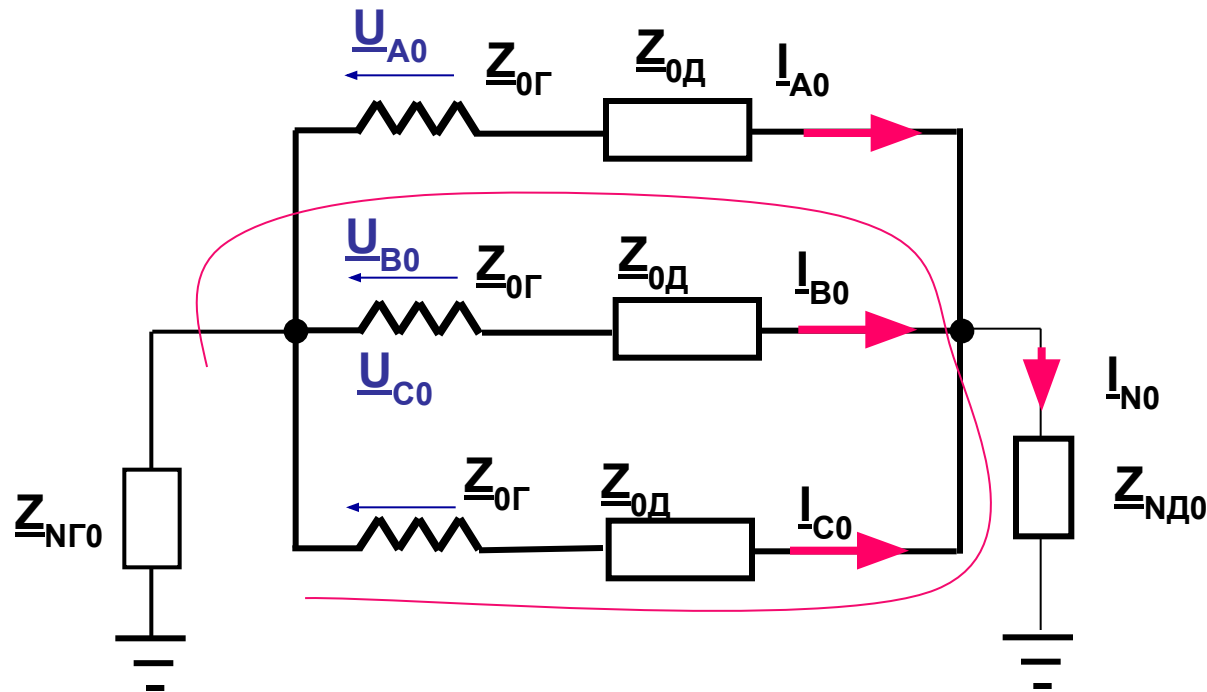
$$\underline{U}_{AB0} = -\underline{E}_{AB0} + \frac{\underline{E}_{AB0}}{\underline{Z}_{\tilde{A}0}} \underline{Z}_{\tilde{A}0} = 0$$

$$\underline{U}_{\ddot{E}0} = 0$$



В линейных напряжениях генератора **никогда** не существует нулевой последовательности напряжений

Рассмотрим трехфазную электрическую цепь с несимметричным генератором



$Z_{NГ0}$ - сопротивление нейтрали генератора нулевой последовательности.

$Z_{NД0}$ - сопротивление нейтрали двигателя нулевой последовательности.

В симметричном режиме нулевой последовательности комплексные токи в фазах равны. Поэтому ток в нейтральном проводе равен

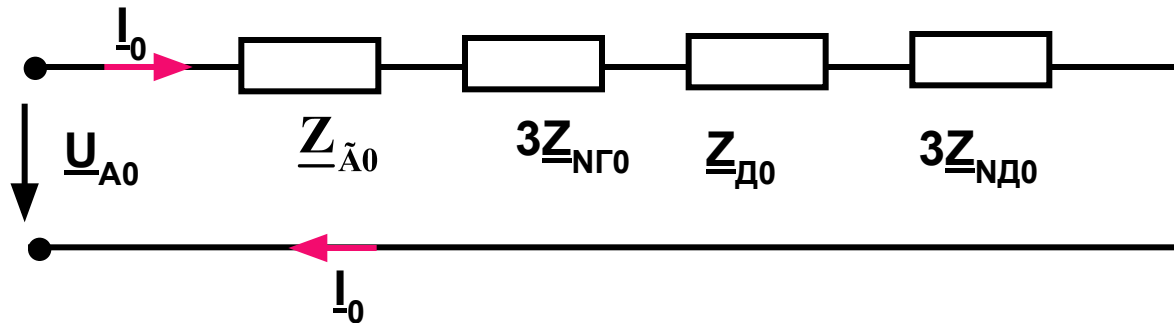
$$I_{N0} = 3I_0$$

где I_0 - ток в фазе цепи.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура : **нейтраль генератора, фаза A, нейтраль двигателя**

$$1. \quad \underline{U}_{A0} = \underline{I}_0 \underline{Z}_{\tilde{A}0} + 3\underline{I}_0 \underline{Z}_{N\tilde{A}0} + \underline{I}_0 \underline{Z}_{\ddot{A}0} + 3\underline{I}_0 \underline{Z}_{N\ddot{A}0}$$

Уравнению (1) соответствует следующая электрическая цепь

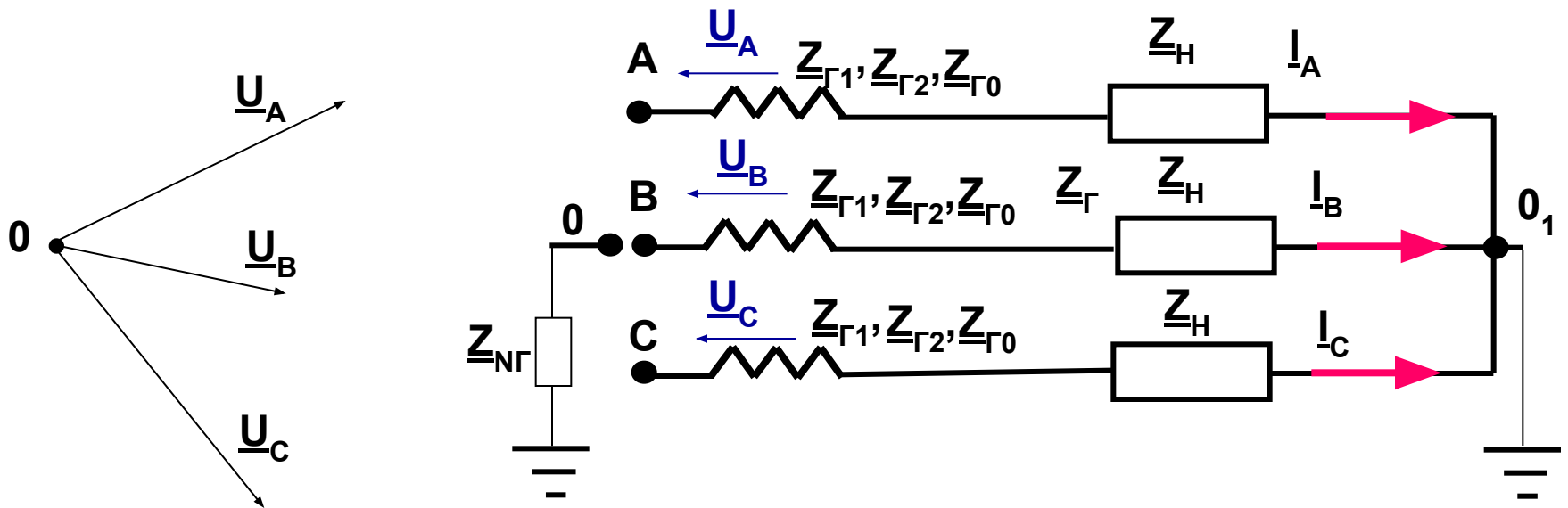


Выводы

1. При соединении звезда – звезда без нулевого провода токов нулевой последовательности в трехфазной цепи нет.
2. При соединении нагрузки треугольником токов нулевой последовательности в ней нет.
3. При соединении генератора звезда - звезда в линейных напряжениях отсутствуют напряжение нулевой последовательности.
4. При соединении генератора треугольником в линейных напряжениях отсутствуют напряжение нулевой последовательности.
5. В линейных напряжениях генератора никогда не существует нулевой последовательности напряжений
6. В схеме замещения фазы для фазного тока нулевой последовательности присутствует утроенное значение сопротивления нейтрального провода.

Расчет простейших электрических цепей методом симметричных составляющих

Пусть задана несимметричная система ЭДС и симметричная статическая нагрузка.



1. По ниже приведенным формулам рассчитываем симметричные составляющие напряжений генератора.

$$\underline{E}_{A1} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + \underline{E}_B a + \underline{E}_C a^2)$$

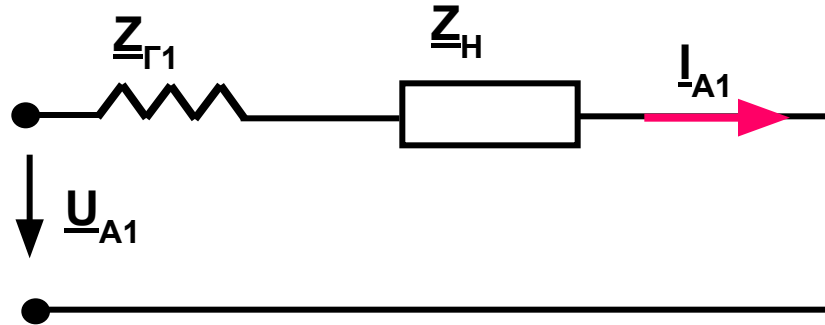
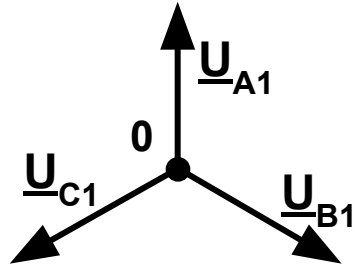
$$\underline{E}_{A2} = \frac{1}{3} (\underline{E}_A + \underline{E}_B a^2 + \underline{E}_C a)$$

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

2. Для каждой последовательности составляем расчетную эквивалентную расчетную схему для фазы А

а) прямая последовательность- симметричная система фазных напряжений, следовательно ее расчет не отличается от расчета обычной трехфазной цепи, работающей в симметричном режиме.

Переменный ток



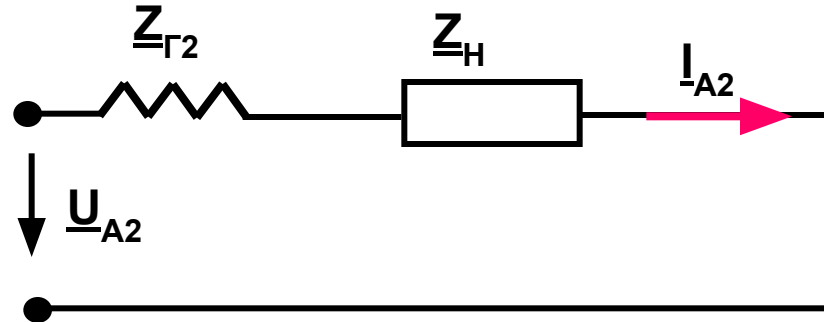
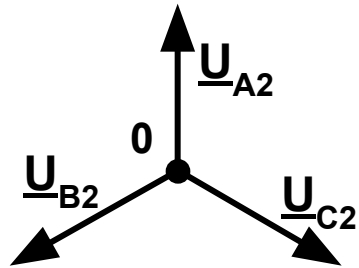
$$\underline{I}_{-A1} = \frac{\underline{U}_{-A1}}{\underline{Z}_{\tilde{A}1} + \underline{Z}_H}$$

$$\underline{I}_{-N1} = 0$$

$$\underline{I}_{-B1} = \underline{I}_{-A1} \angle -120^\circ$$

$$\underline{I}_{-C1} = \underline{I}_{-A1} \angle +120^\circ$$

б) обратная последовательность отличается от прямой только чередованием фаз, поэтому ее расчет аналогичен.



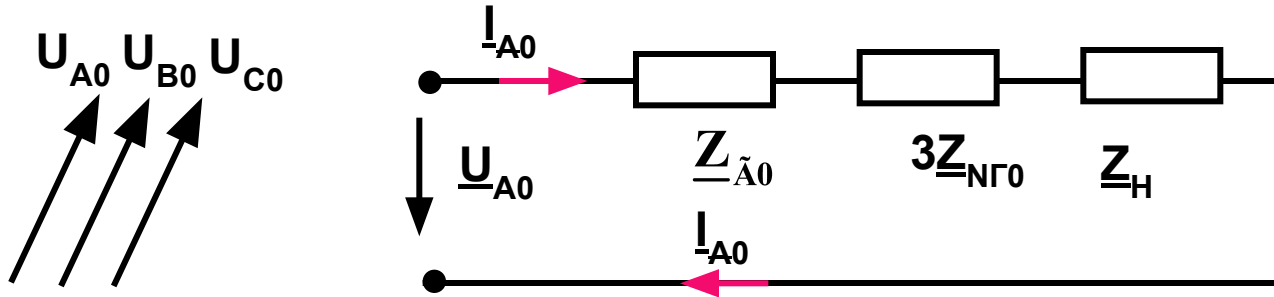
$$\underline{I}_{-A2} = \frac{\underline{U}_{A2}}{\underline{Z}_{\tilde{A}2} + \underline{Z}_H}$$

$$\underline{I}_{-B2} = \underline{I}_{-A2} \angle + 120^0$$

$$\underline{I}_{-C2} = \underline{I}_{-A2} \angle - 120^0$$

$$\underline{I}_{-N2} = 0$$

с) Нулевая последовательность



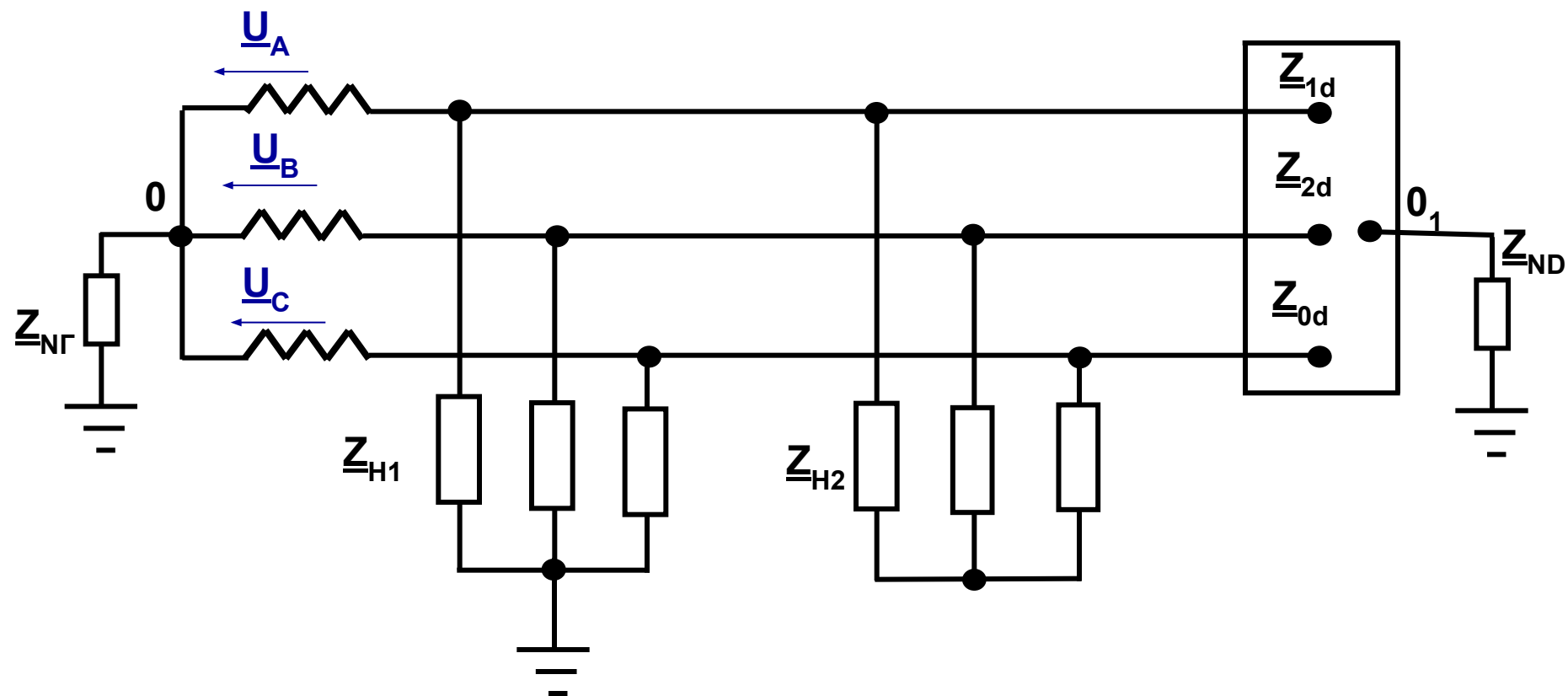
$$\underline{I}_{-A0} = \frac{\underline{U}_{A0}}{\underline{Z}_{\tilde{A}0} + \underline{Z}_H + 3\underline{Z}_{N\tilde{A}0}}$$

$$\underline{I}_{-A} = \underline{I}_{-A1} + \underline{I}_{-A2} + \underline{I}_{-A0}$$

$$\underline{I}_{-B} = a^2 \underline{I}_{-A1} + a \underline{I}_{-A2} + \underline{I}_{-A0}$$

$$\underline{I}_{-B} = a \underline{I}_{-A1} + a^2 \underline{I}_{-A2} + \underline{I}_{-A0}$$

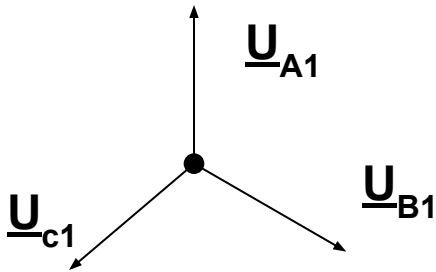
Расчет сложных трехфазных электрических цепей с динамической нагрузкой методом симметричных составляющих



Задана несимметричная система фазных напряжений генератора и его параметры $\underline{Z}_{1Г}$, $\underline{Z}_{2Г}$, $\underline{Z}_{0Г}$, а также симметричная статическая ($\underline{Z}_{Н1}$, $\underline{Z}_{Н2}$) и динамическая нагрузка (двигатель с параметрами \underline{Z}_{1d} , \underline{Z}_{2d} , \underline{Z}_0).

1. Схема прямой последовательности.

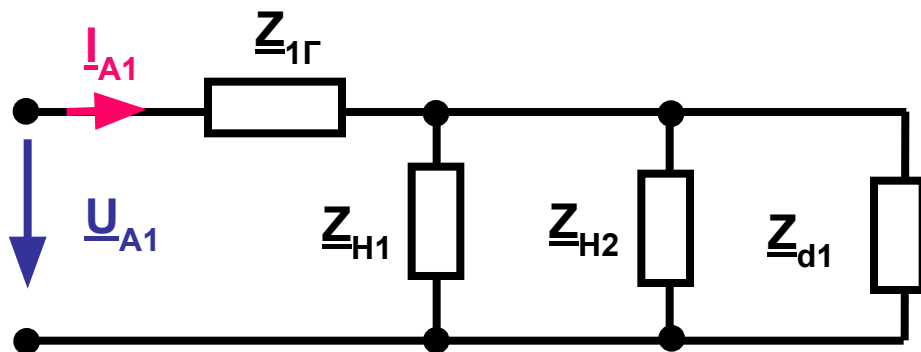
Схема прямой последовательности ничем не отличается от схем замещения фазы А в симметричных трехфазных цепях, находящихся под воздействием систем напряжений прямой последовательности



а) все нагрузки и обмотки генератора, соединенные в треугольник, эквивалентно преобразуем в звезды;

в) искусственно электрически соединяют общей шиной все нейтральные точки генераторов и приемников;

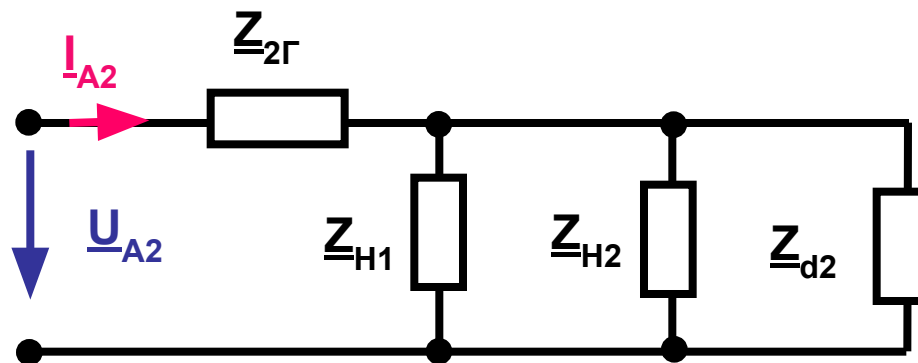
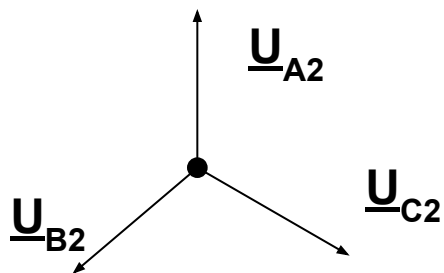
с) из полученной схемы убираем все элементы, не относящиеся к фазе А.



Расчетная схема замещения трехфазной цепи для фазы А

Расчет полученной схемы осуществляется по закону Ома и первому закону Кирхгофа.

2. Обратная последовательность.



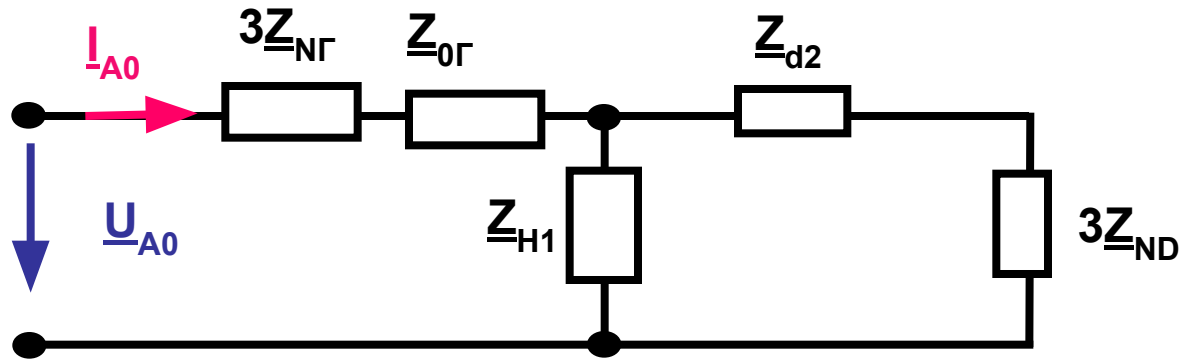
Расчет схемы обратной последовательности принципиально не отличается от расчета прямой последовательности, так как вновь цепь находится под воздействием симметричной тройки векторов напряжений.

3. Нулевая последовательность.

Алгоритм создания схемы:

- а) убираем из схемы все нагрузки, соединенные треугольником
- в) убираем из схемы все нагрузки, соединенные звездой без нулевого провода
- г) если звезда имеет нулевой провод с сопротивлением Z_N , то последовательно с сопротивлением фаз включают сопротивление $3Z_N$, положив при этом сопротивление в нейтральном проводе равным нулю.
- д) удаляем из схемы все элементы, не относящиеся к фазе А.

Переменный ток

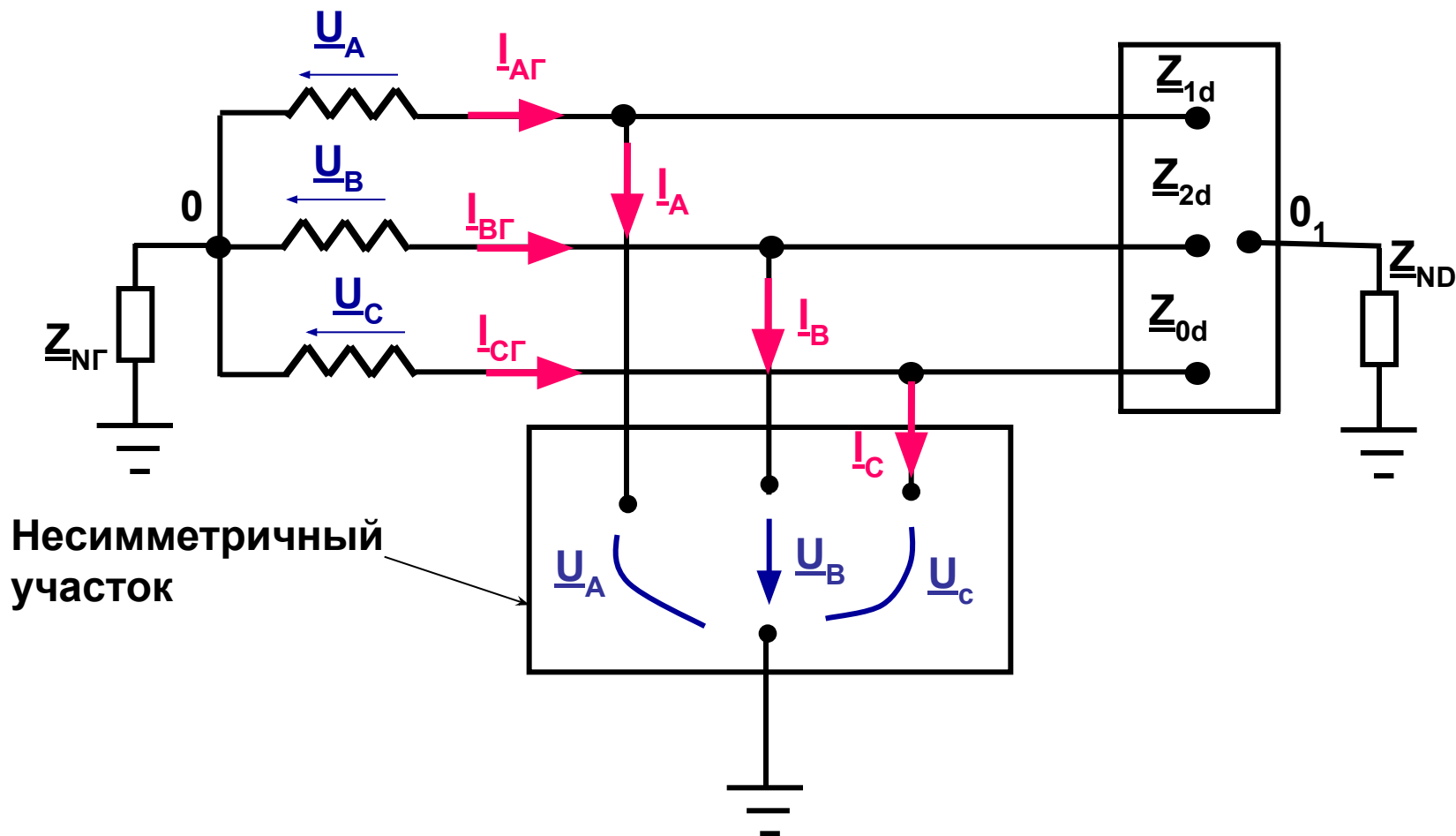


Расчет трехфазной электрической цепи с динамической нагрузкой и различными видами несимметрии.

Рассмотрим симметричную трехфазную цепь с динамической нагрузкой, содержащую 1 участок несимметрии. Обычно рассматривается два вида симметрии:

- 1) поперечную
- 2) продольную

Рассмотрим цепь с поперечным участком несимметрии



Анализ проводим при условии, что система фазных напряжений генератора есть симметричная система прямой последовательности (т.е. у генератора отсутствуют напряжения обратной и нулевой последовательности).

Этапы расчета.

1.

Переменный ток

2003г.

Переменный ток

2003г.