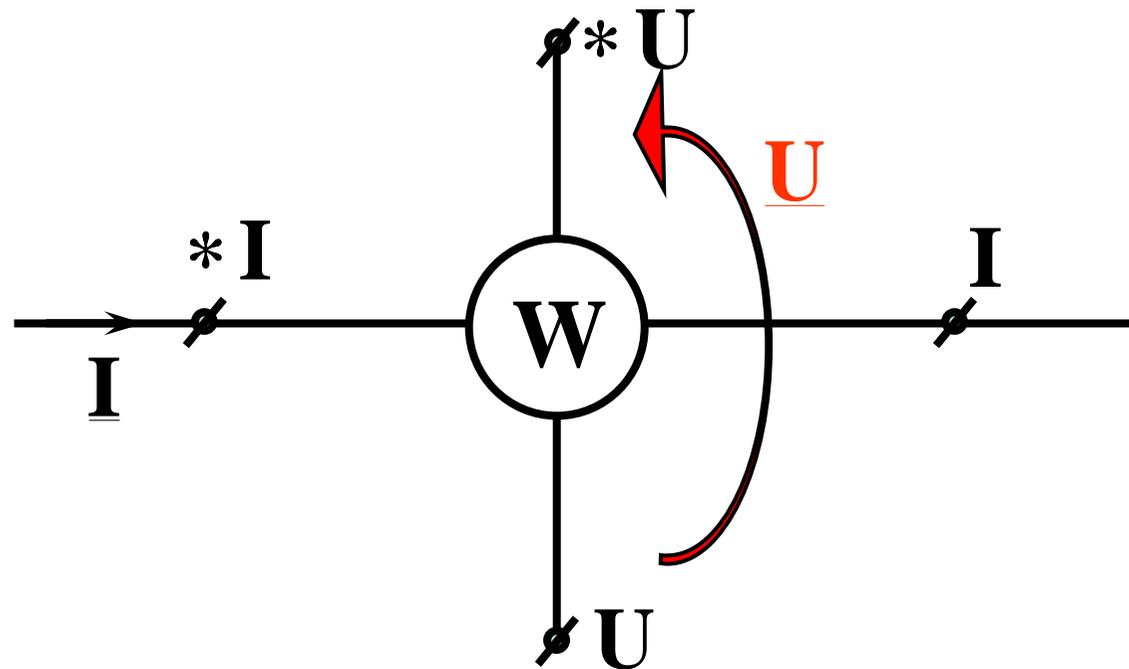


13 лекция

Измерение мощности в трехфазных цепях

Измерение мощности
осуществляется
ваттметрами, которые имеют
две обмотки: токовую
обмотку с малым
сопротивлением и обмотку
напряжения с большим
сопротивлением

- При этом ваттметр имеет четыре клеммы:



Показание ваттметра:

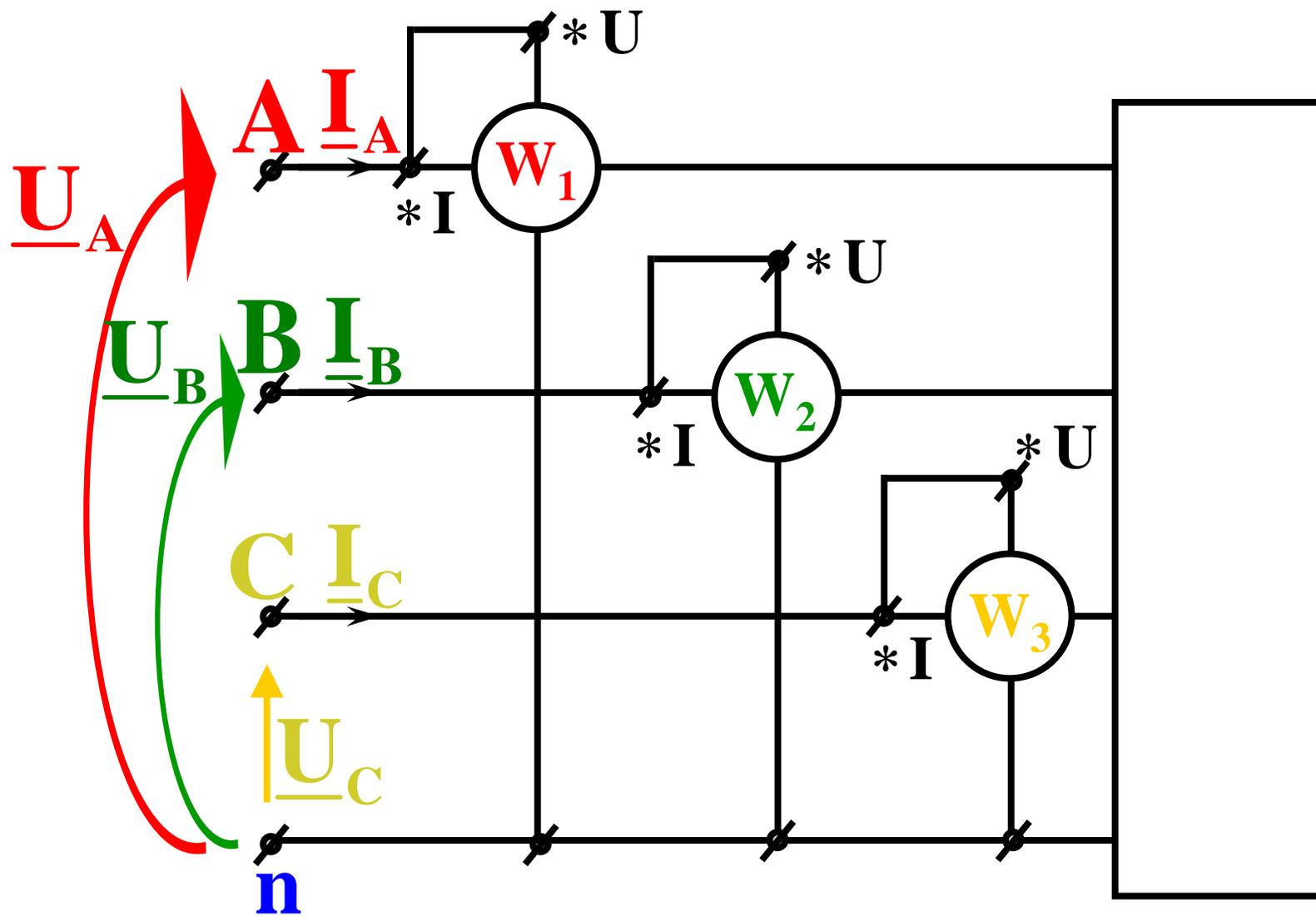
$$P_w = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \text{ Вт}$$

где $\underline{I} = I \cdot e^{j\beta}, \text{ А}$

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\alpha}, \text{ В}$$

$$\varphi = \alpha - \beta$$

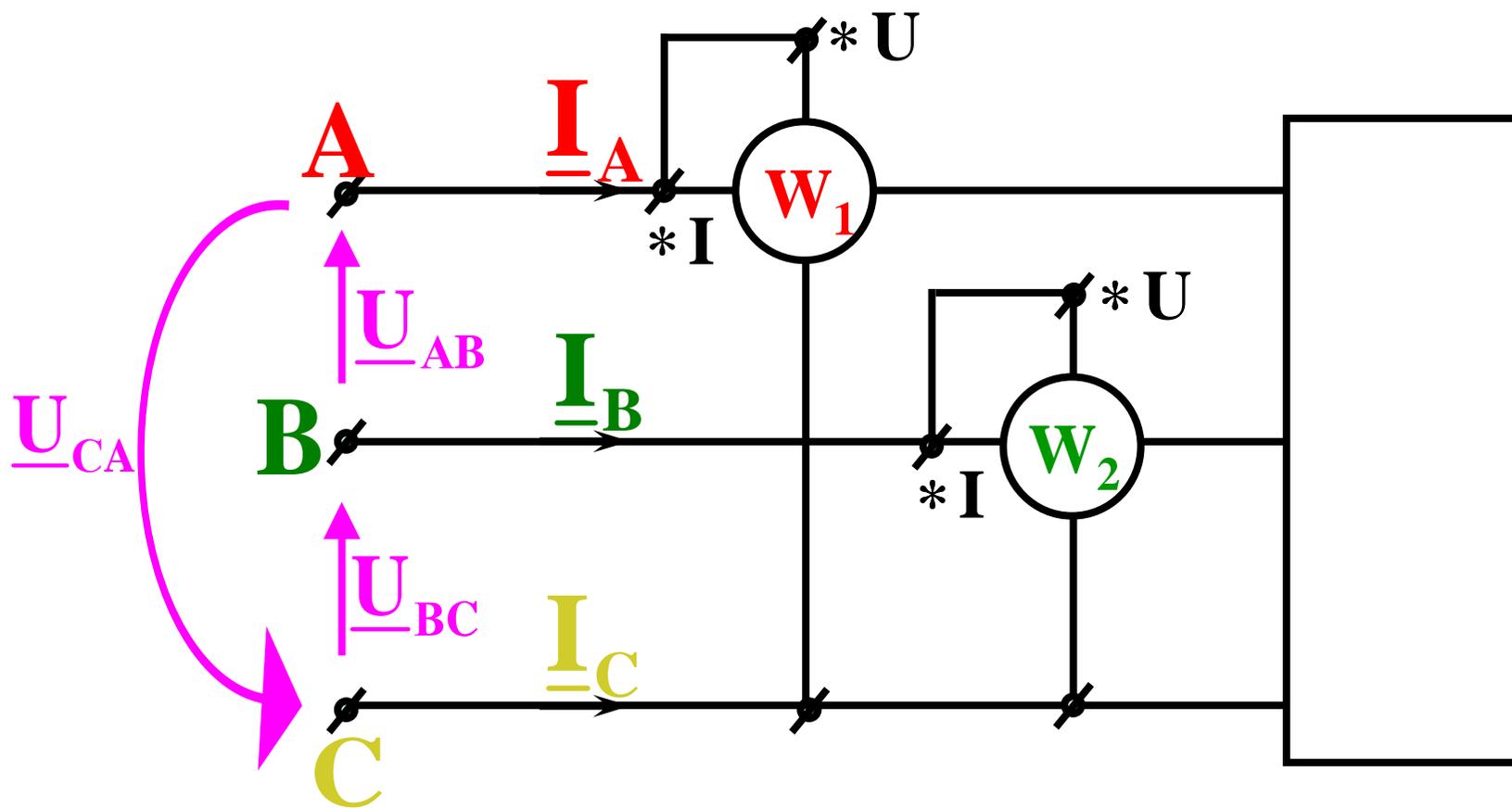
1. Измерение суммарной активной мощности трехфазной цепи с нулевым проводом



$$\begin{aligned}
P &= P_A + P_B + P_C = P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3} = \\
&= U_A I_A \cos(\underline{U}_A \overset{\wedge}{\underline{I}}_A) + U_B I_B \cos(\underline{U}_B \overset{\wedge}{\underline{I}}_B) + \\
&\quad + U_C I_C \cos(\underline{U}_C \overset{\wedge}{\underline{I}}_C), \text{ Вт}
\end{aligned}$$

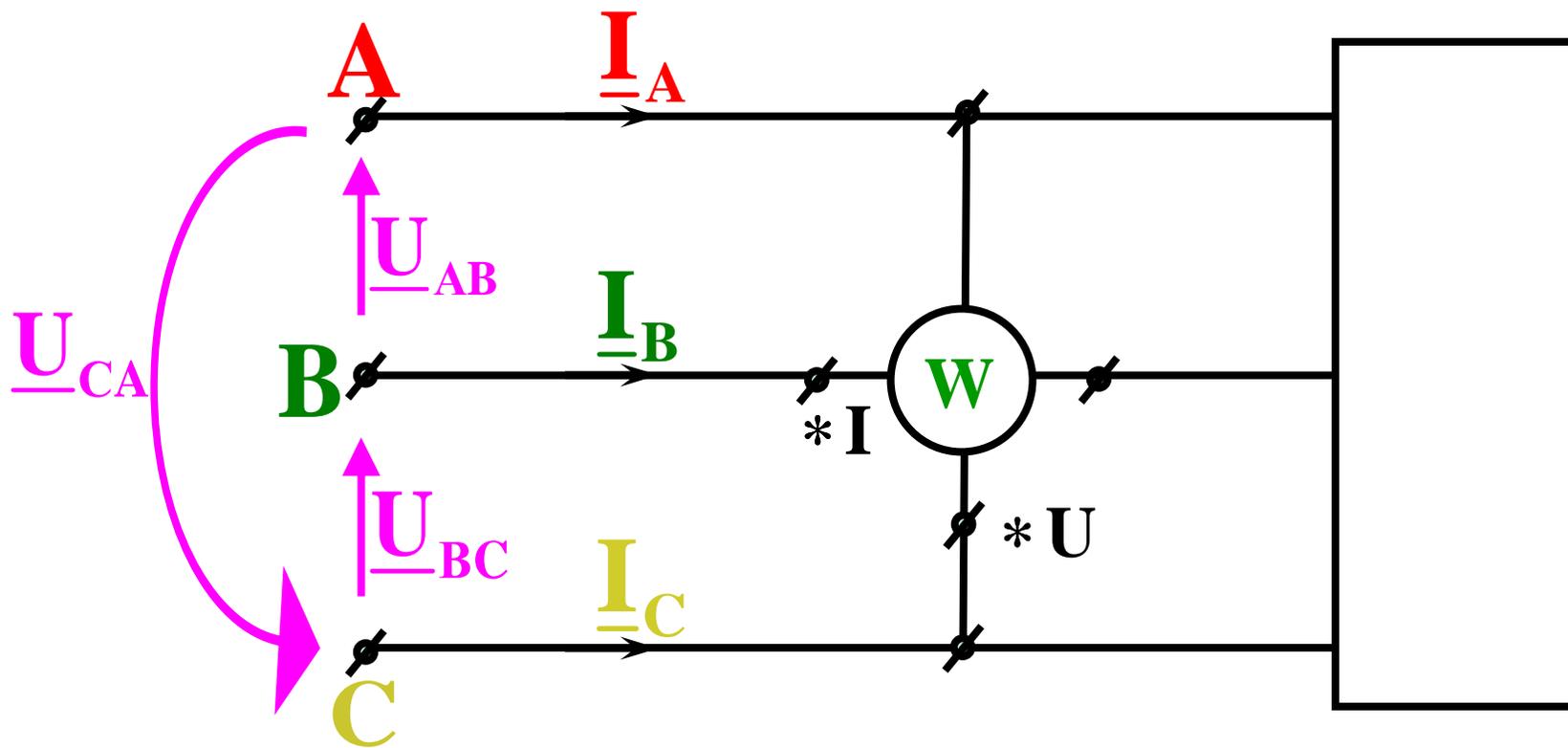
2. Измерение суммарной активной мощности трехфазной цепи без нулевого провода

**Измерение мощности
осуществляется **двумя**
ваттметрами, причем **одна из**
трех ВОЗМОЖНЫХ **схем**
следующая:**



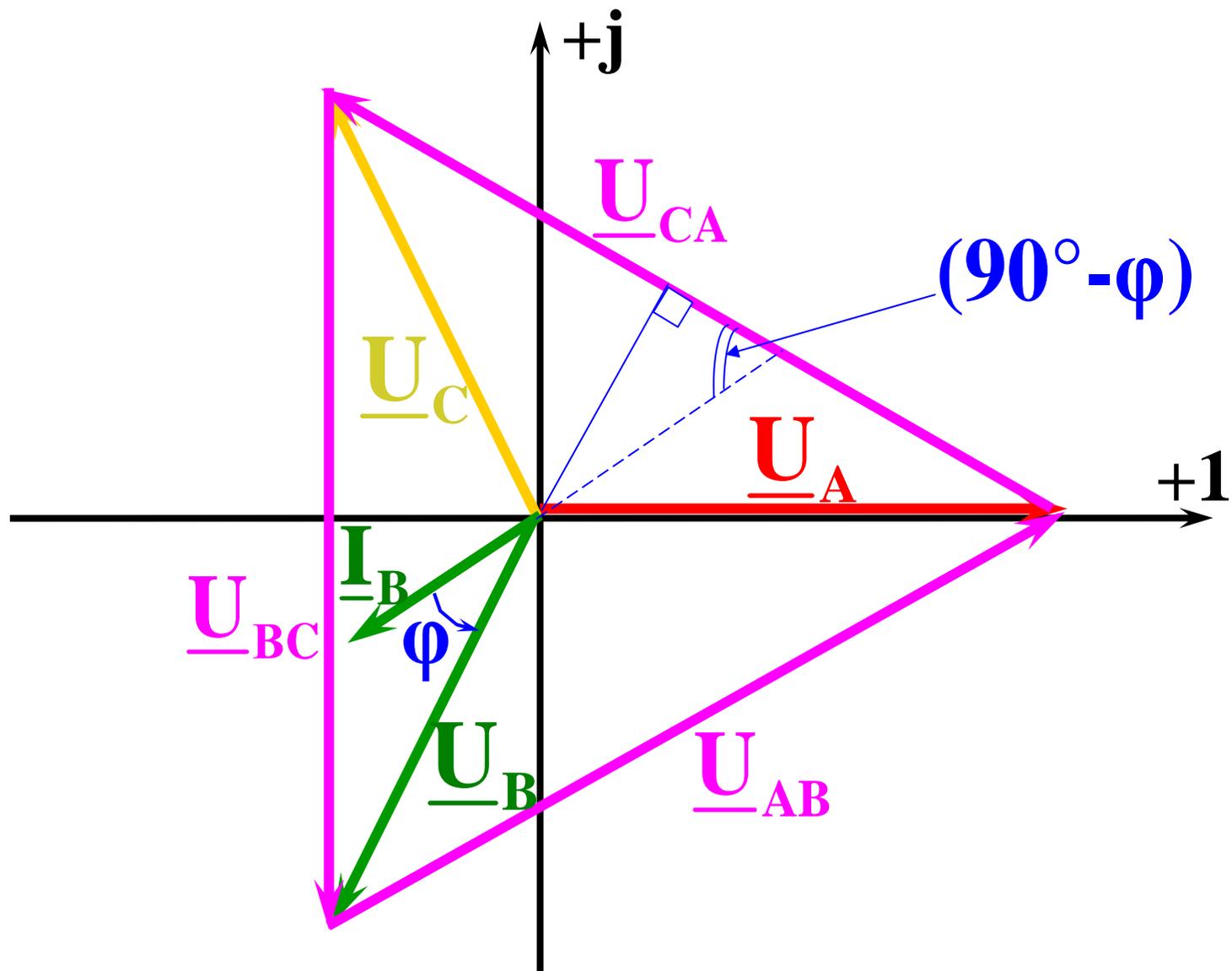
$$\begin{aligned}
 P = P_{W_1} + P_{W_2} = & U_{CA} I_A \cos((-\underline{U}_{CA}) \hat{\underline{I}}_A) + \\
 & + U_{BC} I_B \cos(\underline{U}_{BC} \hat{\underline{I}}_B), \text{ Вт}
 \end{aligned}$$

3. Измерение суммарной реактивной мощности трехфазной цепи без нулевого провода в симметричном режиме



$$Q = \sqrt{3}U_{\Lambda}I_{\Lambda}\sin\varphi = \sqrt{3} \cdot P_W$$

$$\begin{aligned} P_W &= U_{CA}I_B \cos \left[\overset{\wedge}{\underline{U}_{CA} \underline{I}_B} \right] = \\ &= U_{\Lambda}I_{\Lambda} \cos(90^{\circ} - \varphi) = \\ &= U_{\Lambda}I_{\Lambda} \sin\varphi, \text{ var} \end{aligned}$$



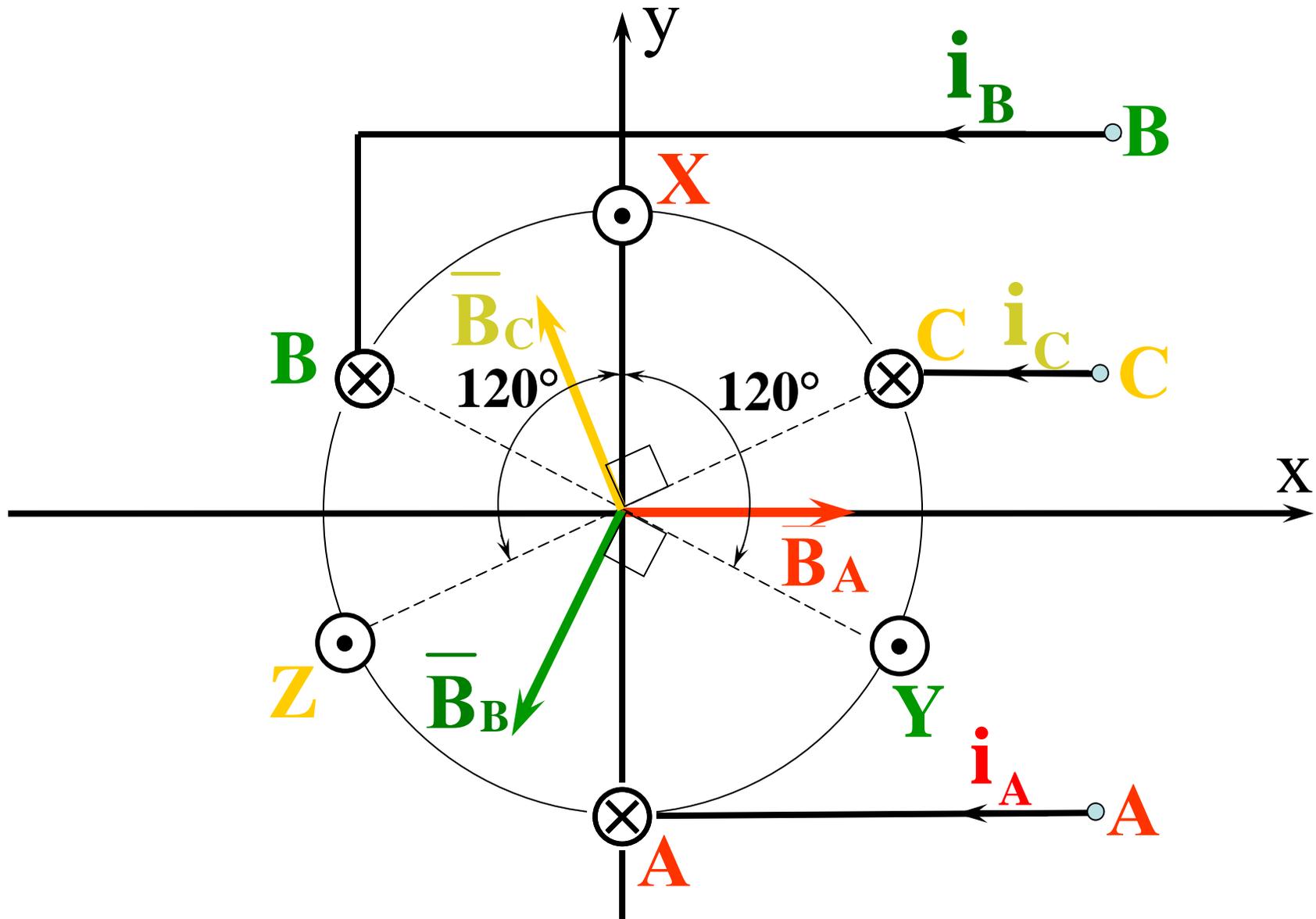
Круговое вращающееся магнитное поле

Круговое **вращающееся
магнитное поле может быть
создано при помощи
трехфазного тока, что
является одним из его
важнейших технических
достоинств**

Присоединим к трехфазной цепи **три одинаковые неподвижные **катушки** в виде прямоугольных рамок, плоскости которых сдвинуты в пространстве по отношению к друг другу на **120 градусов****

При симметричной системе фазных токов i_A, i_B, i_C эти катушки будут создавать индукции магнитного поля

B_A, B_B, B_C



☛ Фазные токи:

$$i_A = I_m \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

☛ Фазные индукции магнитного поля:

$$B_A = B_m \sin \omega t$$

$$B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$B_C = B_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Проекция суммарного вектора магнитной индукции:

1. Проекция на ось X:

$$\begin{aligned} B_X &= B_{AX} + B_{BX} + B_{CX} = \\ &= B_m \sin \omega t + B_m \cos 240^\circ \sin(\omega t - 120^\circ) + \\ &\quad + B_m \cos 120^\circ \sin(\omega t + 120^\circ) = \\ &= 1,5 B_m \sin \omega t, \text{ Тл} \end{aligned}$$

2. Проекция на ось Y:

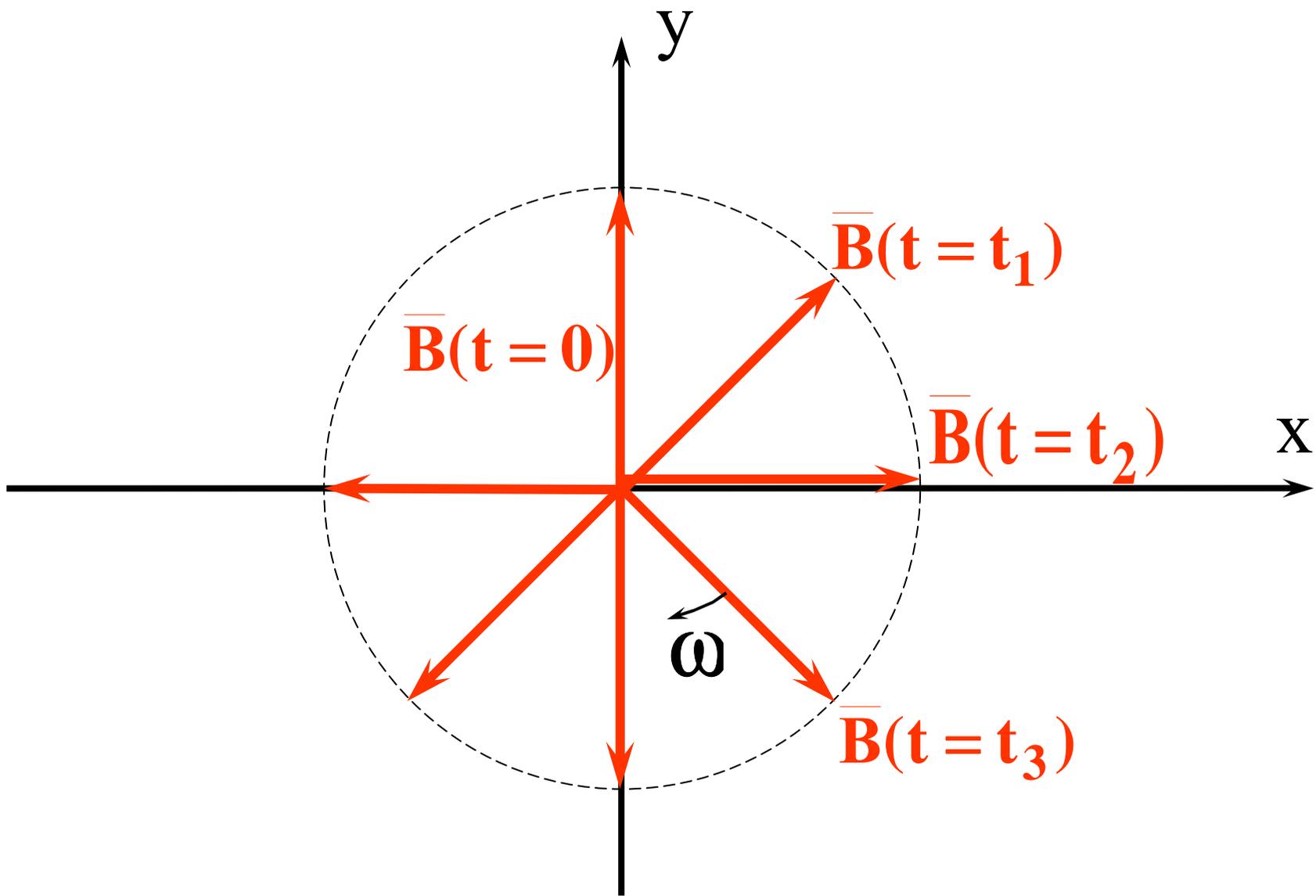
$$\begin{aligned} \mathbf{B}_Y &= \mathbf{B}_{AY} + \mathbf{B}_{BY} + \mathbf{B}_{CY} = \\ &= \mathbf{0} + \mathbf{B}_m \sin 240^\circ \sin(\omega t - 120^\circ) + \\ &+ \mathbf{B}_m \sin 120^\circ \sin(\omega t + 120^\circ) = \\ &= \mathbf{1,5B}_m \cos \omega t, \text{ Тл} \end{aligned}$$

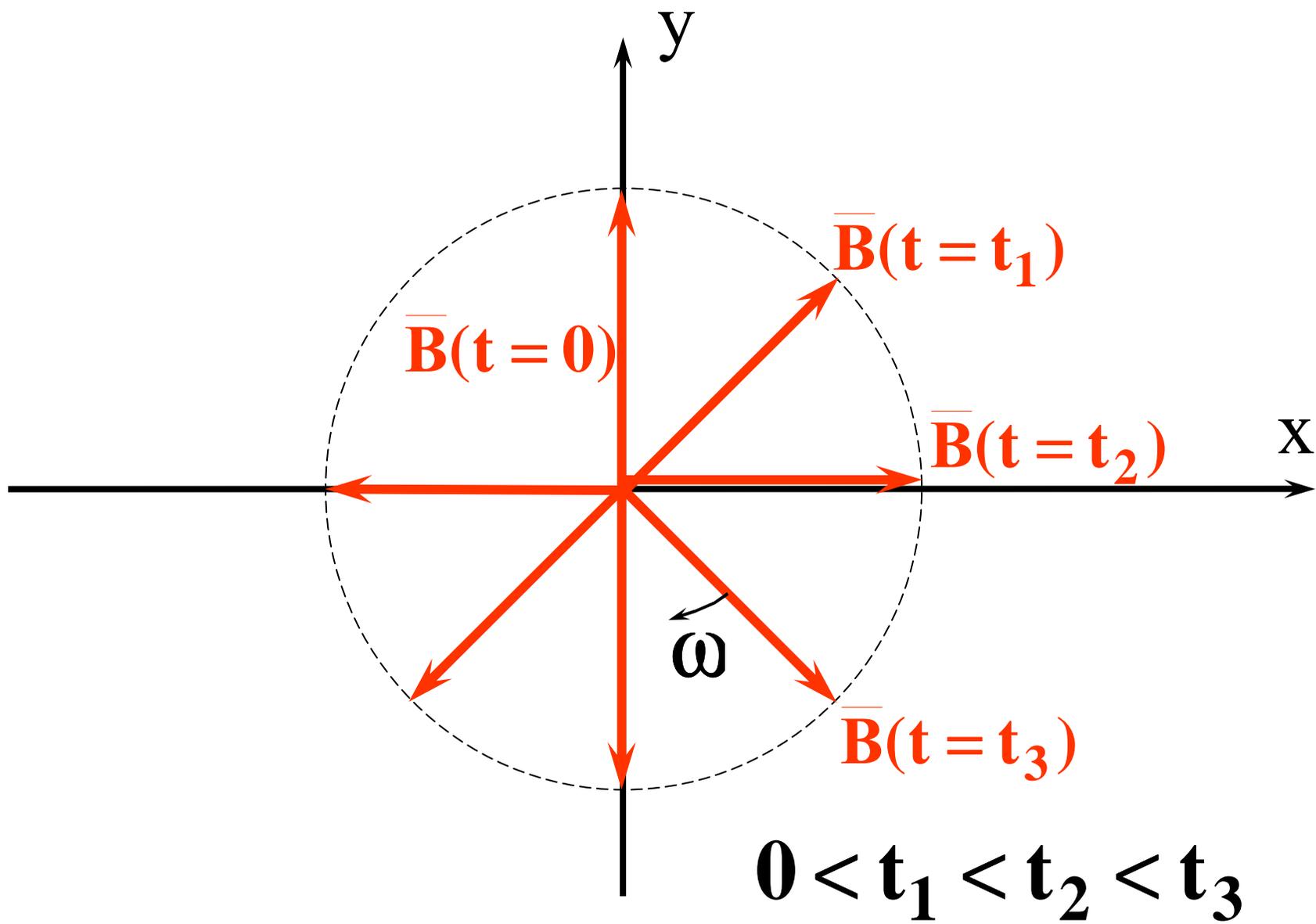
Величина суммарной индукции не
зависит от **времени**

$$B = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2} = 1,5 B_m$$

Но B_X и B_Y зависят от времени,

поэтому \overline{B} **вращается**





Если в это **вращающееся
магнитное поле поместить
металлический цилиндр
(**ротор**), то за счет
взаимодействия наводимых
в нем **вихревых токов** с
магнитным полем цилиндр
начнет **вращаться** –
асинхронный двигатель**

Метод симметричных составляющих

**Метод симметричных
составляющих** используется
для расчета
**несимметричного
(аварийного) режима**
трехфазных цепей с
взаимной индуктивностью,
содержащих **двигатели и
генераторы, линии и
трансформаторы**

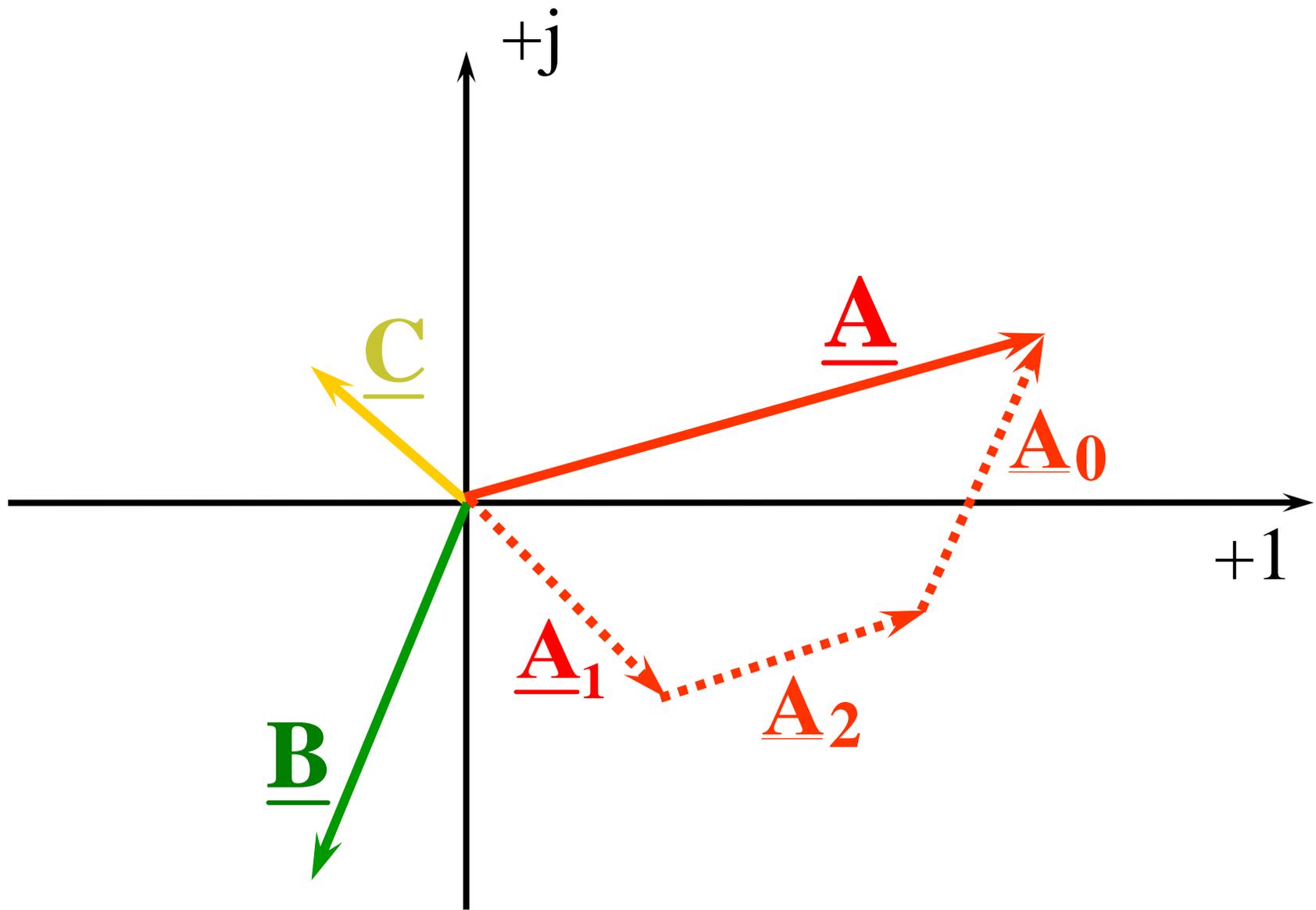
**В трехфазных цепях
ИНДУКТИВНУЮ СВЯЗЬ между
фазами удобно учесть,
используя МЕТОД
СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

Этот **метод** основан на
разложении трехфазной
несимметричной системы
A, B, C на **симметричные**
составляющие **прямой** (**A₁, **B₁, **C₁**),
обратной (**A₂, **B₂, **C₂**),
и **нулевой** (**A₀, **B₀, **C₀**)
последовательности************

$$\underline{\mathbf{A}} = \mathbf{A} e^{j\alpha} = \underline{\mathbf{A}}_1 + \underline{\mathbf{A}}_2 + \underline{\mathbf{A}}_0$$

$$\underline{\mathbf{B}} = \mathbf{B} e^{j\beta} = \underline{\mathbf{B}}_1 + \underline{\mathbf{B}}_2 + \underline{\mathbf{B}}_0$$

$$\underline{\mathbf{C}} = \mathbf{C} e^{j\gamma} = \underline{\mathbf{C}}_1 + \underline{\mathbf{C}}_2 + \underline{\mathbf{C}}_0$$

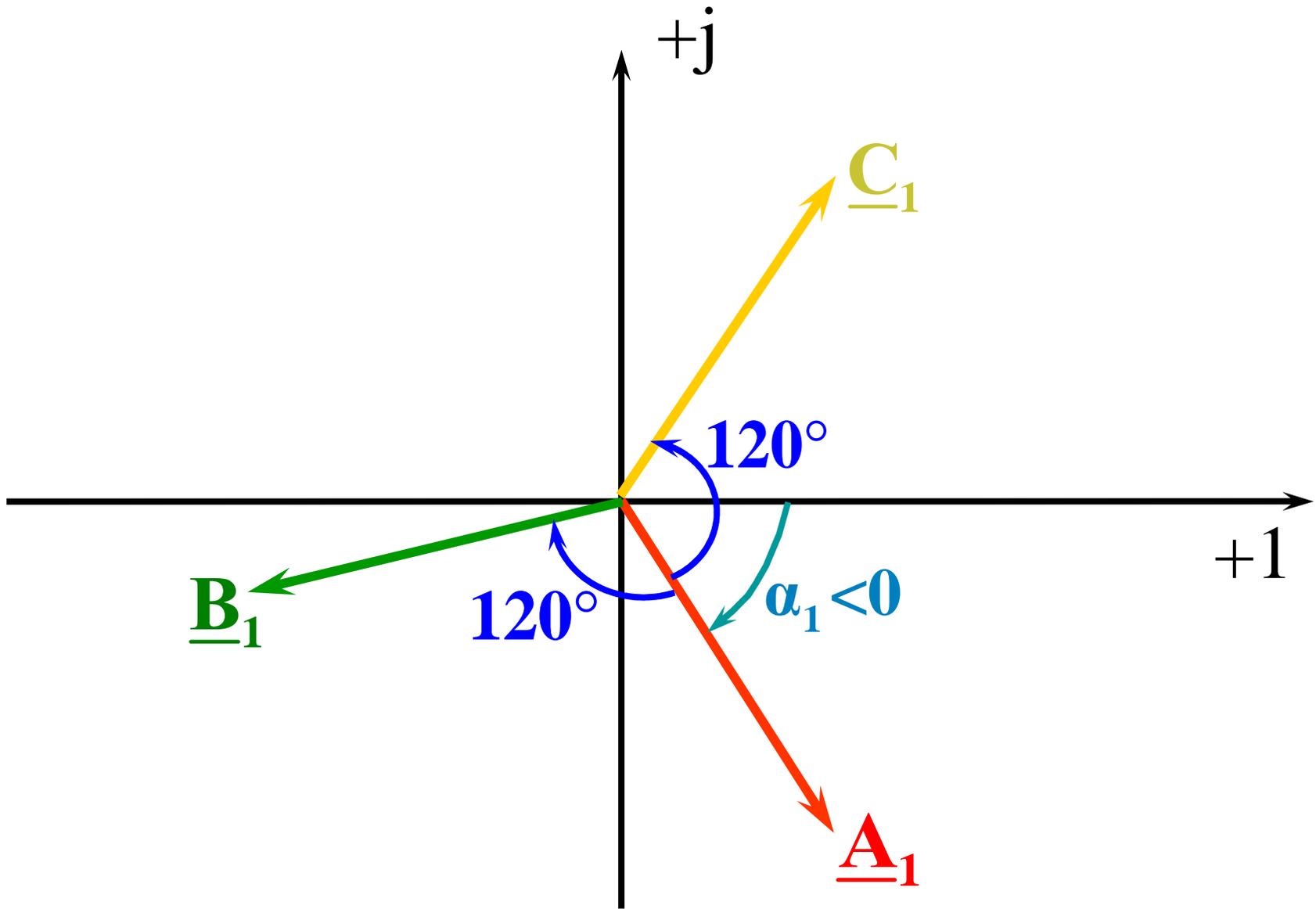


1. Составляющие прямой последовательности

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{A}_1 = A_1 e^{j\alpha_1} \\ \underline{B}_1 = a^2 \underline{A}_1 \\ \underline{C}_1 = a \underline{A}_1 \end{array} \right.$$

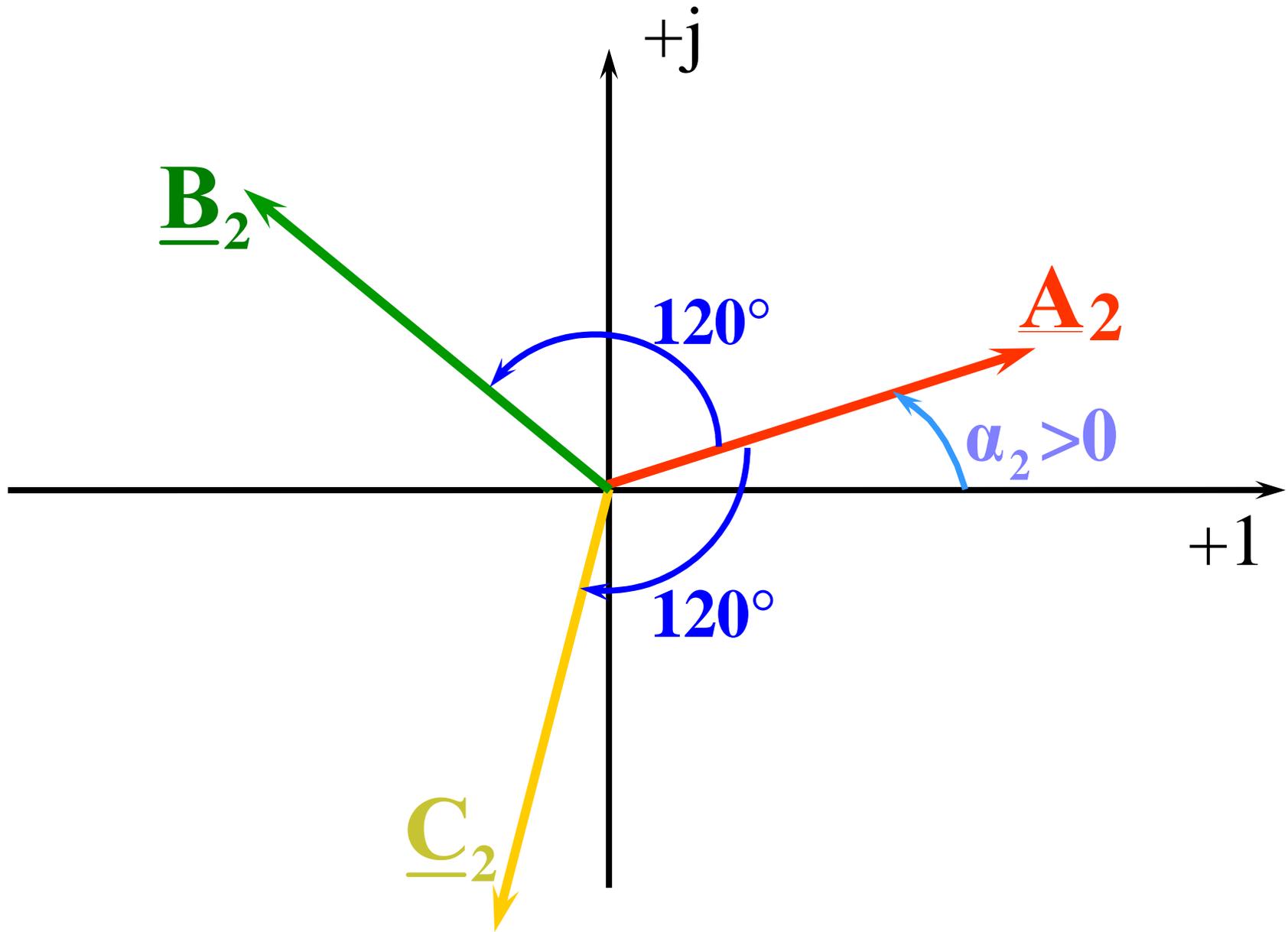
$$a = e^{j120^\circ}$$

$$a^2 = e^{-j120^\circ}$$



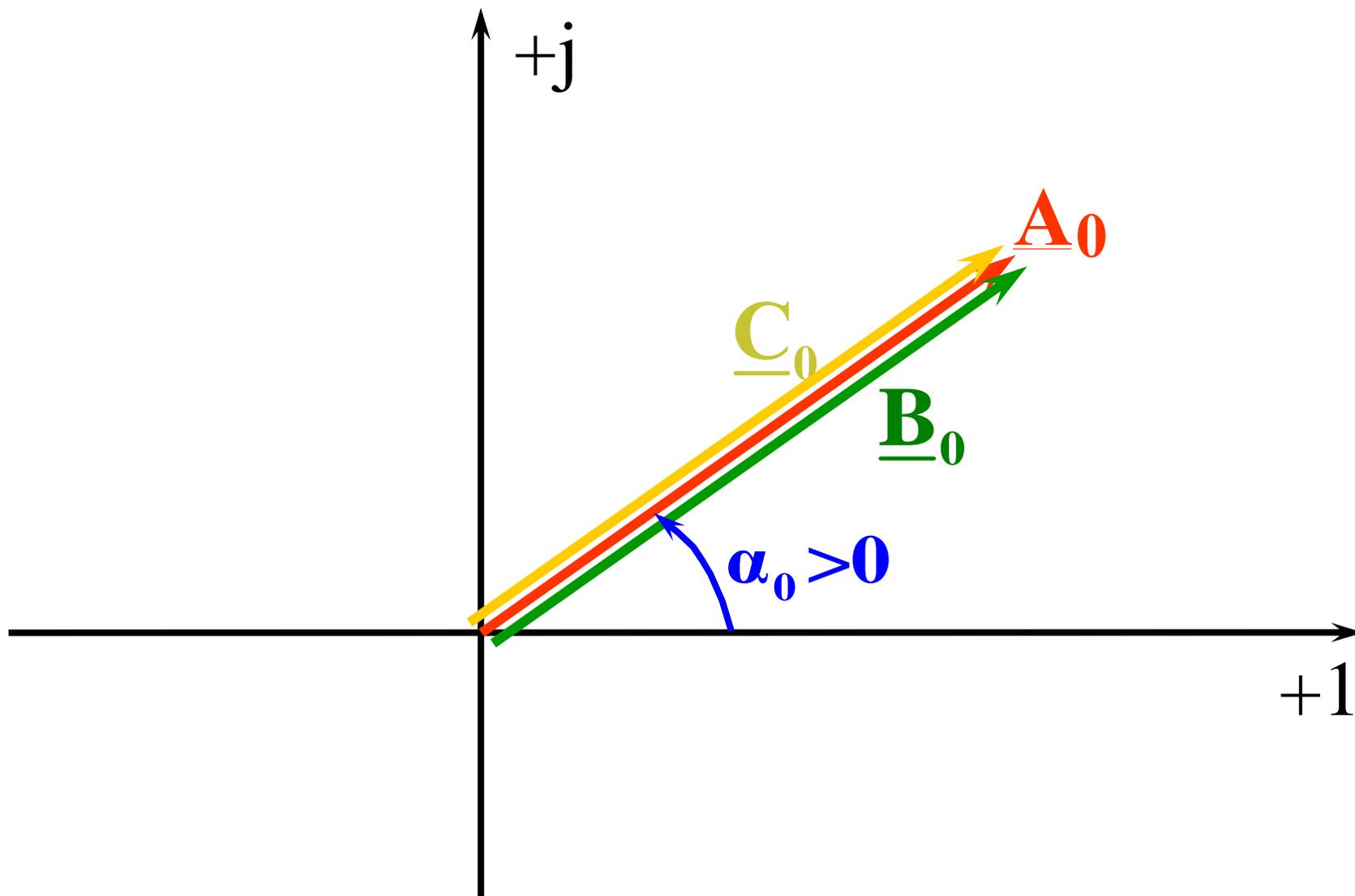
2. Составляющие обратной последовательности

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{\mathbf{A}}_2 = \mathbf{A}_2 e^{j\alpha_2} \\ \underline{\mathbf{B}}_2 = \mathbf{a} \underline{\mathbf{A}}_2 \\ \underline{\mathbf{C}}_2 = \mathbf{a}^2 \underline{\mathbf{A}}_2 \end{array} \right.$$



3. Составляющие нулевой последовательности

$$\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0 = A_0 e^{j\alpha_0}$$



Расчет составляющих фазы **A**:

$$\underline{A}_1 = (\underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C})/3$$

$$\underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C})/3$$

$$\underline{A}_0 = (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3$$

Составляющие токов **прямой
последовательности создают
магнитное поле, вращающееся
по направлению вращения
роторов двигателей и
генераторов**

Составляющие токов **обратной
последовательности создают
магнитное поле, вращающееся
навстречу вращению роторов
двигателей и генераторов**

**Составляющие токов нулевой
последовательности создают
неподвижное пульсирующее
магнитное поле**

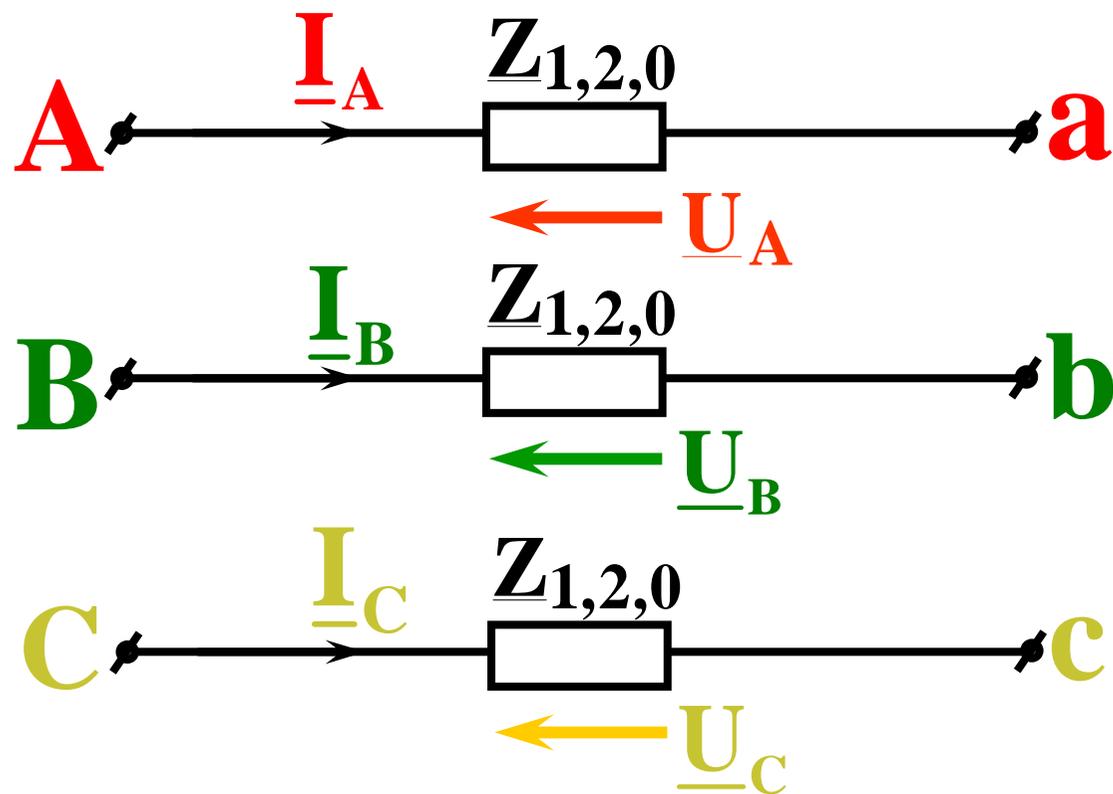
Таким образом условия протекания составляющих токов **разные**, следовательно, и **сопротивления** этим составляющим **разные**:
у **двигателей** и **генераторов**

$$\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_0;$$

у **линий** и **трансформаторов**

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_0$$

При этом в **симметричной**
трехфазной цепи имеет место
независимость действия
симметричных составляющих
токов и напряжений



Фазные токи:

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

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

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

Составляющие фазных напряжений:

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

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

$$\underline{U}_{A0} = \underline{Z}_0 \underline{I}_{A0}$$

Фазные напряжения:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}$$

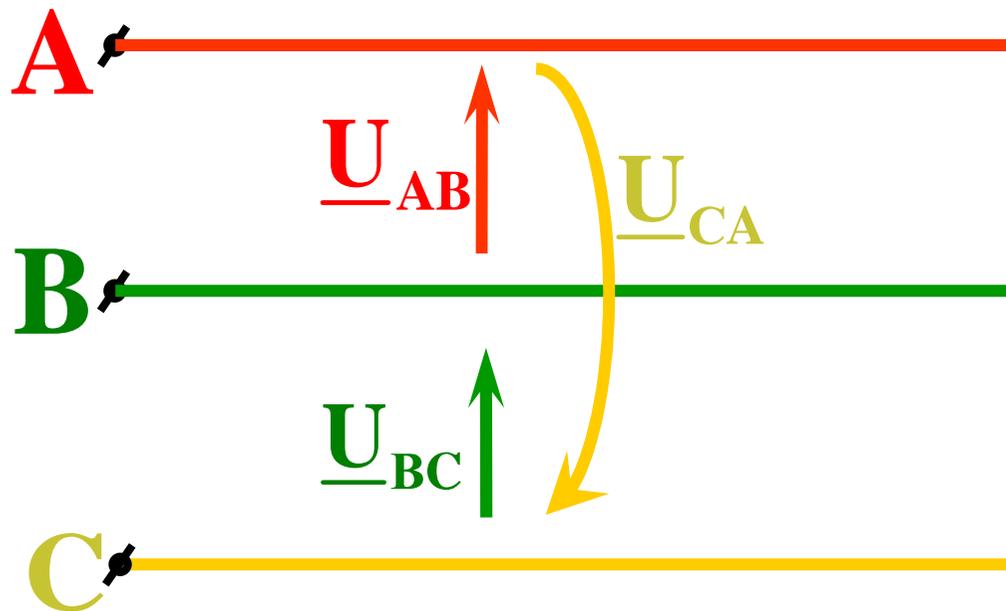
$$\underline{U}_C = a \underline{U}_{A1} + a^2 \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}$$

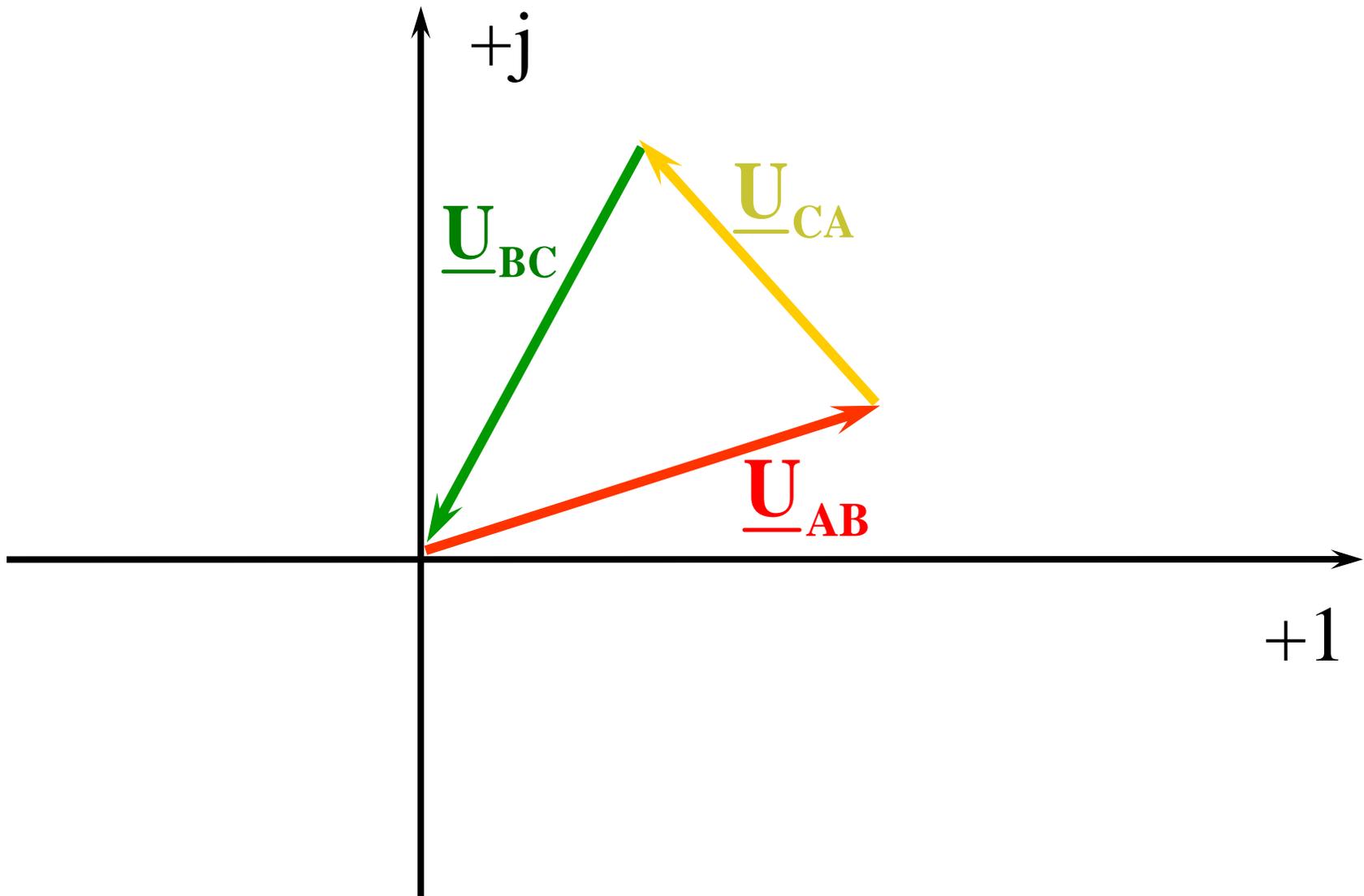
**Это означает, что расчет
симметричной трехфазной
цепи можно вести на одну
фазу для каждой
последовательности отдельно**

Особенности существования составляющих напряжений и токов нулевой последовательности

1. Линейные напряжения

$$\underline{U}_{AB}, \quad \underline{U}_{BC}, \quad \underline{U}_{CA}$$



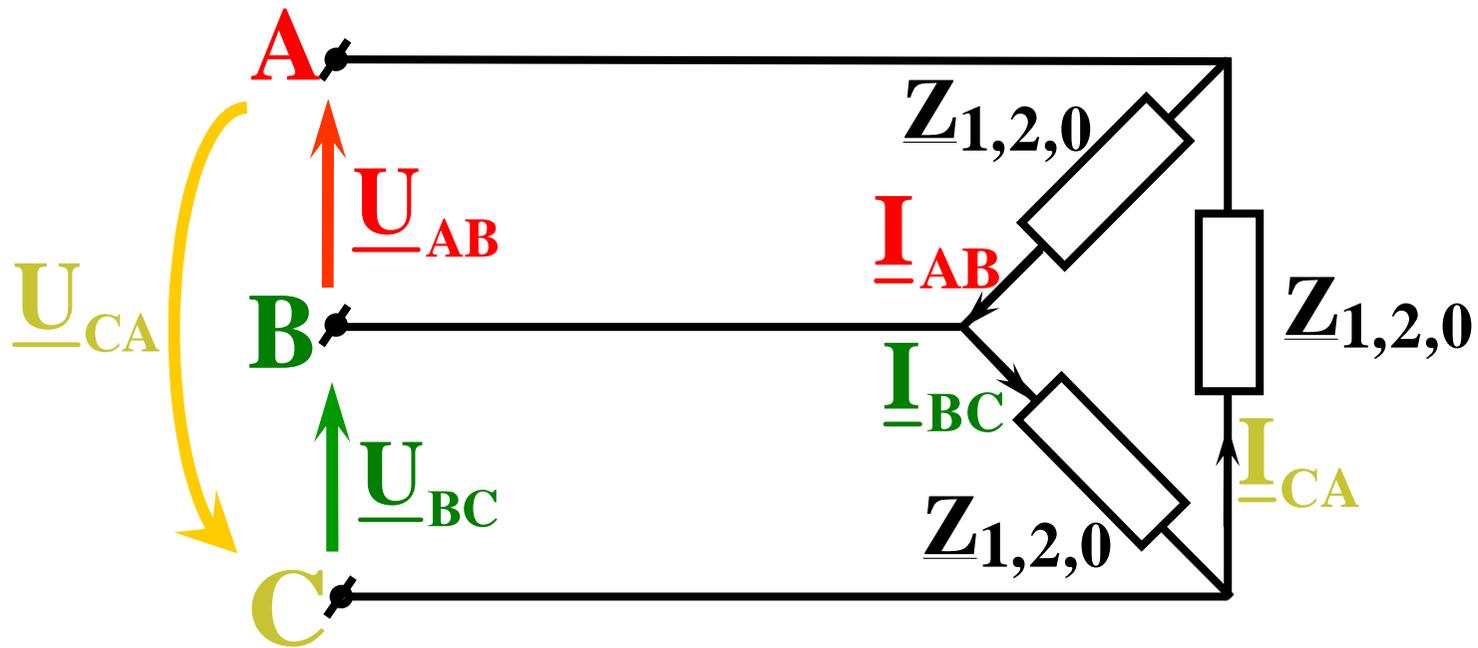


$$\underline{U}_{AB_0} = \underline{U}_{BC_0} = \underline{U}_{CA_0} =$$
$$= \frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA}}{3} = 0$$

**Линейные напряжения не
содержат составляющих
нулевой последовательности**

2. Фазные токи треугольника

\underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} , \underline{I}_{CA}



Так как

$$\underline{U}_{AB_0} = \underline{U}_{BC_0} = \underline{U}_{CA_0} = 0,$$

То

$$\underline{I}_{AB_0} = \frac{\underline{U}_{AB_0}}{\underline{Z}_0} = 0$$

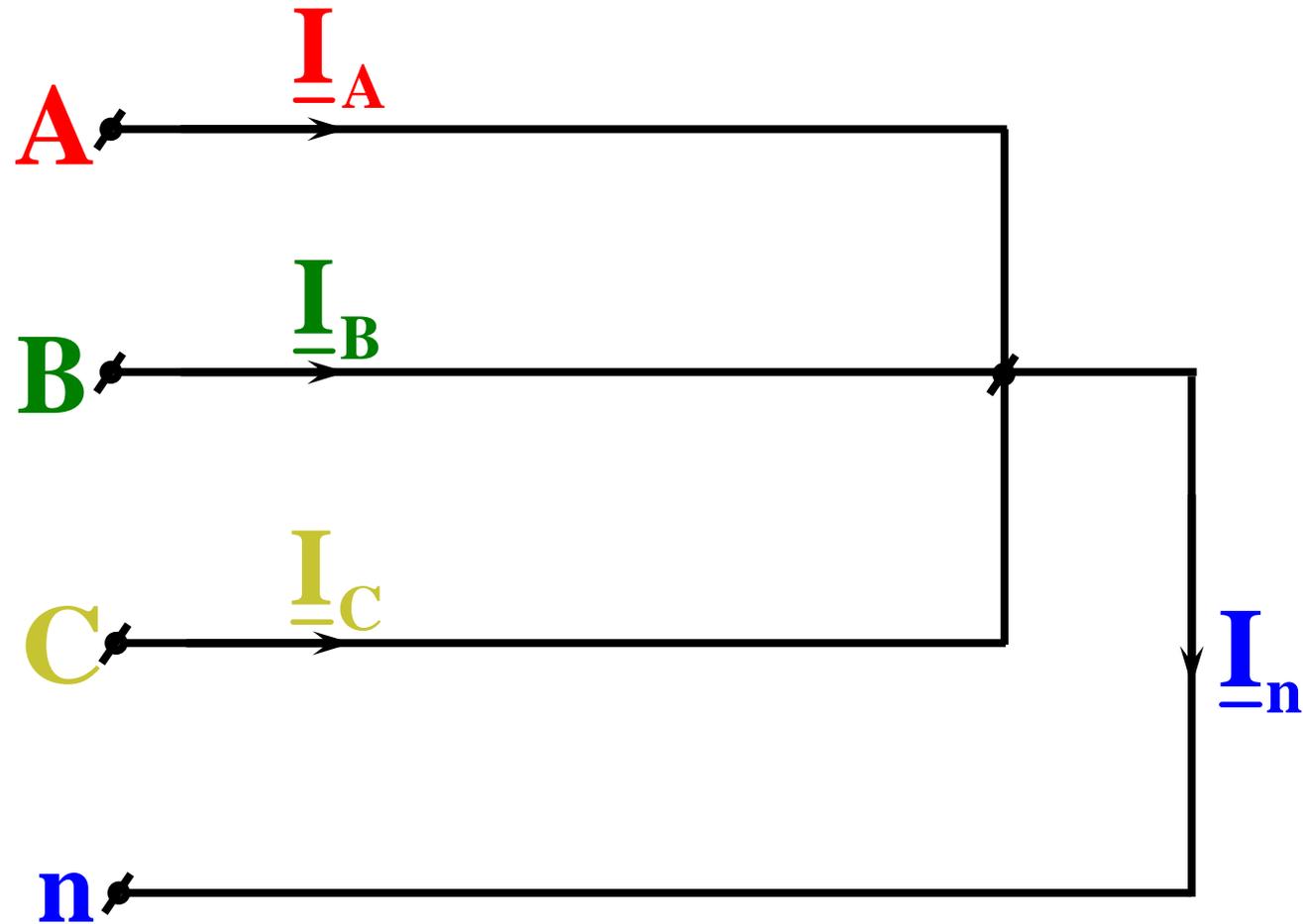
$$\underline{I}_{BC_0} = \frac{\underline{U}_{BC_0}}{\underline{Z}_0} = 0$$

$$\underline{I}_{CA_0} = \frac{\underline{U}_{CA_0}}{\underline{Z}_0} = 0$$

Фазные токи нагрузки,
соединенной в **треугольник**, не
содержат составляющих
нулевой последовательности

3. Ток нулевого провода

$$\underline{I}_n$$



Так как

$$\underline{I}_{A_0} = \underline{I}_{B_0} = \underline{I}_{C_0} = \frac{\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C}{3},$$

То

$$\underline{I}_n = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_{A_0}$$

Линейные токи звезды ($\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$) и пропорциональные им фазные напряжения ($\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$) содержат составляющие нулевой последовательности при наличии нулевого провода или связи с “землей”, причем в нулевом проводе протекают только составляющие токов нулевой (\underline{I}_{A0}) последовательности

**Рассмотрим применение метода
симметричных составляющих
для расчета аварийного режима
трехфазных цепей, которые в
нормальном режиме
симметричны**