



---

# Основы теории электрических цепей

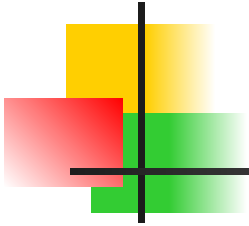
Лектор профессор ЭЛТИ  
Юрий Петрович Усов



# ОТЭЦ

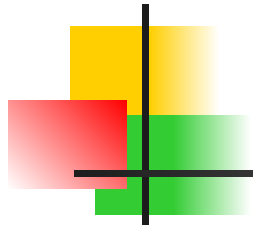
---

**В осеннем/весеннем семестрах:**  
**Лекции- 34/18 час.**  
**Лаборатория- 18/18 час.**  
**Практические занятия- 18/18 час.**  
**Компьютер. практика- 18/18 час.**  
**Экзамен- зима/весна**

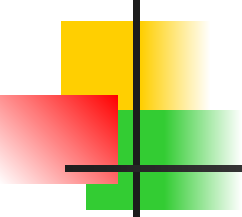


**Расчет несимметричных  
трехфазных цепей  
методом симметричных  
составляющих.**

**Преобразование Фортескью.  
(C.L.Fortescue, USA, 1918).**

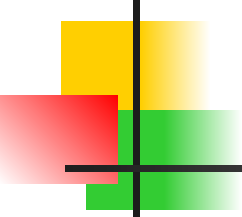


# Метод симметричных составляющих - мсс



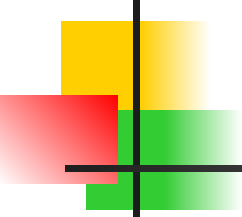
---

**Мсс используется для расчета несимметричных (аварийных) режимов динамических трехфазных цепей, содержащих генераторы, двигатели, лэп, трансформаторы и др. элементы необязательно 3-х фазные.**



---

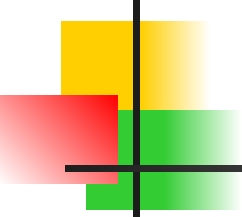
**В динамических трехфазных цепях имеется индуктивная связь между фазами, которую удобно учесть, используя мсс.**



---

**Этот метод основан на разложении  
трехфазной несимметричной  
системы**

**A , B , C на симметричные  
составляющие прямой (A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>),  
обратной (A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>),  
и нулевой (A<sub>0</sub>, B<sub>0</sub>, C<sub>0</sub>)  
последовательностей.**



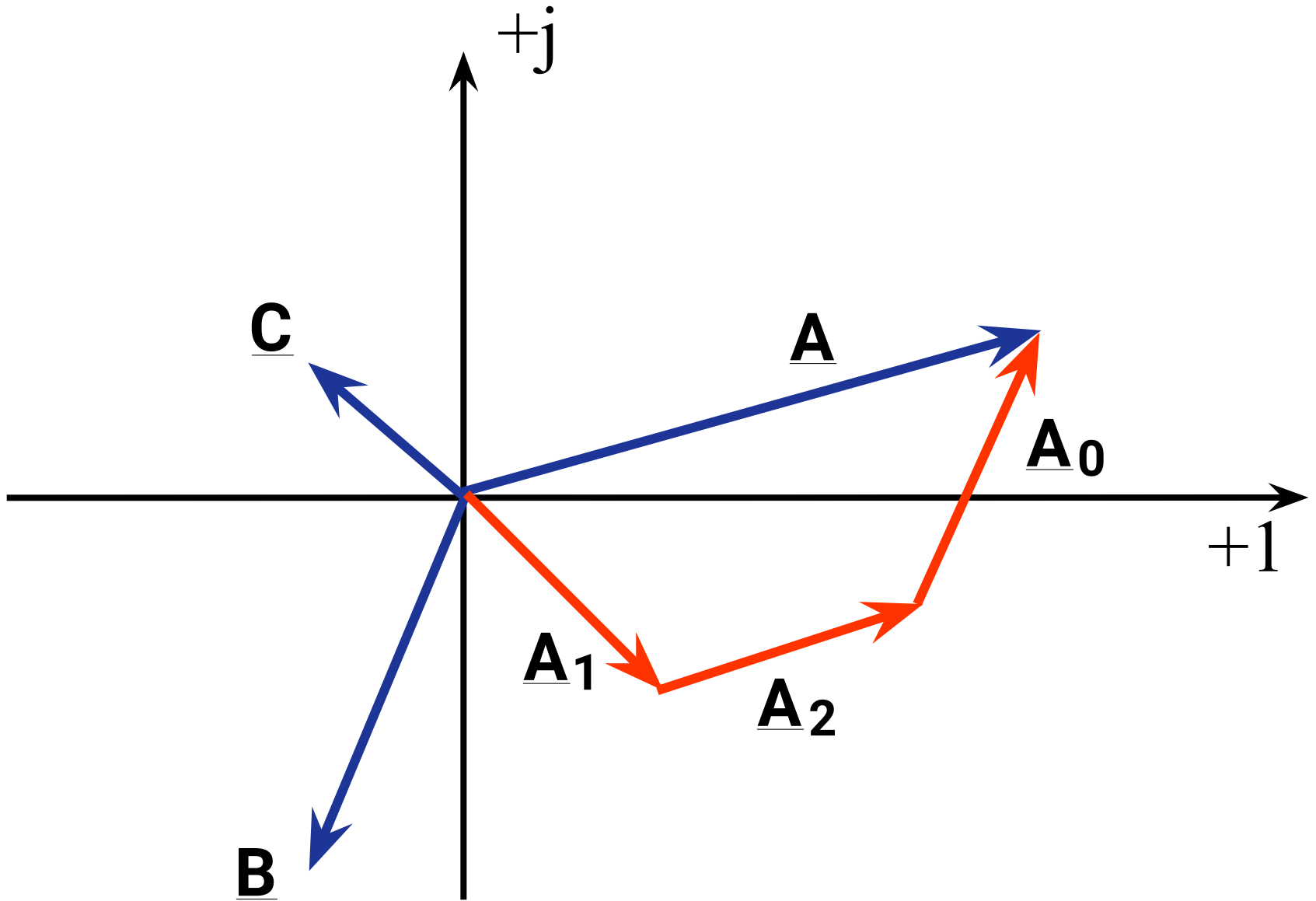
---

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

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

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







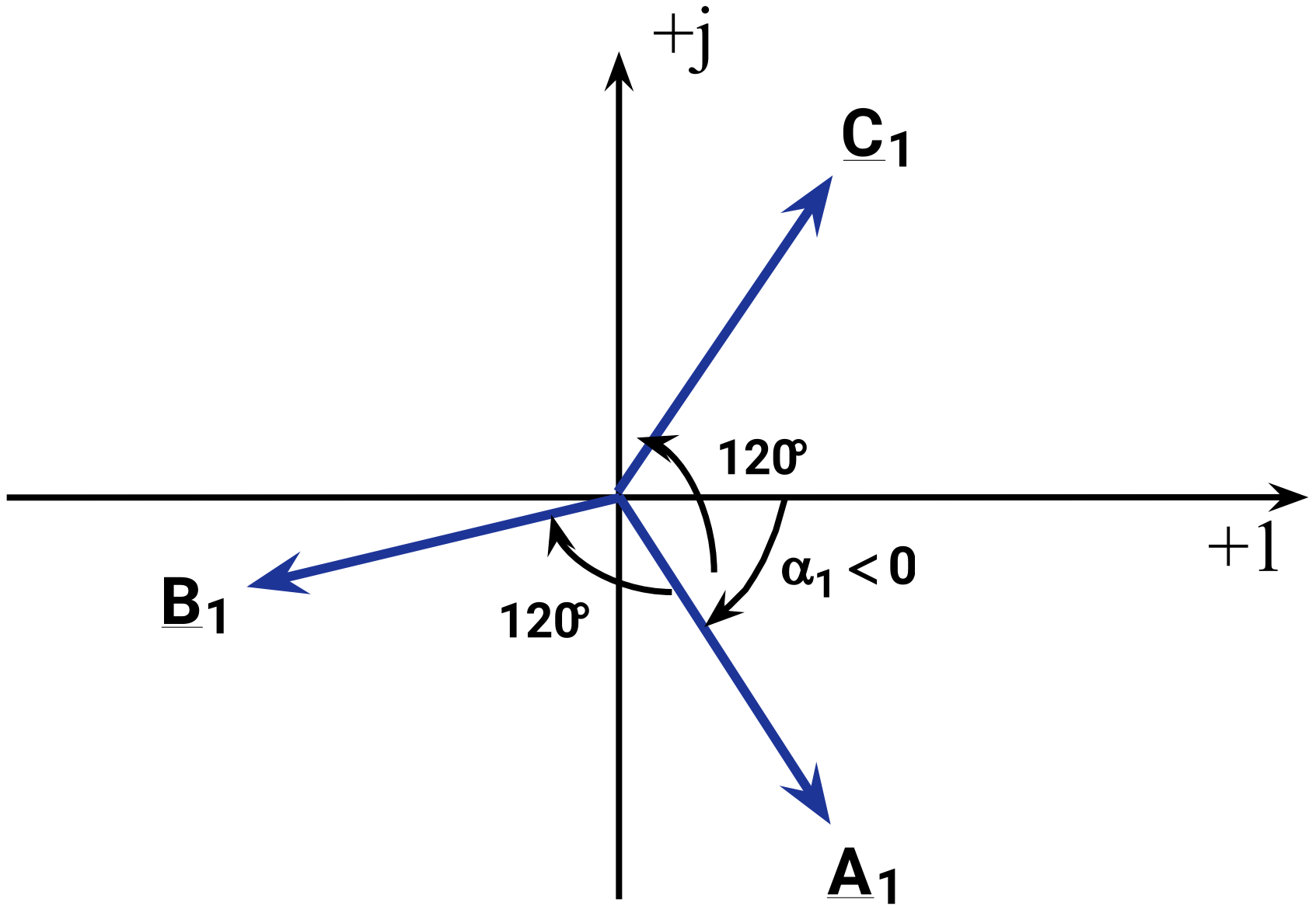
# 1. Составляющие прямой последовательности

---

$$\begin{cases} \underline{A}_1 = A_1 e^{j\alpha_1} \\ \underline{B}_1 = a^2 \underline{A}_1 \\ \underline{C}_1 = a \underline{A}_1 \end{cases}$$

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

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

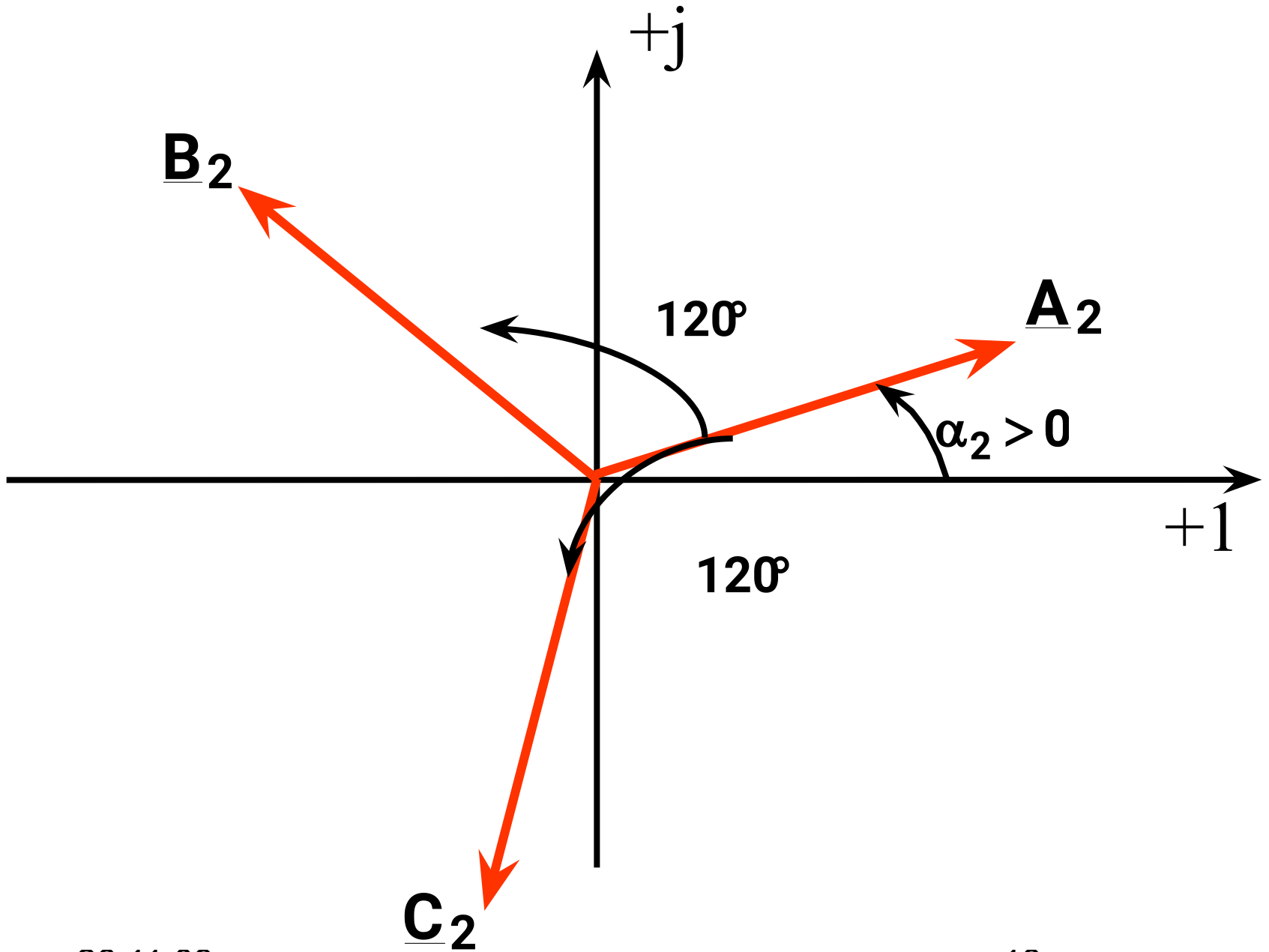




## 2. Составляющие обратной последовательности

---

$$\begin{cases} \underline{A}_2 = A_2 e^{j\alpha_2} \\ \underline{B}_2 = a \underline{A}_2 \\ \underline{C}_2 = a^2 \underline{A}_2 \end{cases}$$

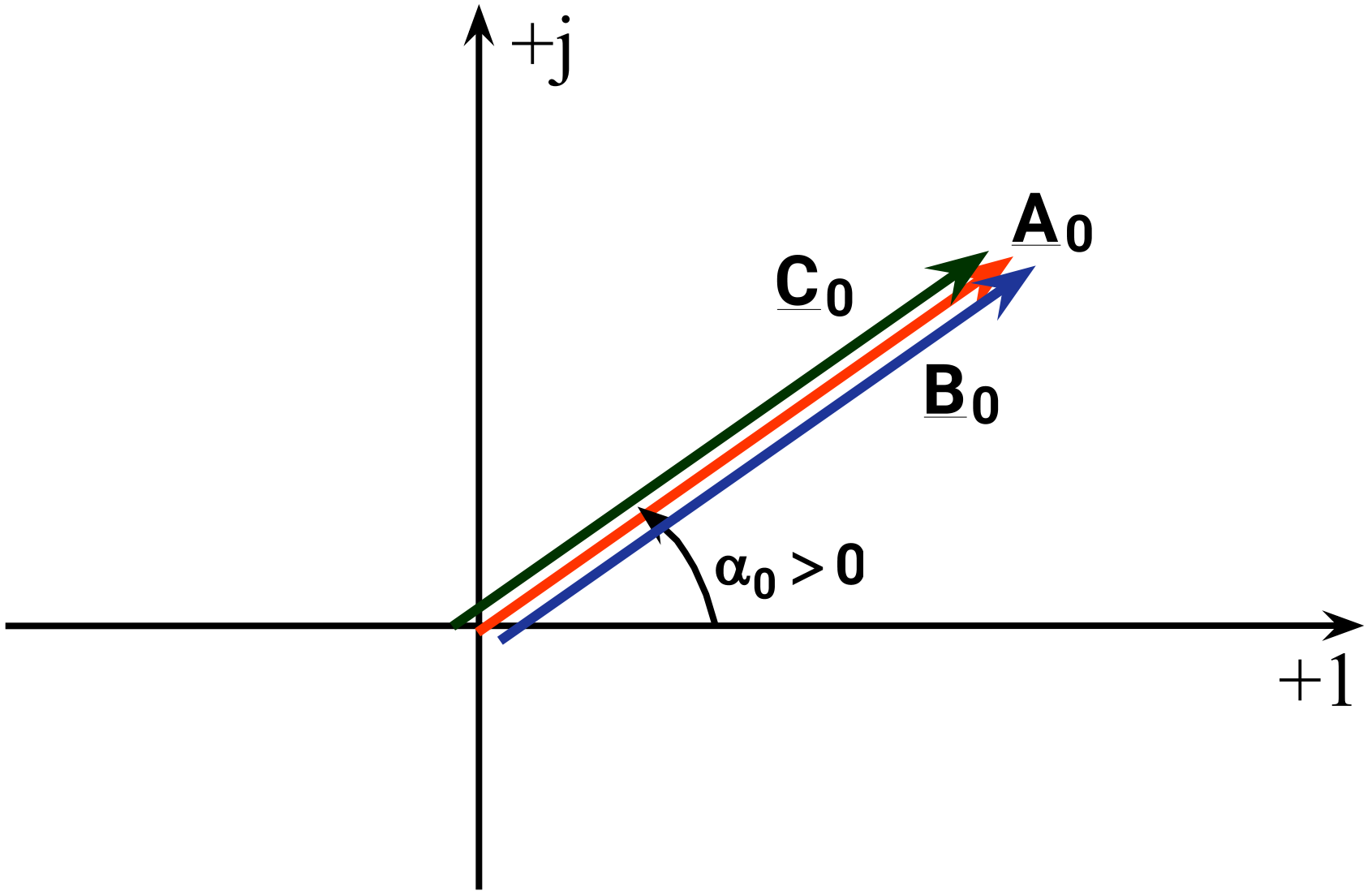




### 3. Составляющие нулевой последовательности

---

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





## Расчет составляющих фазы А:

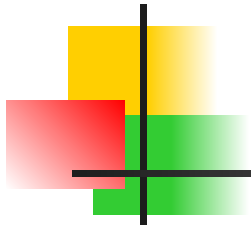
---

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

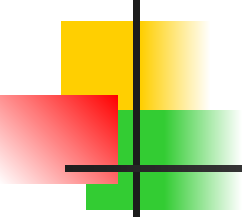
$$\underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C})/3$$

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



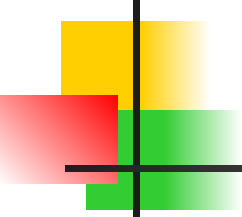


**Составляющие токов прямой последовательности создают магнитное поле, вращающееся по направлению вращения роторов двигателей и генераторов**



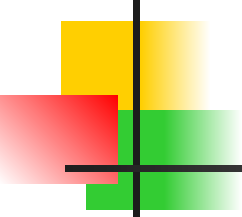
---

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



---

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

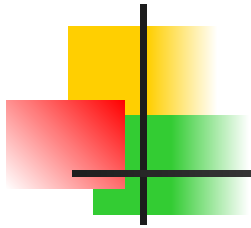


Таким образом условия протекания составляющих токов разные, следовательно, и сопротивления этим составляющим разные: у двигателей и генераторов

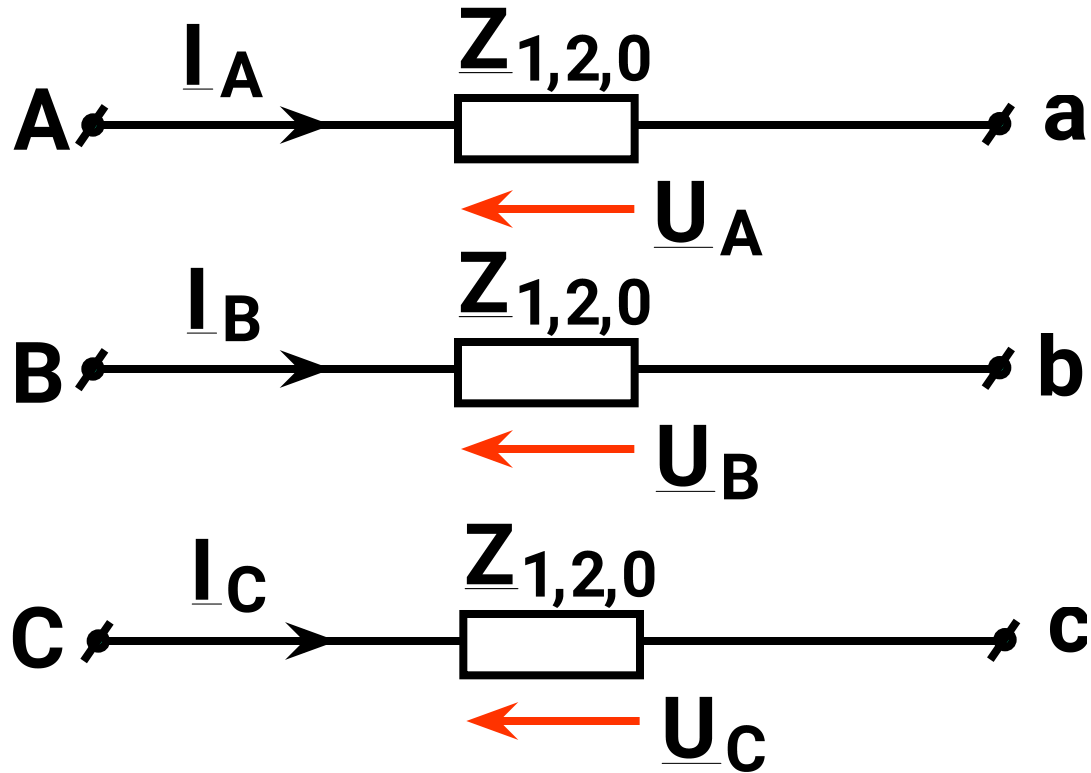
$$\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_0;$$

у линий и трансформаторов

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



**Естественно, в линейной трехфазной цепи имеет место независимость действия симметричных составляющих токов и напряжений различной последовательности. Следовательно, можно применять метод наложения.**





## 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:

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

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

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





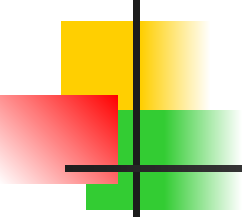
## Фазные напряжения:

---

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

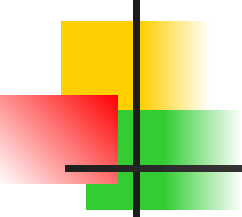
$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}$$

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



---

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



---

Построим симметричные составляющие для несимметричной 3-х фазной системы ЭДС, заданных графически на следующей картинке.

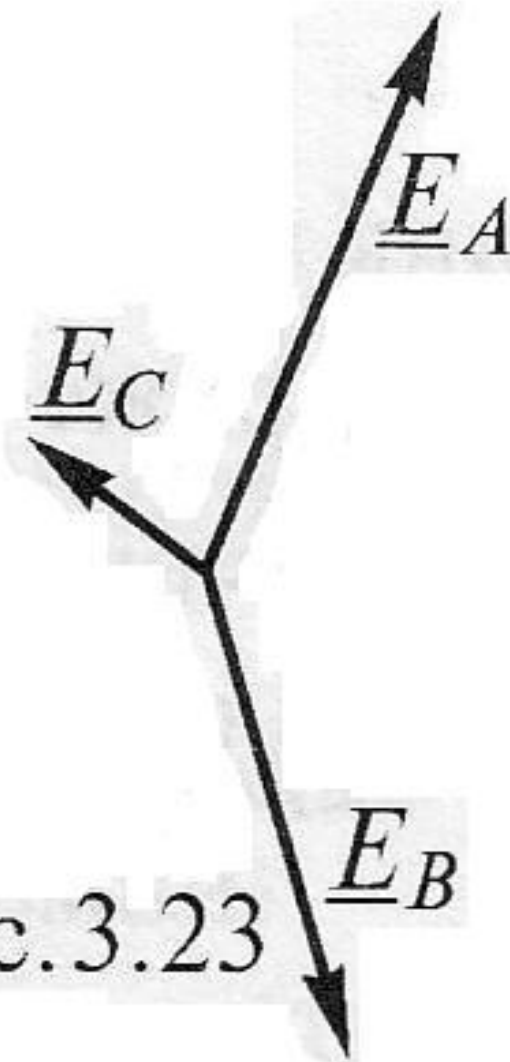
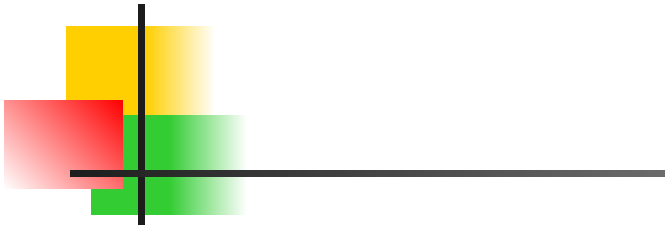
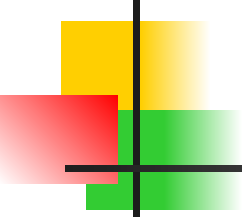



Рис. 3.23



---

Прямой и обратный переходы от несимметричной системы ЭДС к трем её симметричным составляющим даётся уже указанным преобразованием, называемым иногда преобразованием Фортескью:

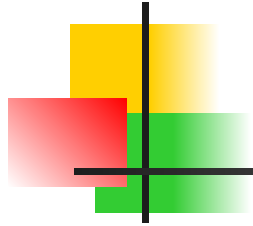


---

$$\underline{E}_0 = \frac{1}{3}(\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C); \quad \underline{E}_A = \underline{E}_0 + \underline{E}_1 + \underline{E}_2;$$

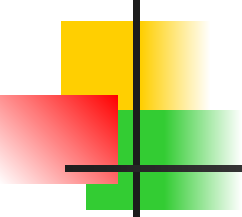
$$\underline{E}_1 = \frac{1}{3}(\underline{E}_A + a\underline{E}_B + a^2\underline{E}_C); \quad \underline{E}_B = \underline{E}_0 + a^2\underline{E}_1 + a\underline{E}_2;$$

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



---

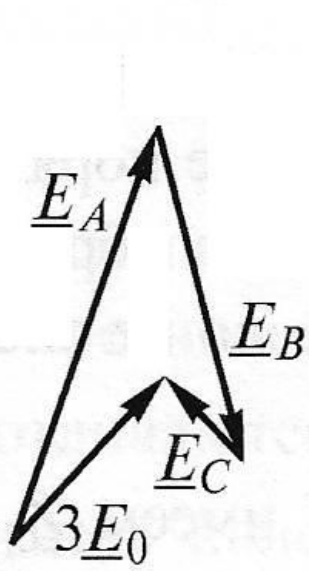
Их удобно удобно  
записывать в матричном  
виде:



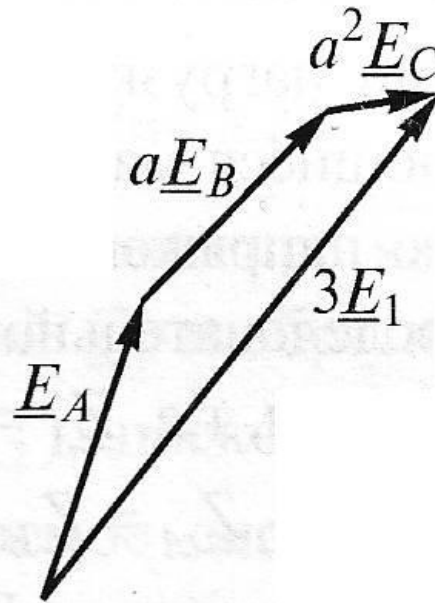
---

$$\begin{bmatrix} \underline{E}_0 \\ \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \underline{E}_A \\ \underline{E}_B \\ \underline{E}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{E}_0 \\ \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \end{bmatrix}.$$

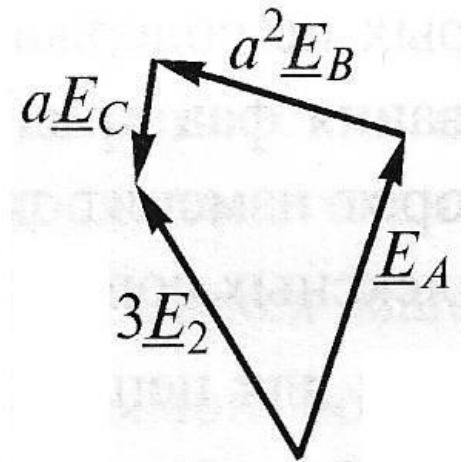




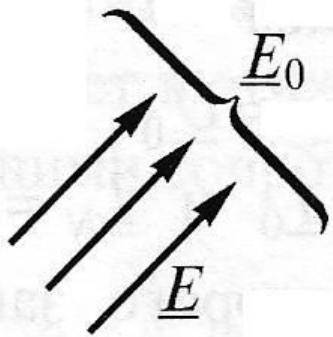
a)



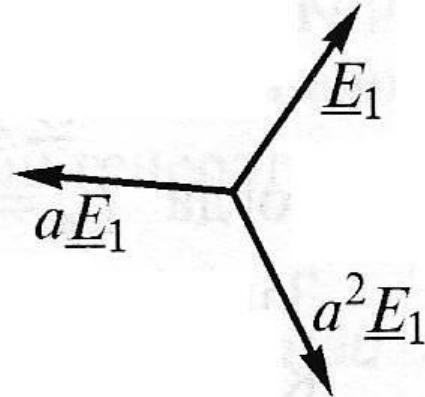
б)



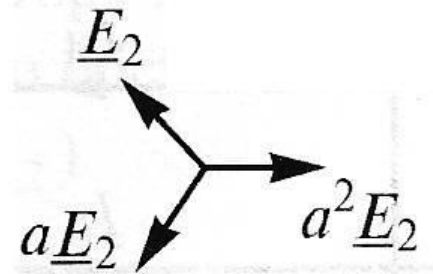
в)



г)

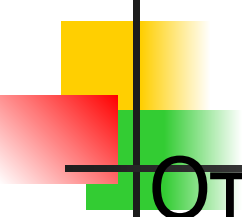


д)

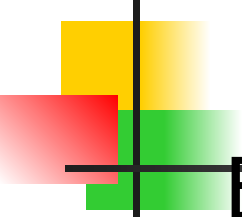


е)

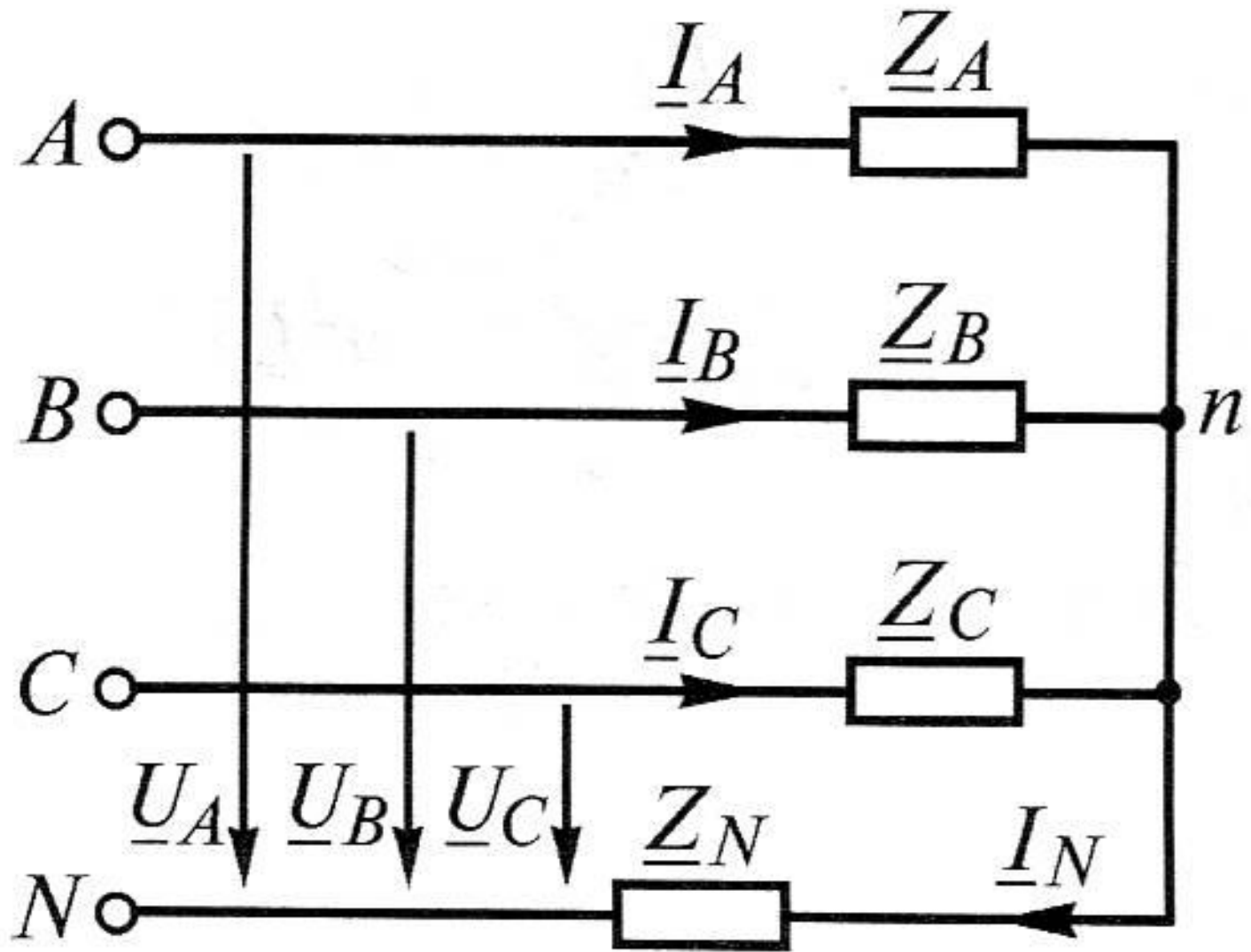
Рис. 3.24

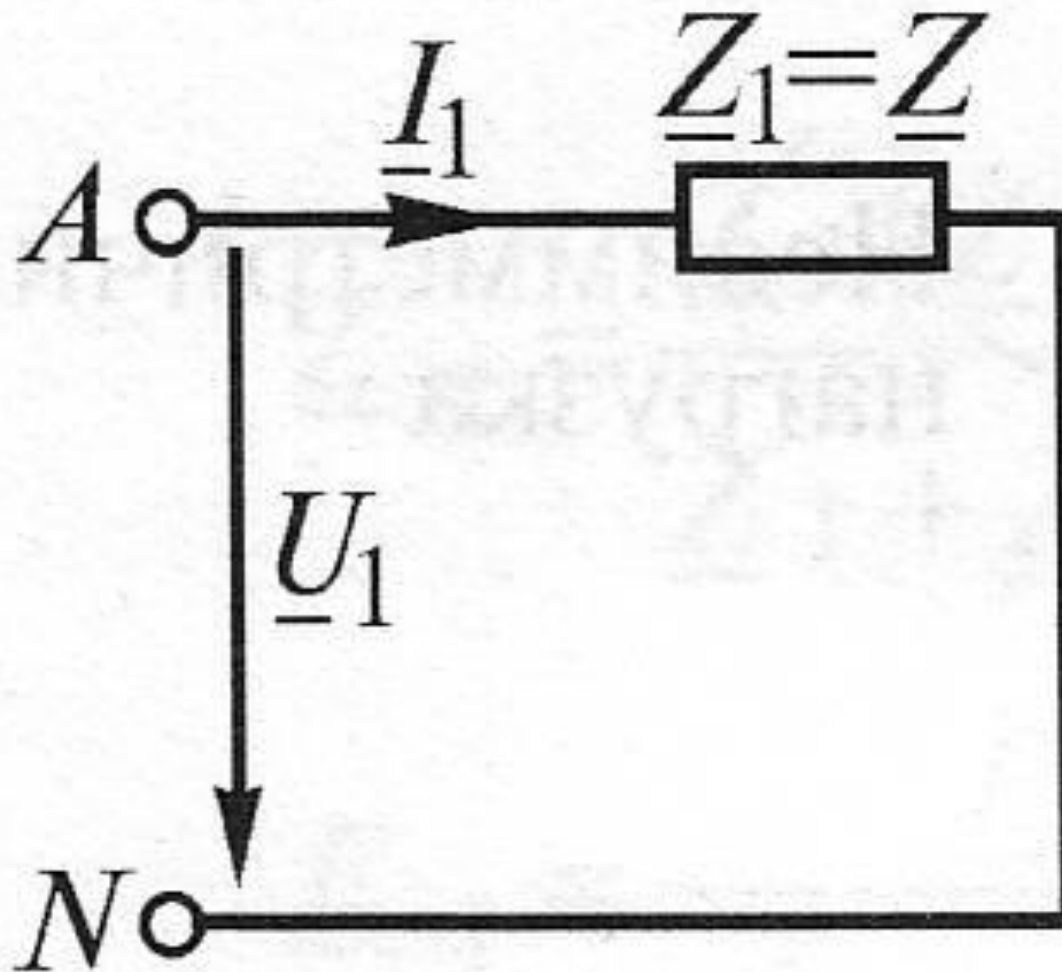


Отношения комплексных фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности к соответствующим комплексным фазным токам называют **комплексными сопротивлениями цепи прямой ( $\underline{Z}_1$ ), обратной ( $\underline{Z}_2$ ) и нулевой ( $\underline{Z}_0$ ) последовательностей.**

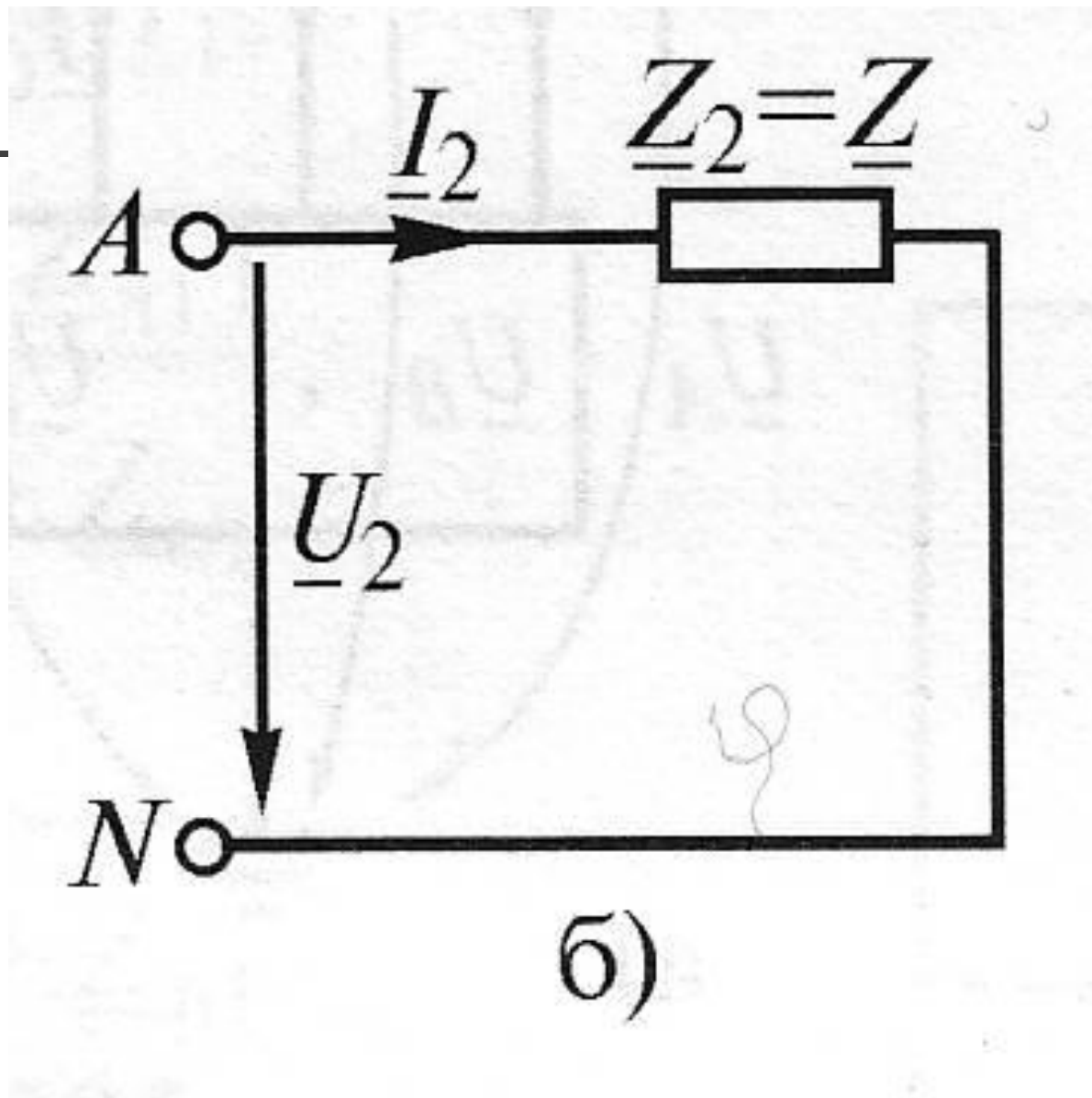


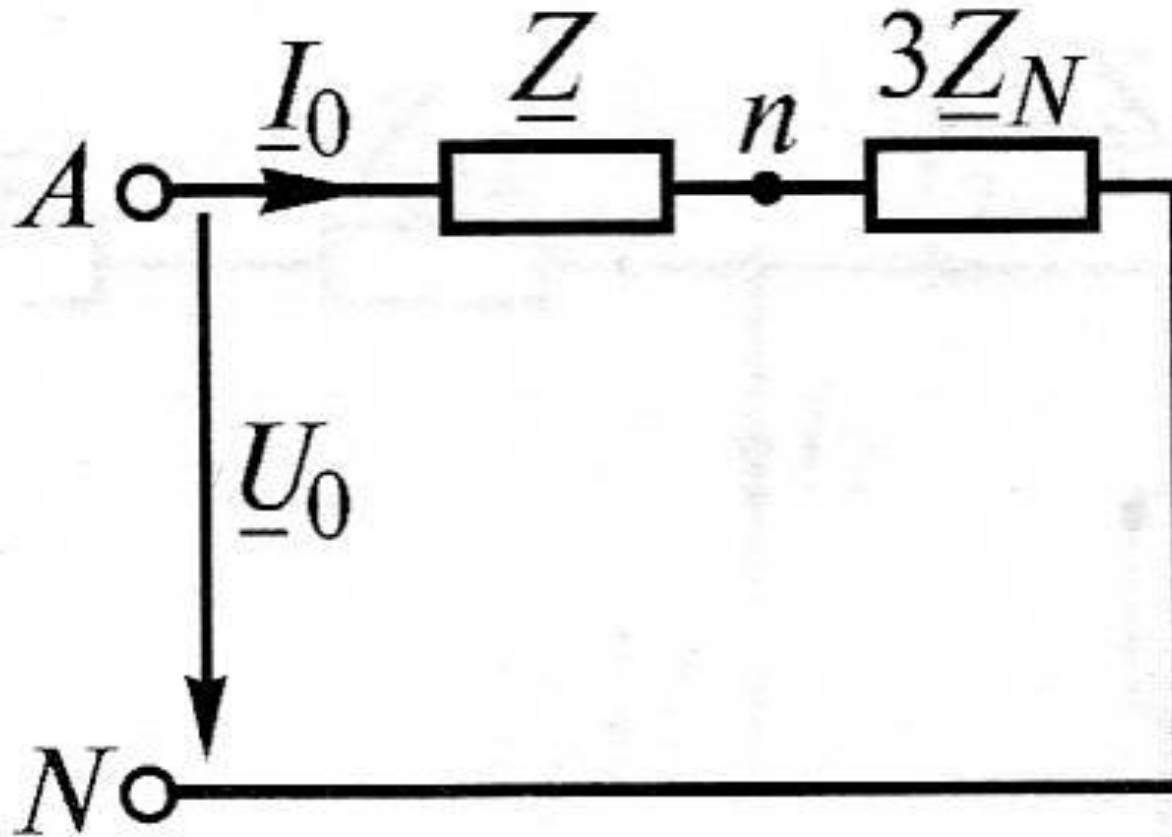
В цепях со статическими нагрузками, т. е. в цепях, приемники которых не содержат вращающиеся машины, изменение порядка чередования фаз приложенного напряжения с прямого на обратный и наоборот изменит только последовательность токов, но не значения комплексных сопротивлений цепи, т.е.  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ .





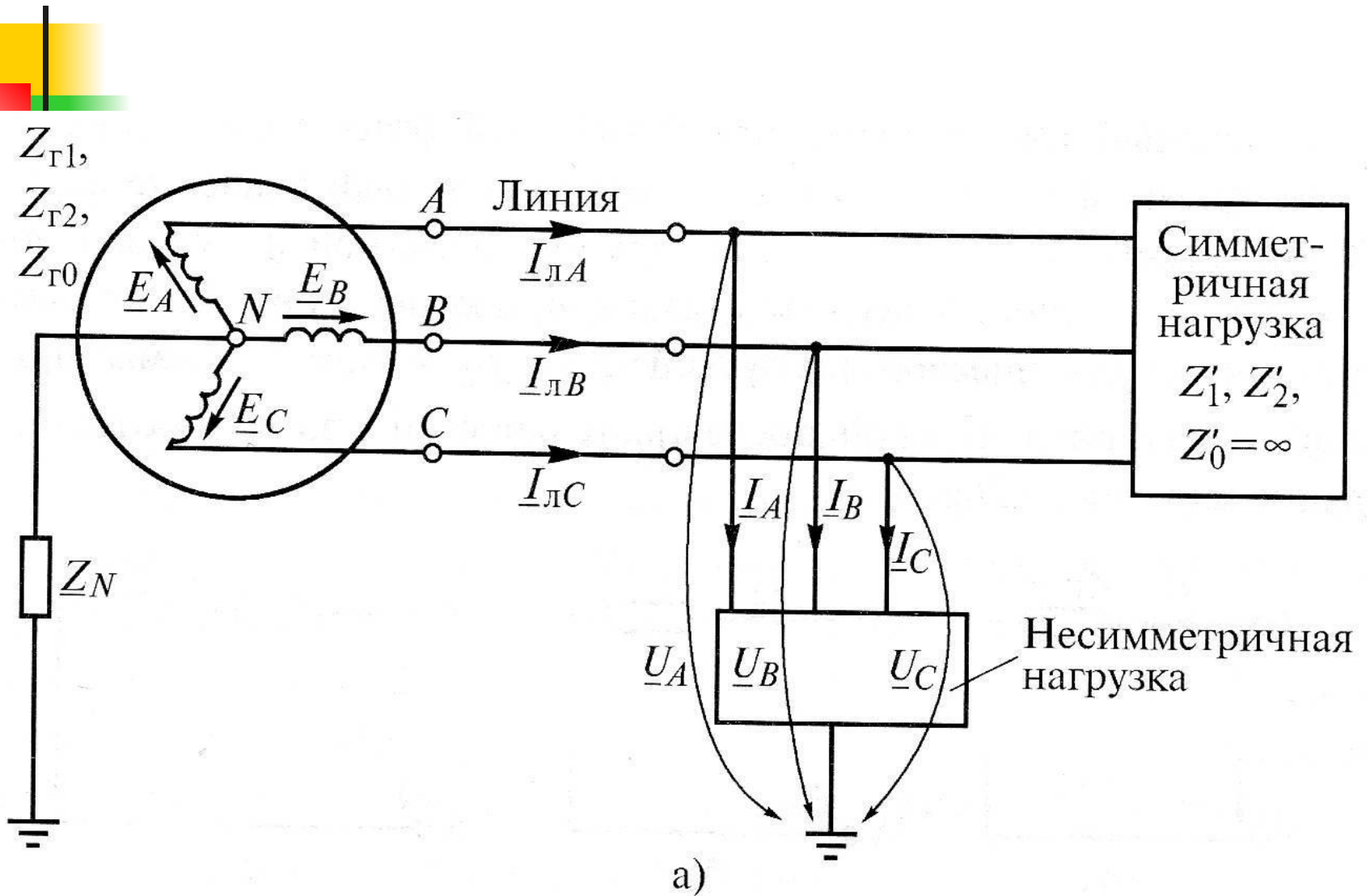
a)

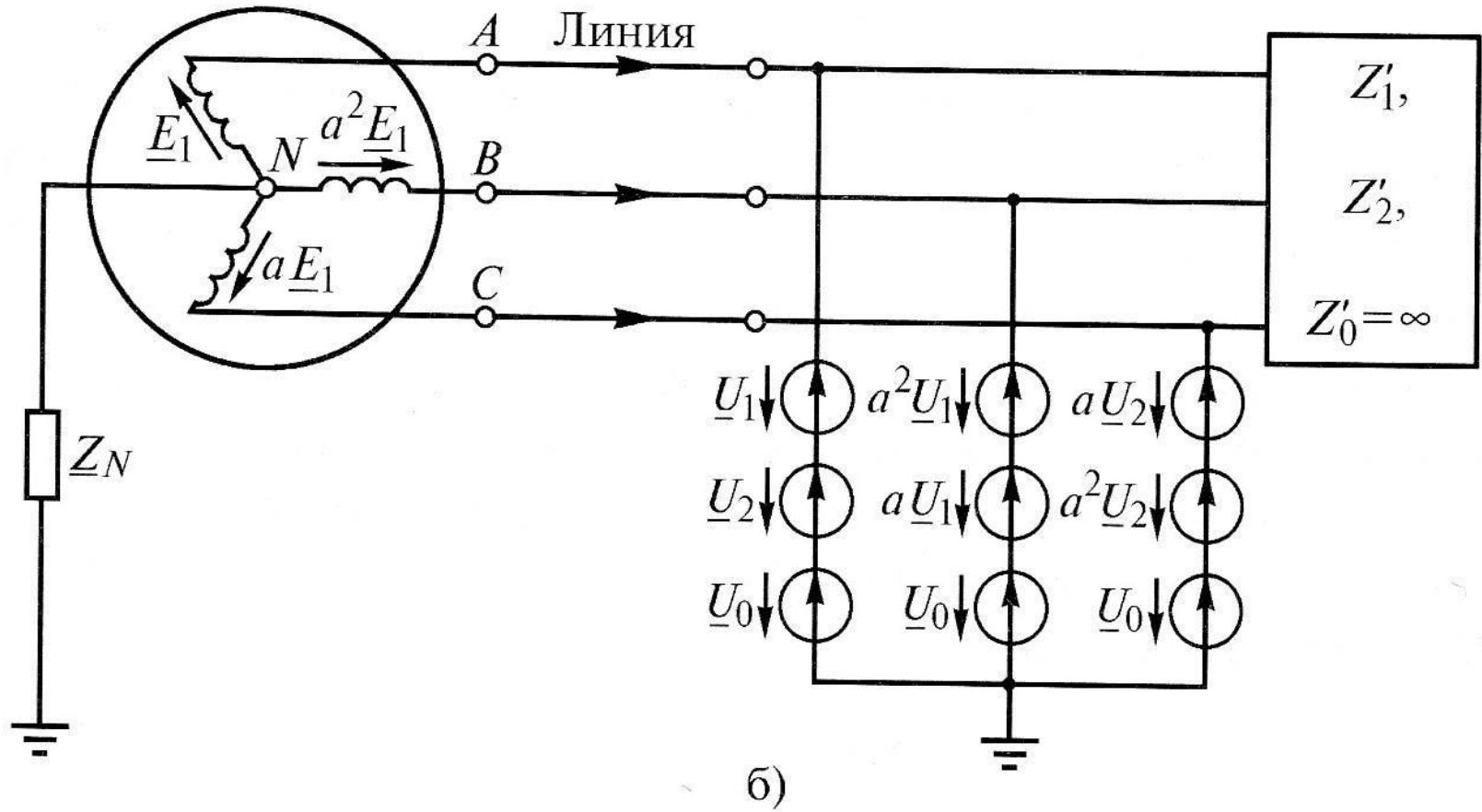


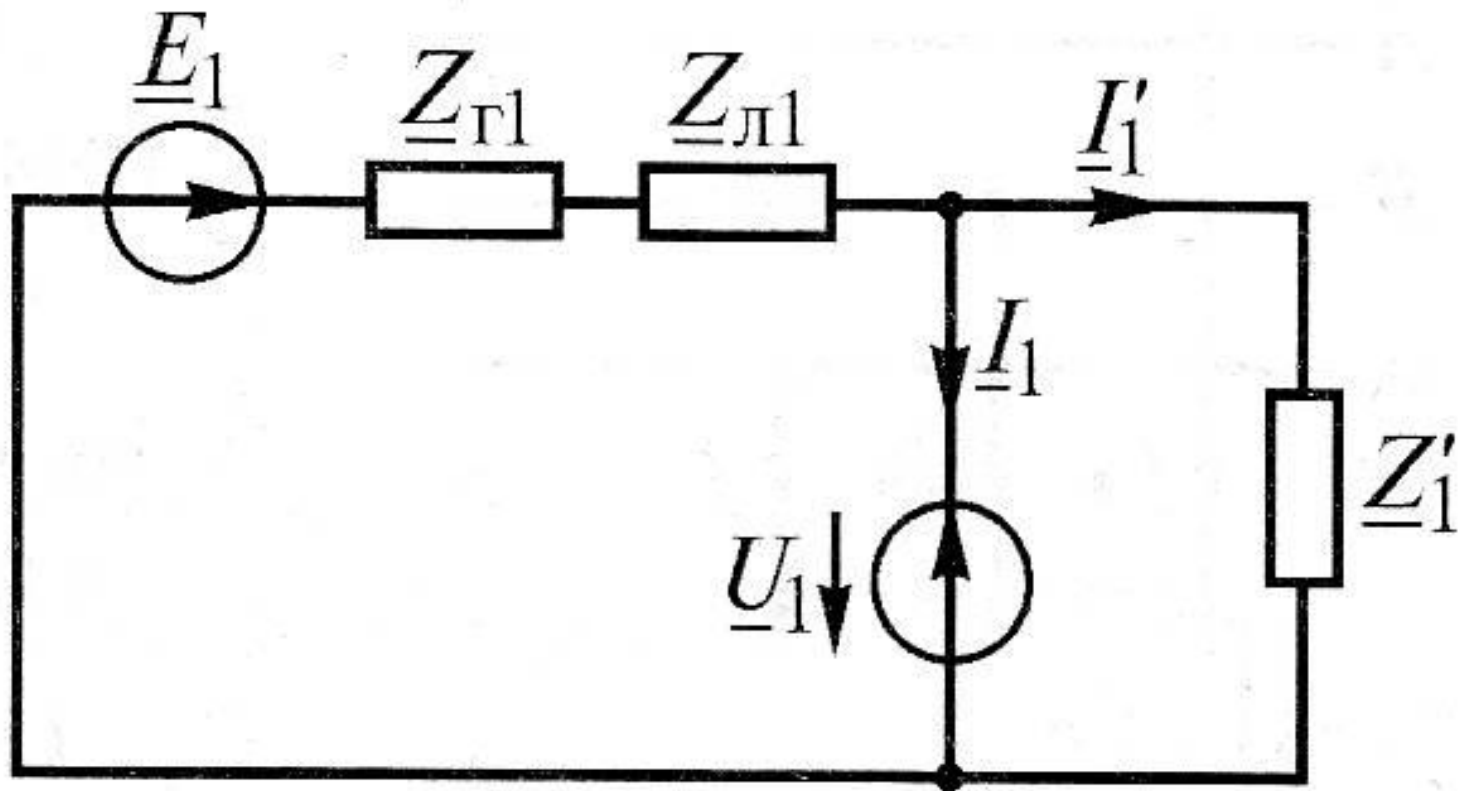


B)

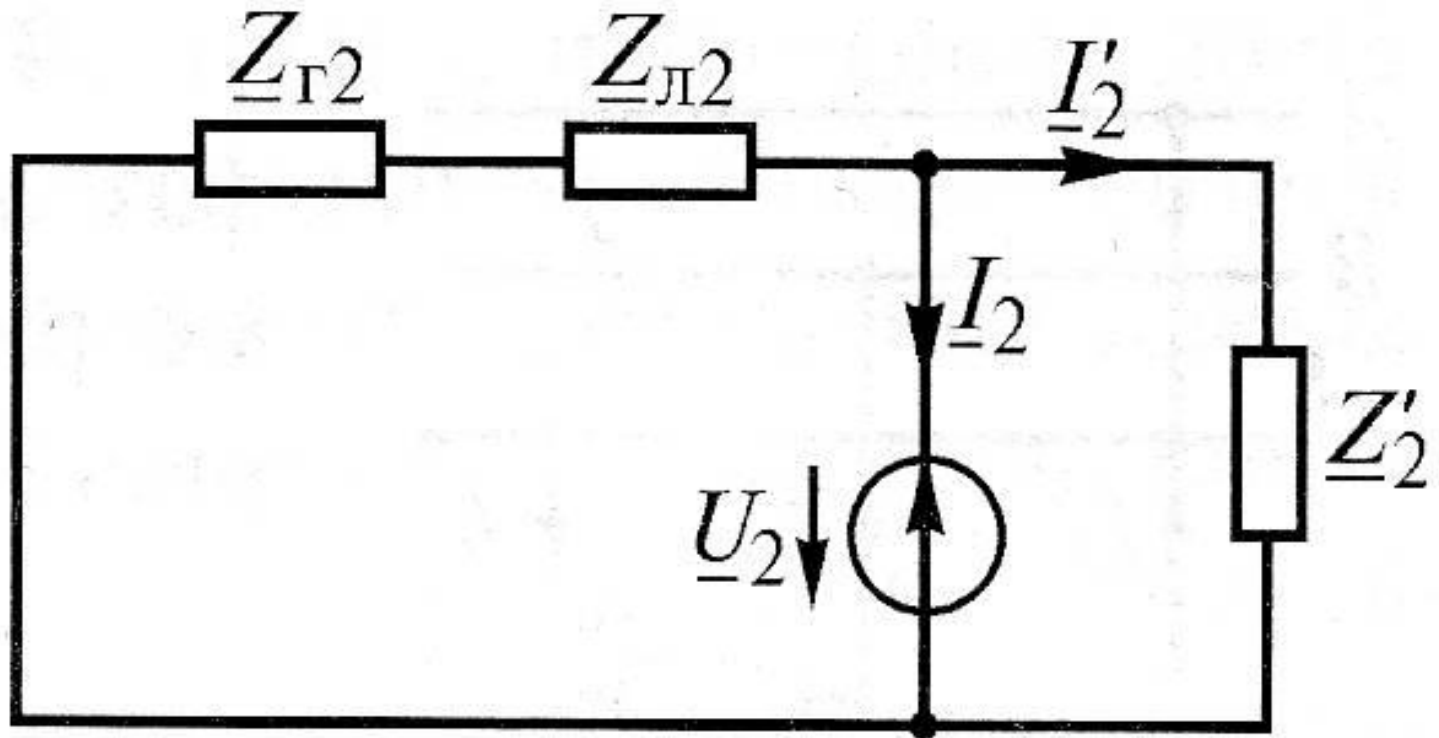




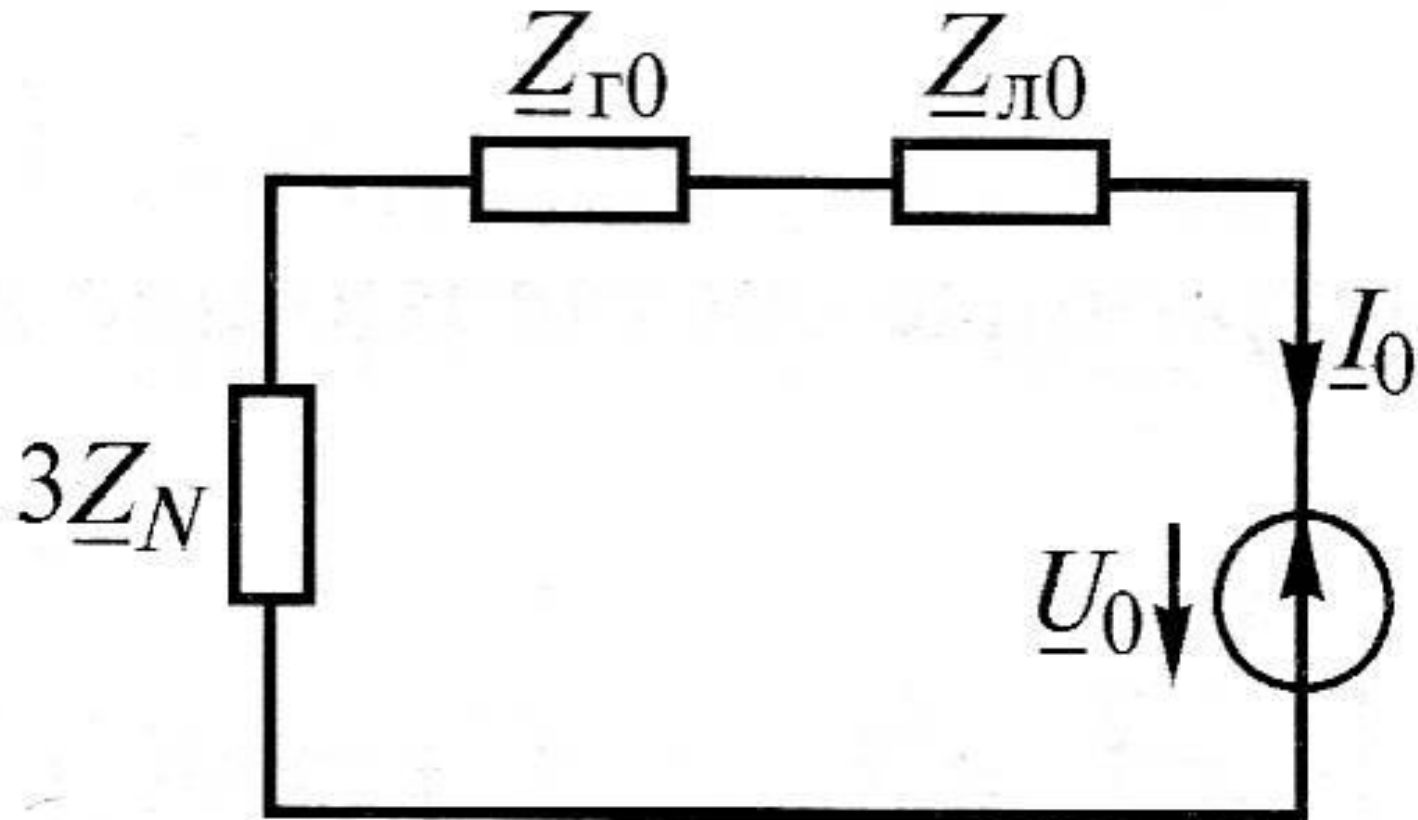




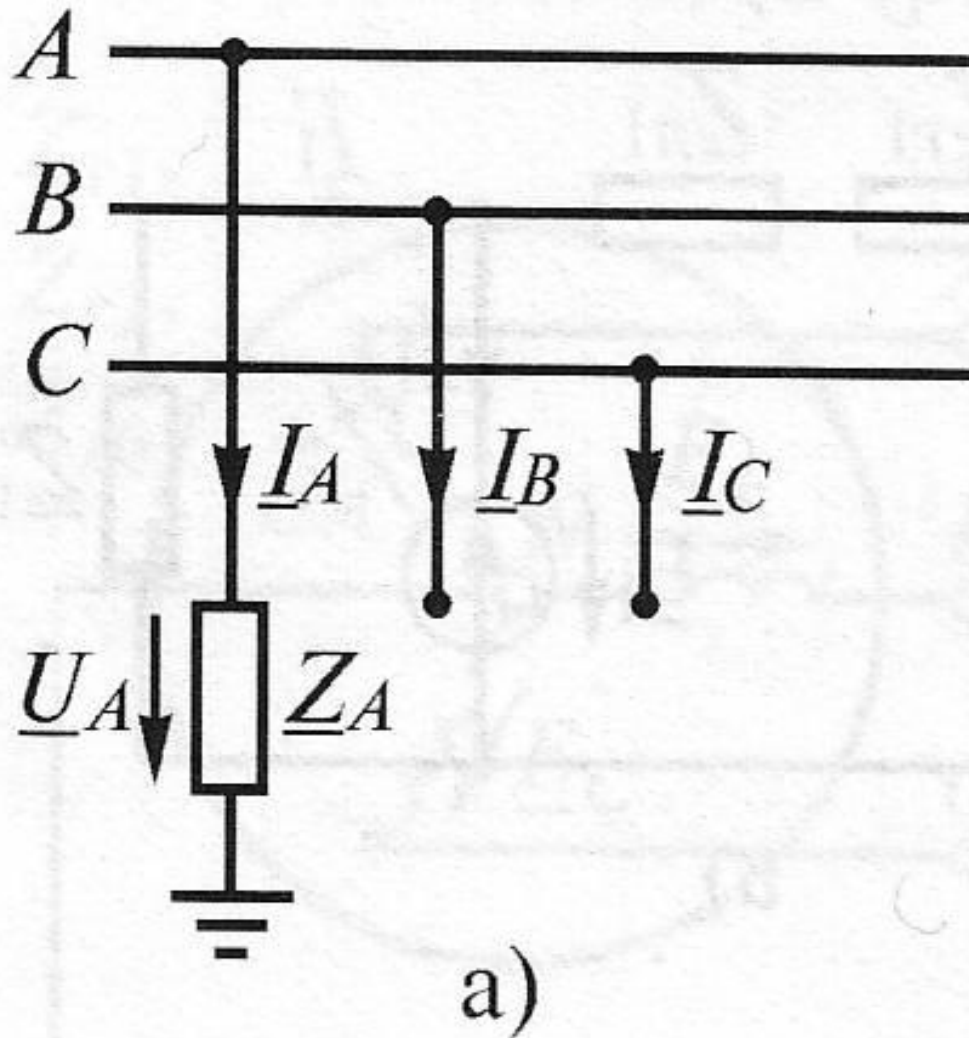
a)

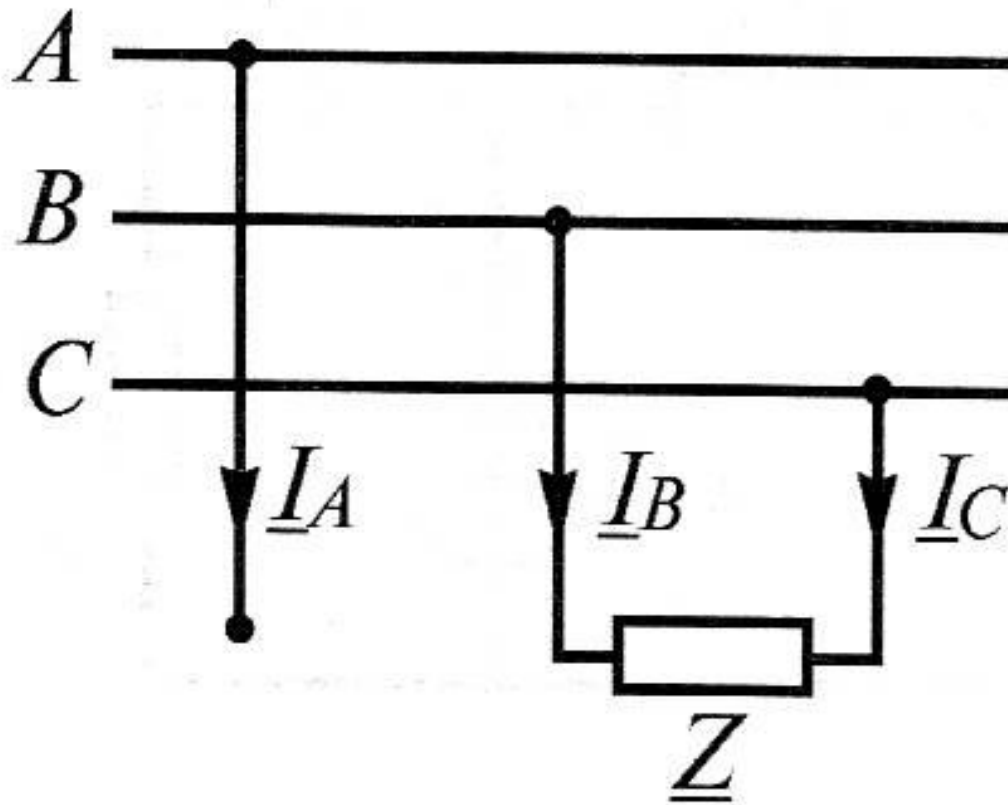


б)

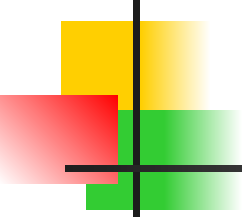


В)





б)



---

# **Особенности существования составляющих напряжений и токов нулевой последовательности**

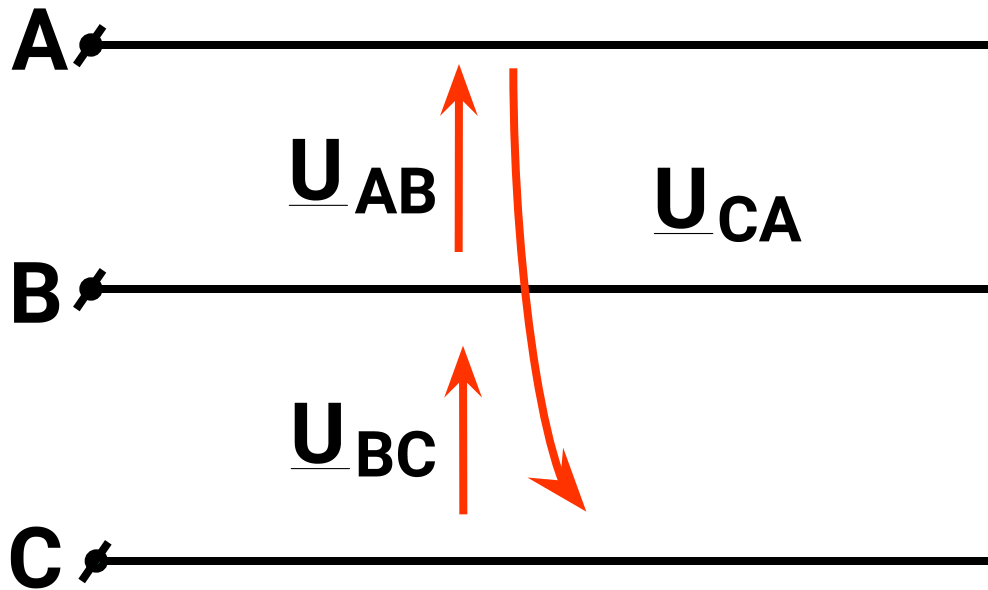


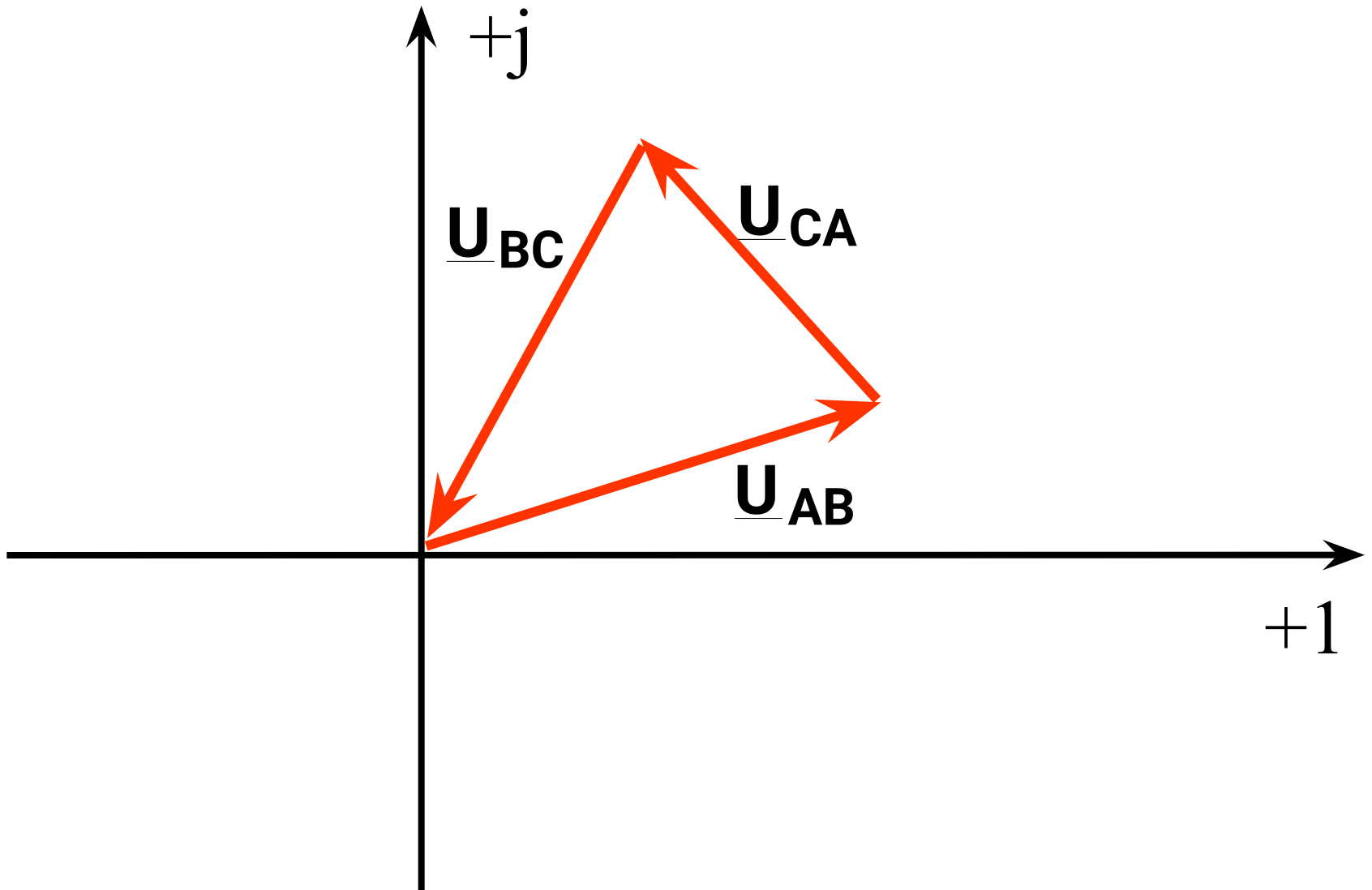


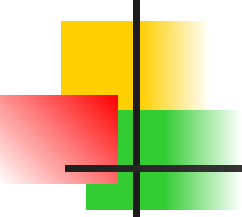
# 1. Линейные напряжения

---

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

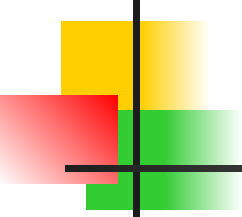






---

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



---

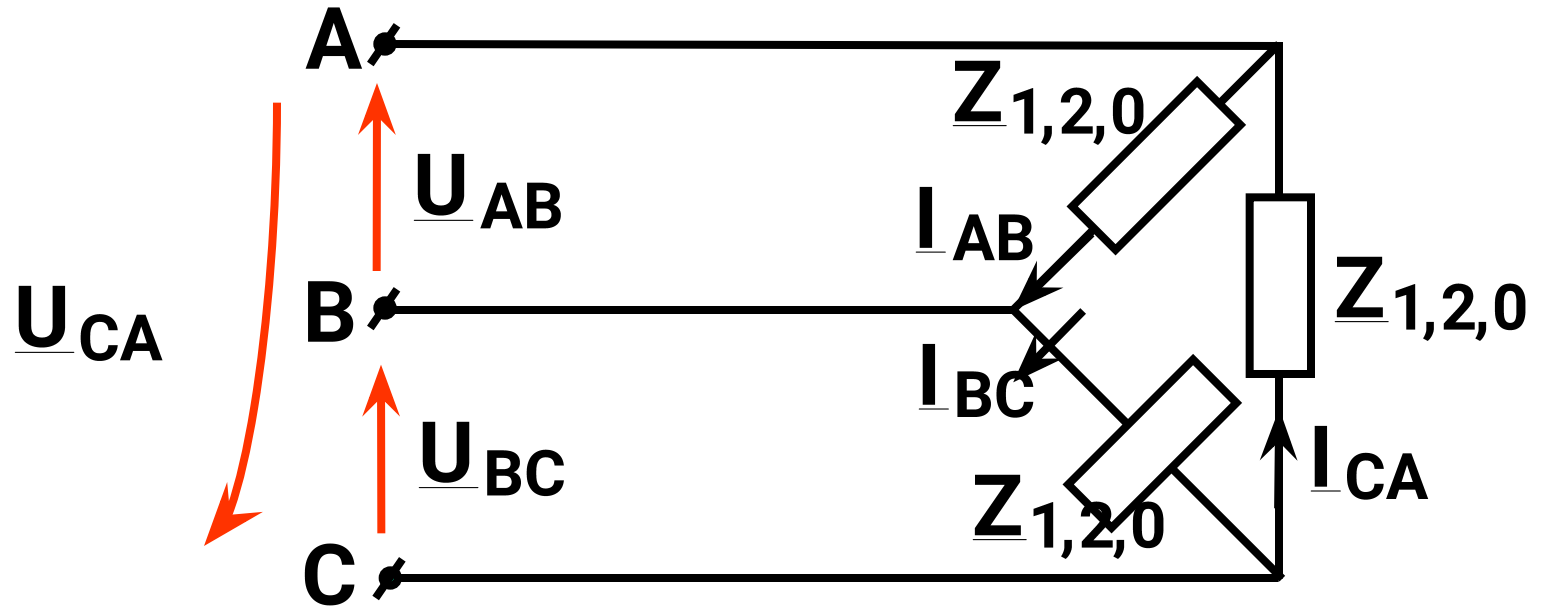
**Линейные напряжения не содержат  
составляющих нулевой  
последовательности**



## 2. Фазные токи треугольника

---

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





Так как

---

$$\underline{U}_{AB0} = \underline{U}_{BC0} = \underline{U}_{CA0} = 0,$$

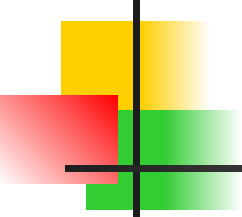
To

$$\underline{I}_{AB0} = \frac{\underline{U}_{AB0}}{\underline{Z}_0} = 0$$

$$\underline{I}_{BC0} = \frac{\underline{U}_{BC0}}{\underline{Z}_0} = 0$$

$$\underline{I}_{CA0} = \frac{\underline{U}_{CA0}}{\underline{Z}_0} = 0$$





---

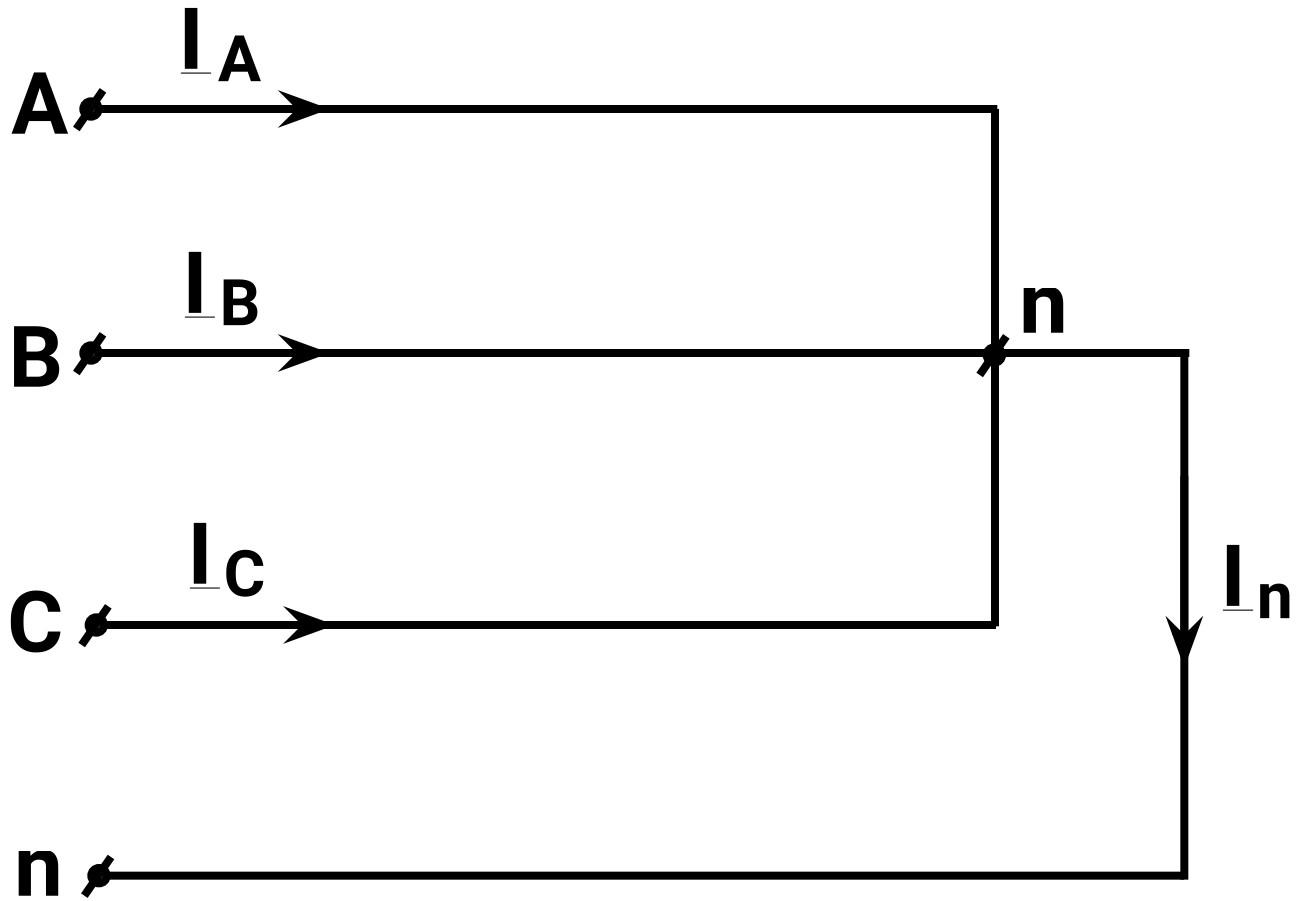
**Фазные токи нагрузки, соединенной  
в треугольник, не содержат  
составляющих нулевой  
последовательности.**



## 3. Ток нулевого провода

---


$$\underline{I}_n$$





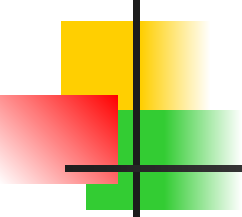
Так как

---

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

То

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



---

**Линейные токи звезды и пропорциональные им фазные напряжения содержат составляющие нулевой последовательности при наличии нулевого провода или связи с "землей", причем в нулевом проводе протекают только составляющие токов нулевой последовательности**