

---

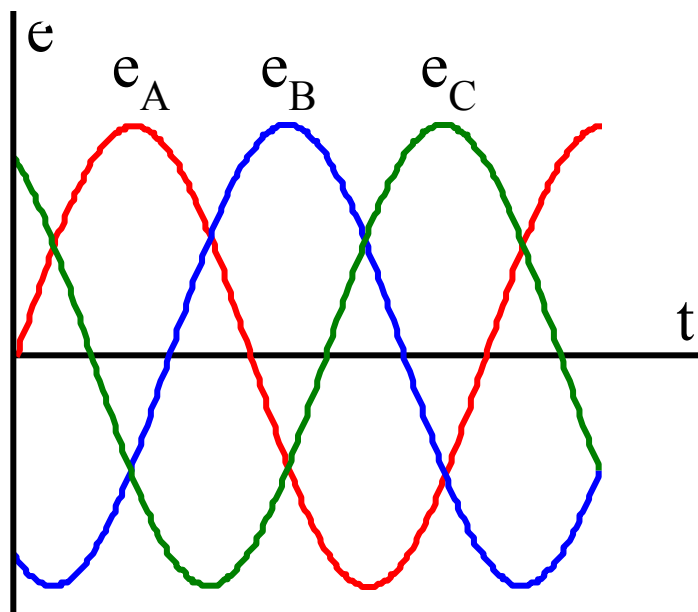
# Цепи трехфазного тока

---

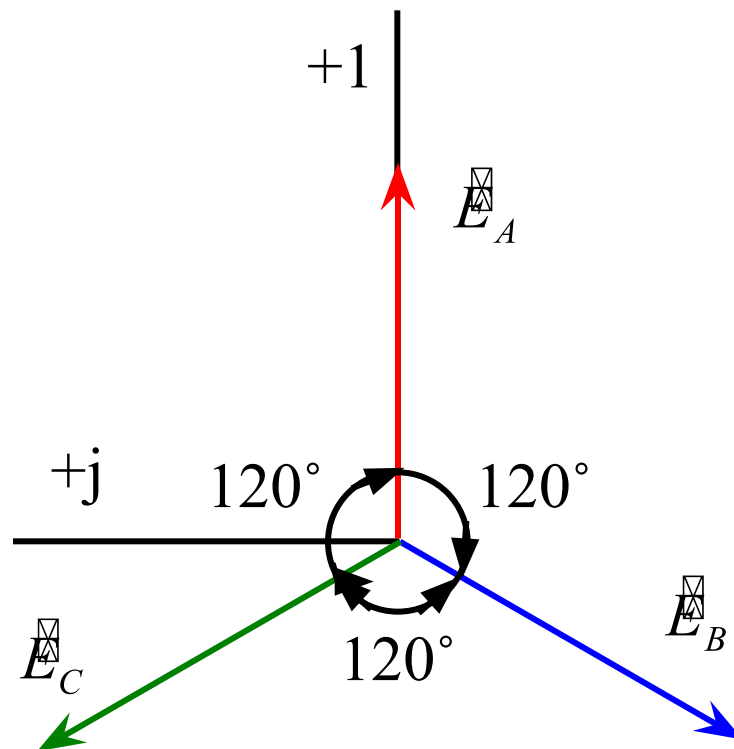
Лекция 8-9

## 7.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под трехфазной электрической цепью подразумевается совокупность трех однофазных цепей, в каждой из которых действуют источники ЭДС одной частоты, одинаковые по амплитуде и сдвинутые по фазе друг относительно друга на одну треть периода.



а



б

**Рисунок 7.1** - Временные (а) и векторные (б) диаграммы трехфазной системы ЭДС

При начальной фазе ЭДС  $e_A$ , равной нулю, мгновенные значения ЭДС выражаются следующим образом:

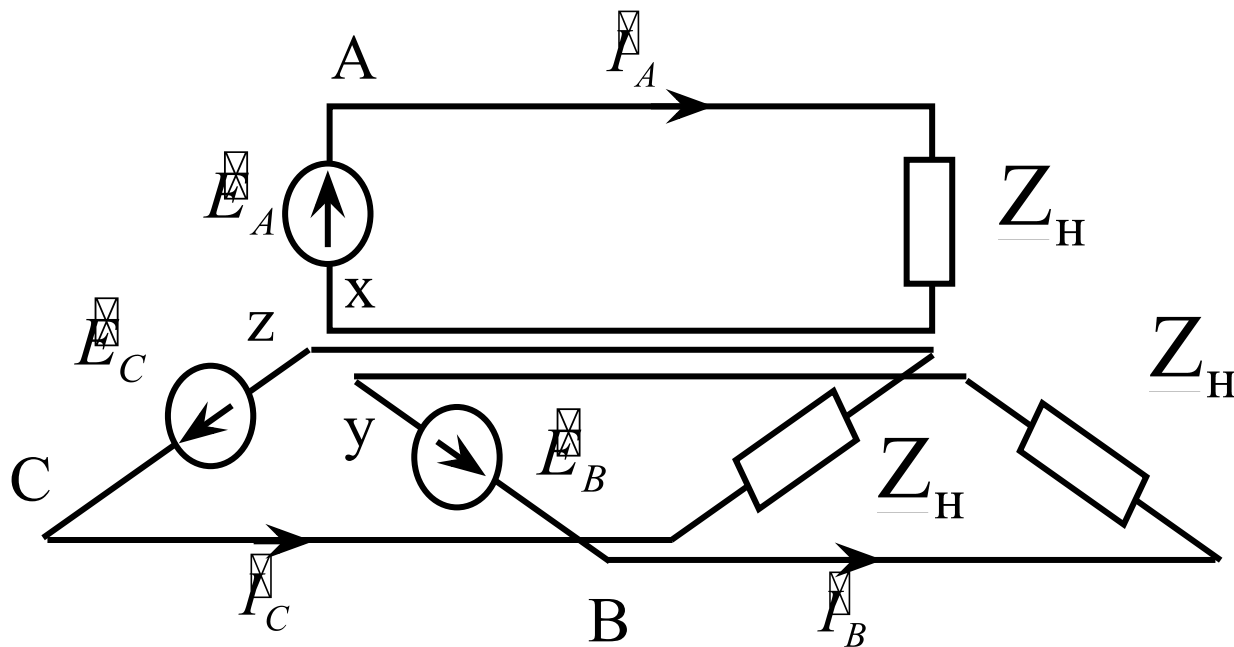
$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$e_C = E_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

$$e_A + e_B + e_C = 0;$$

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0.$$

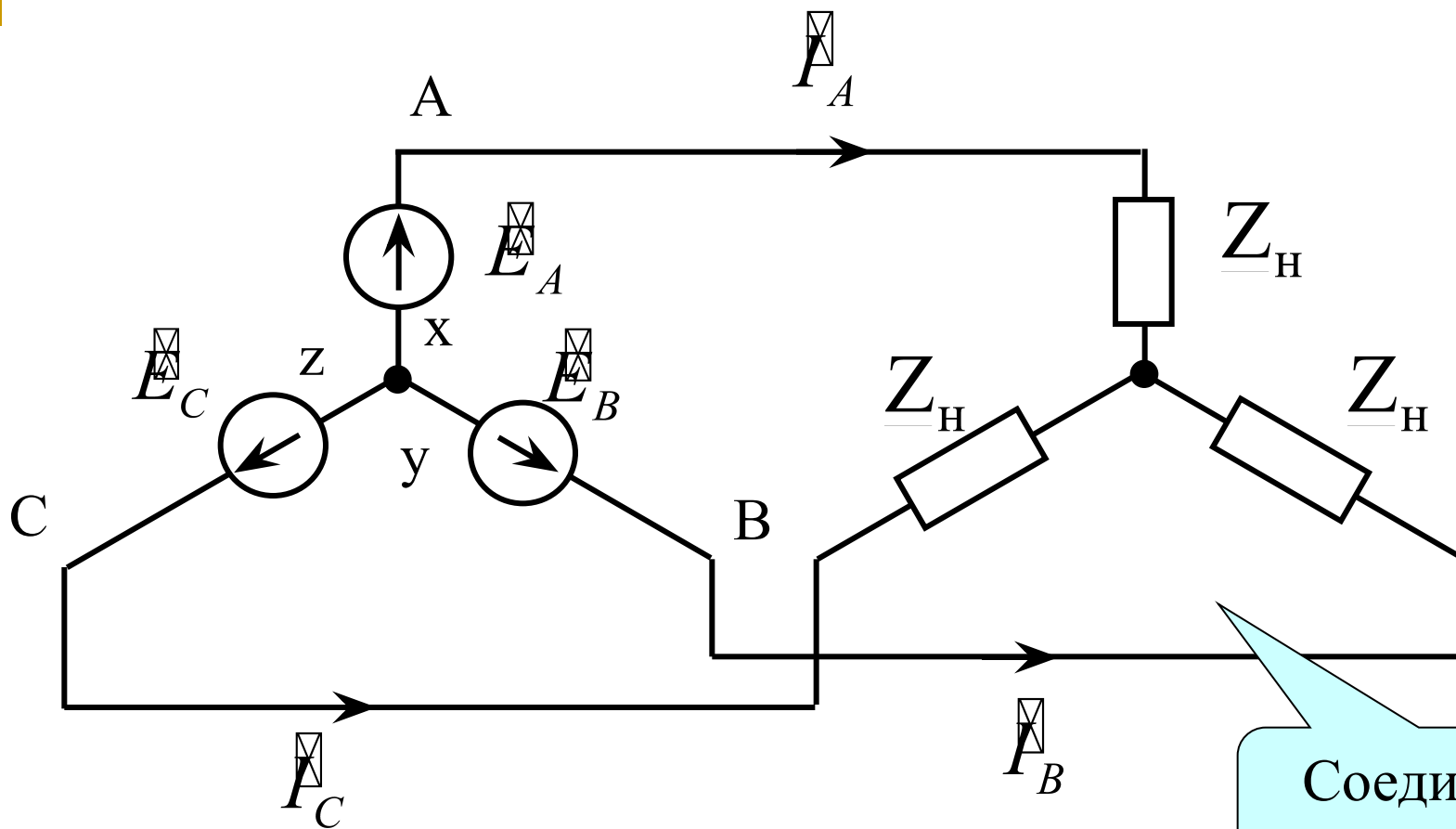


**Рисунок 7.2** - Несвязанная трехфазная электрическая система

$$\underline{Z}_{\text{HA}} = \underline{Z}_{\text{HB}} = \underline{Z}_{\text{HC}}$$

Токи в соединительных проводах сдвинуты на  $1/3$  периода. Сумма токов в обратных ветвях равна 0.

Можно объединить 3 обратных провода в один и за ненадобностью исключить.



Соединение  
«звезда»

**Рисунок 7.3** - Связанная трехфазная электрическая цепь

---

**Достоинствами трехфазных электрических цепей перед однофазными являются возможность получения вращающегося магнитного поля, что используется в электрических машинах, а также наличие в одной цепи двух эксплуатационных напряжений.**

---



---

Каждая фазная обмотка электрической машины имеет два вывода: **начало и конец**. За начало фазы обмотки генератора принимают вывод, к которому направлена положительная ЭДС. Обозначаются **начальные выводы** в зависимости от фазы символами **A, B и C**. Противоположные выводы называются **концами фаз** обмоток и обозначаются соответственно **X, Y и Z**.

Общая точка, соединяющая концы фаз генератора в узел называется **нейтралью трехфазной системы**. Обычно **напряжение нейтрали принимается равным нулю**.

---

---

Каждую из 3-х ЭДС генератора называют **фазой генератора**. Каждую из трех нагрузок – **фазой нагрузки**.

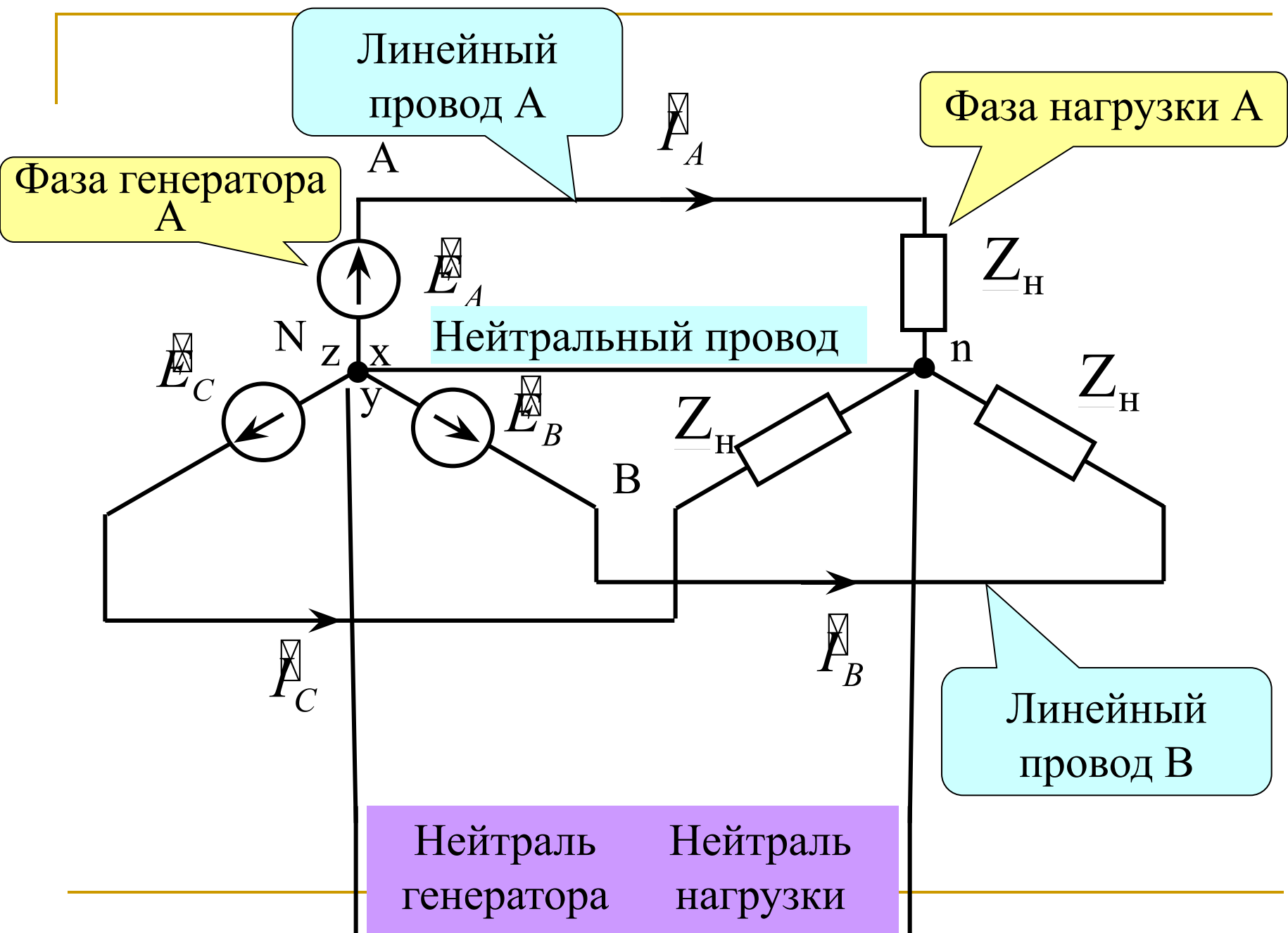
Ток, протекающий по фазе генератора или нагрузки – **фазный ток** соответственно генератора или нагрузки.

Ток в линейном проводе – **линейный ток**.

Напряжение на фазе генератора или нагрузки – **фазное напряжение**.

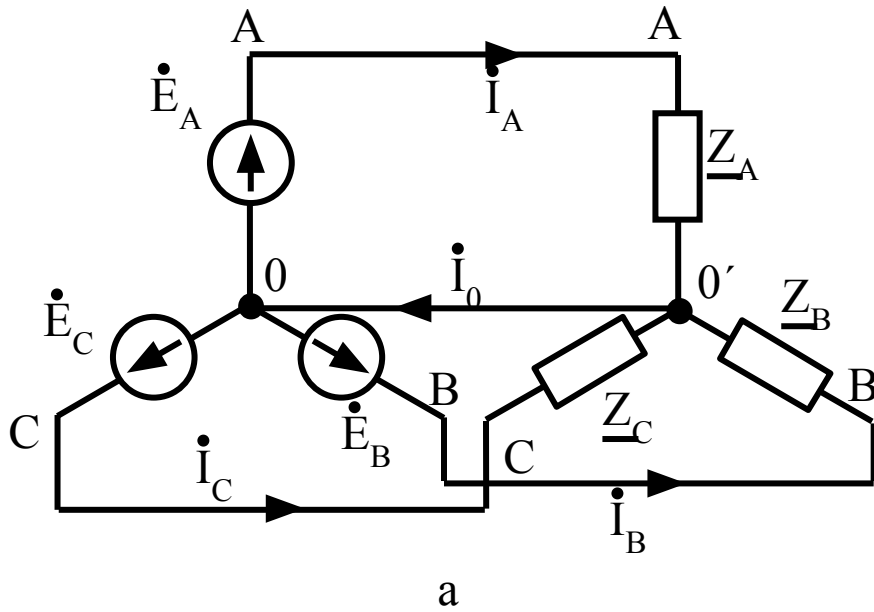
Напряжение между двумя линейными проводами – **линейное напряжение**.

---

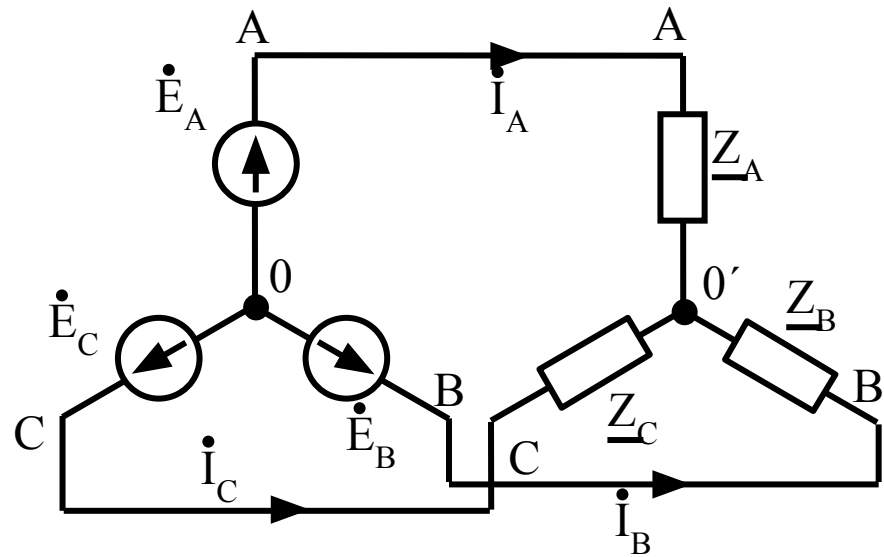


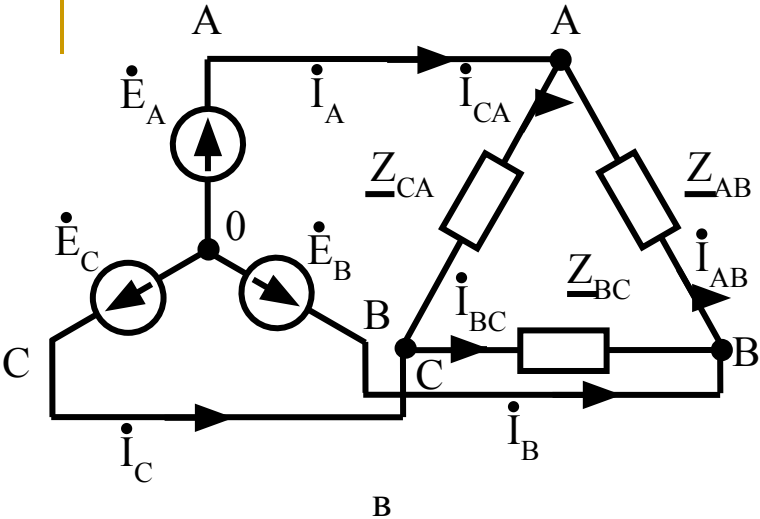
# Схемы соединений трехфазных цепей

звезда–звезда с нулевым проводом

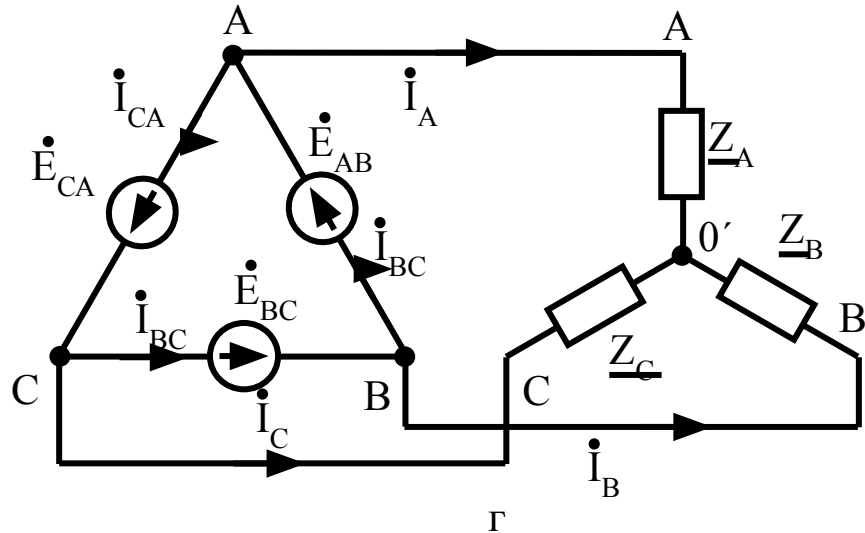


звезда–звезда

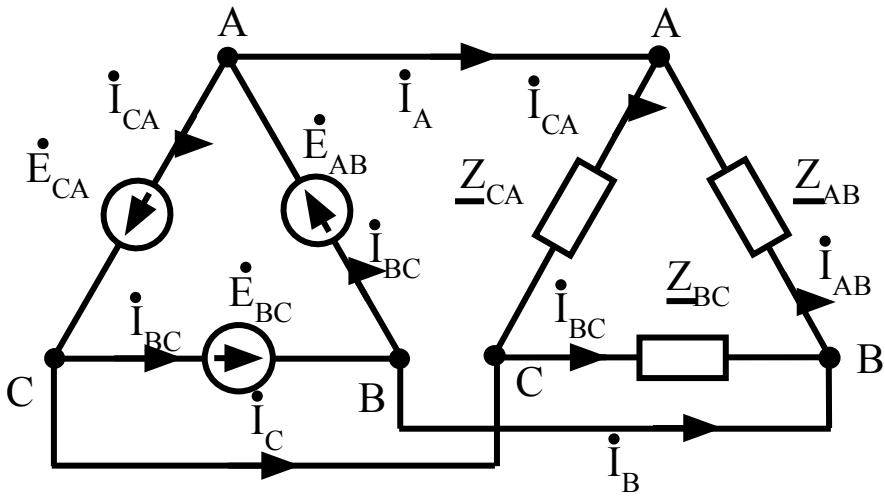




звезда-треугольник



треугольник-звезда



треугольник-треугольник

Д

## 7.2 Соотношения между фазными токами и напряжениями в схеме

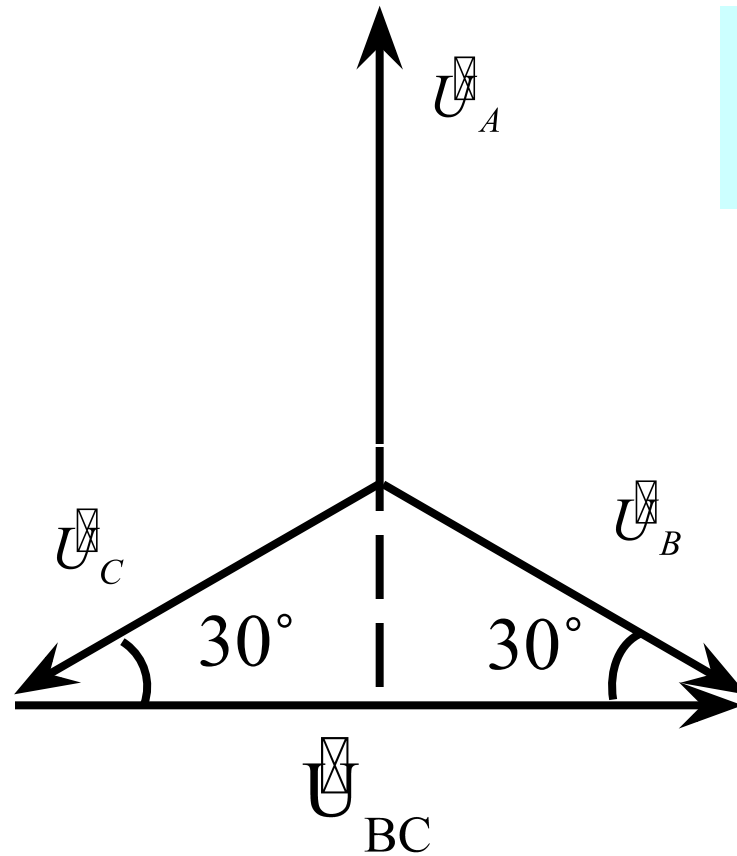
«Звезда»

$$I_{\phi A} = I_{лA}; \quad I_{\phi B} = I_{лB}; \quad I_{\phi C} = I_{лC},$$

$$I_{\phi} = I_{л}$$

$$U_{лAB} = U_A - U_B; \quad U_{лBC} = U_B - U_C;$$

$$U_{лCA} = U_C - U_A$$

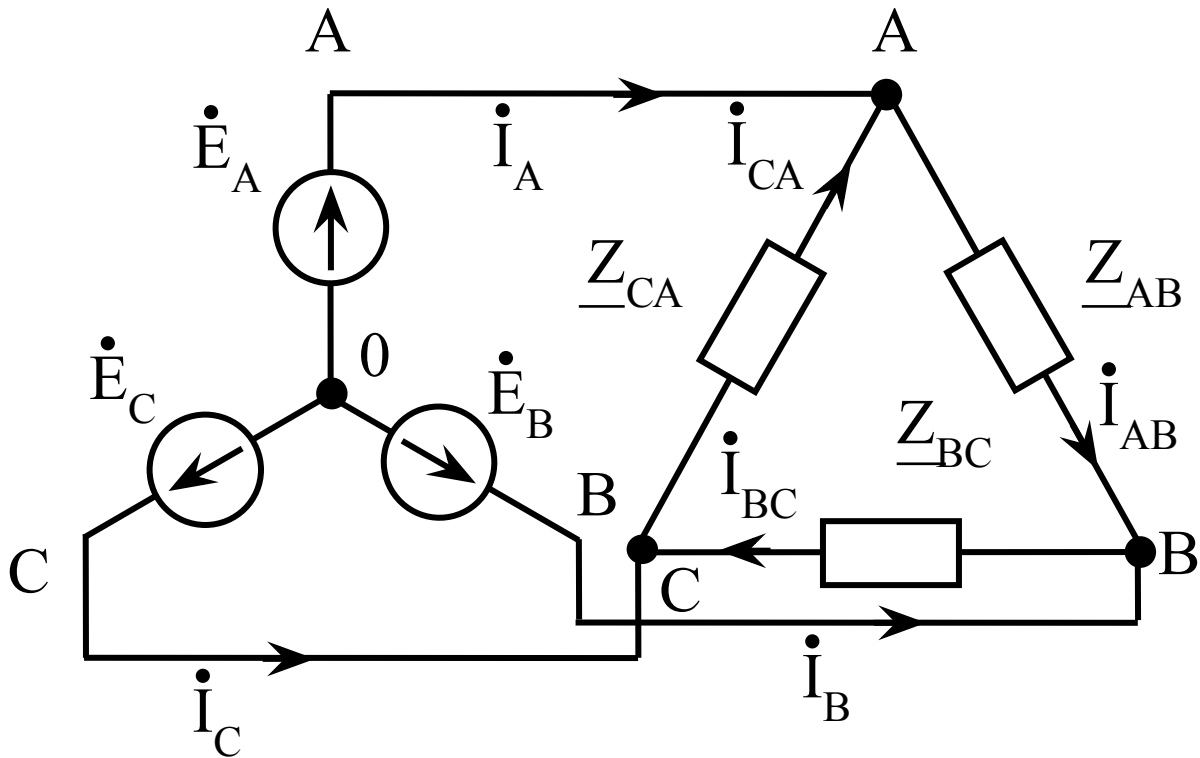


$$U_{\text{Л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$$

$$\frac{1}{2}U_{\text{BC}} = U_{\text{C}} \cos 30^{\circ} = \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\text{C}}$$

# Соотношения между фазными токами и напряжениями в схеме «треугольник»

Начало каждой фазы соединяется с концом другой.



$$U_{\Phi} = U_{Л}.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned}$$

$$I_{Л} = \sqrt{3} I_{\Phi}.$$



## 7.3 РАСЧЕТ СИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

**Симметричной трехфазной цепью** называется цепь, у которой соответствующие параметры элементов нагрузки в каждой из трех фаз равны, т.е. пассивная часть цепи фазы А повторяет пассивную часть цепей фаз В и С.

Особенностью симметричной трехфазной цепи является **равенство напряжений всех нейтралей, как генераторов, так и нагрузок.**

На практике стремятся уменьшить  $U_{nN}$  до нуля.

Напряжение между нейтралями (**напряжение смещения нейтрали**) находится методом двух узлов. В симметричной схеме это напряжение равно нулю.

**ЗАПОМНИТЬ:** 
$$U_{nN} = 0$$

1) Если есть нейтральный провод и его сопротивление равно 0 ( $Y_n = \infty$ ,  $U_{nN} = 0$ ). В нейтральном проводе никогда не устанавливают предохранители

---

$$U_{nN} = \frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_n} = 0$$

---

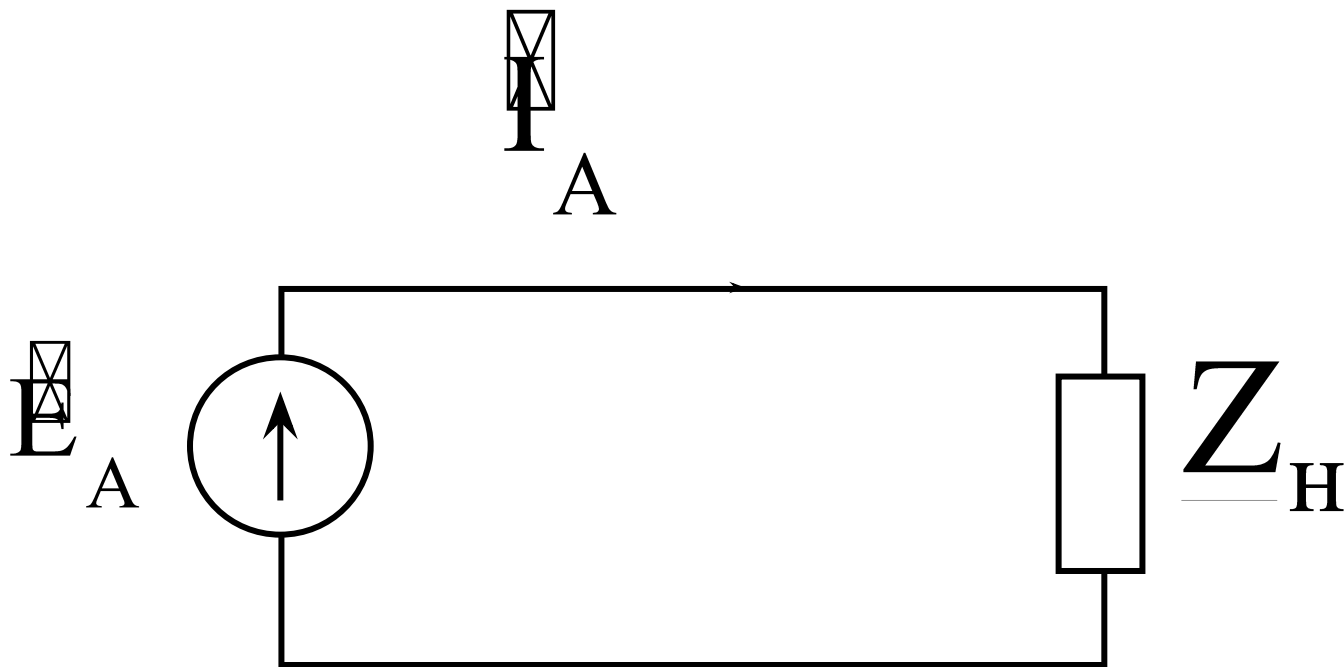
2) Если нагрузка . Можно убрать нейтральный провод (трехпроводная цепь)

$$\begin{aligned} U_{nN} &= \frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_n} = \\ &= \frac{(E_A + E_B + E_C) \cdot Y_\phi}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_n} = 0 \end{aligned}$$

Эта особенность позволяет в расчетах «развязать» связанную трехфазную цепь на три однофазные, а так как фазные токи трех фаз равны между собой и сдвинуты относительно друг друга на треть периода, то достаточно **рассчитать только одну однофазную цепь**, а результаты с соответствующими фазовыми сдвигами перенести на другие фазы.

Если нагрузка включена «треугольником», его следует преобразовать в эквивалентную «звезду», при этом сопротивления нагрузки уменьшатся в три раза. Истинные токи нагрузок будут в  $\sqrt{3}$  раз меньше рассчитанных для схемы «звезда».

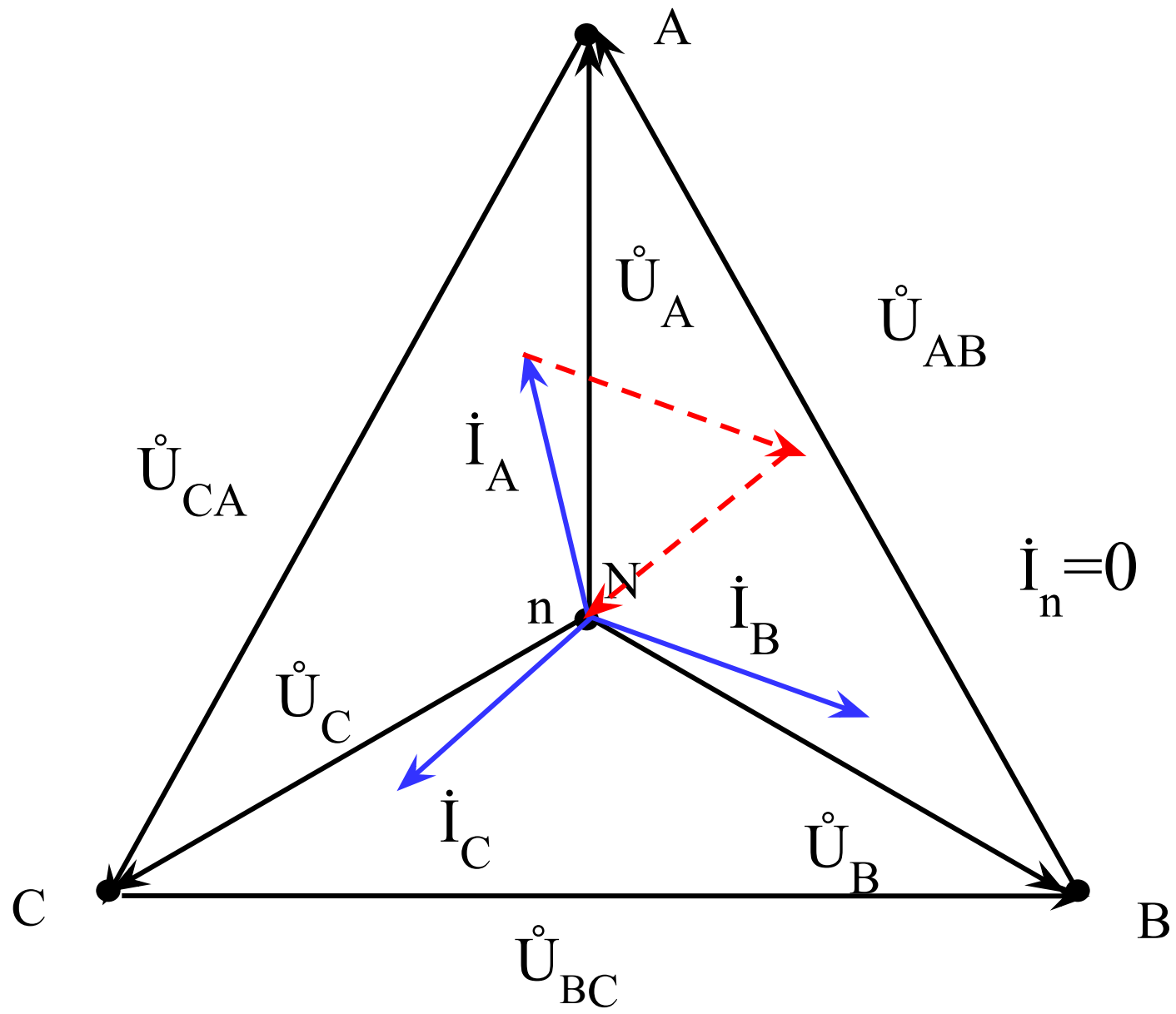
Если генераторы соединены «треугольником», то преобразование в «звезду» уменьшит сопротивление генераторов в три раза, а величины ЭДС – в  $\sqrt{3}$  раз.



---

**Необходимо твердо запомнить, что на комплексной плоскости жестко зафиксированы положения точек  $N$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , определяемые значениями фазных ЭДС. Положения остальных точек определяются схемой соединений и соотношением параметров элементов.**

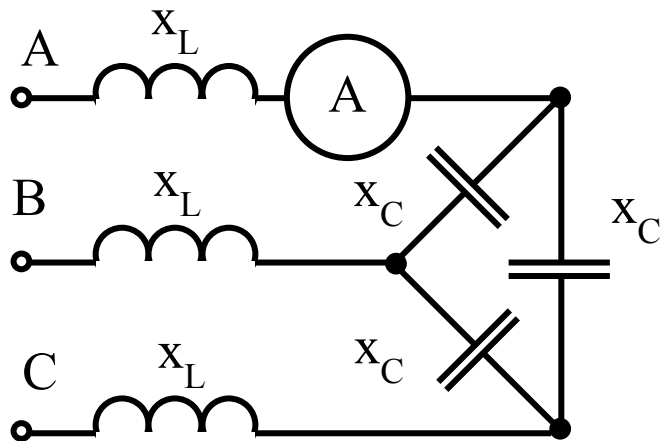
---



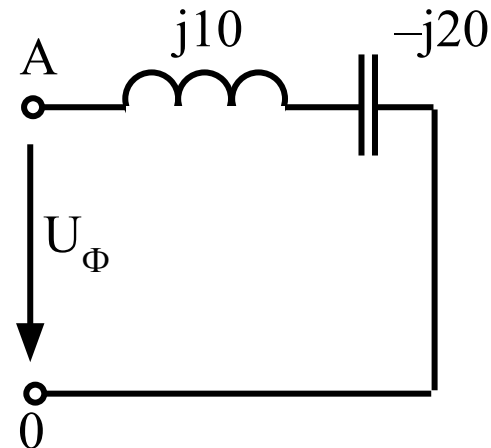


# Пример

К трехфазной цепи приложена симметричная система линейных напряжений  $U_{\text{Л}} = 220 \text{ В}$ ,  $x_{\text{L}} = 10 \text{ Ом}$ ,  $x_{\text{C}} = 60 \text{ Ом}$ . Определить показания амперметра.



а



б

$$x_A = \frac{x_{AB} \cdot x_{BC}}{x_{AB} + x_{AC} + x_{BC}}.$$

$$X_{CB} = X_{BC} = X_{CA} = \frac{X_C^2}{3X_C} = 20 \text{ Ом.}$$

$$I_A = \frac{U_{\Phi A}}{jx_{\Sigma}} = \frac{220e^{j0}}{\frac{\sqrt{3}}{j(10-20)}} = j12,7 \text{ A.}$$

## 7.4. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

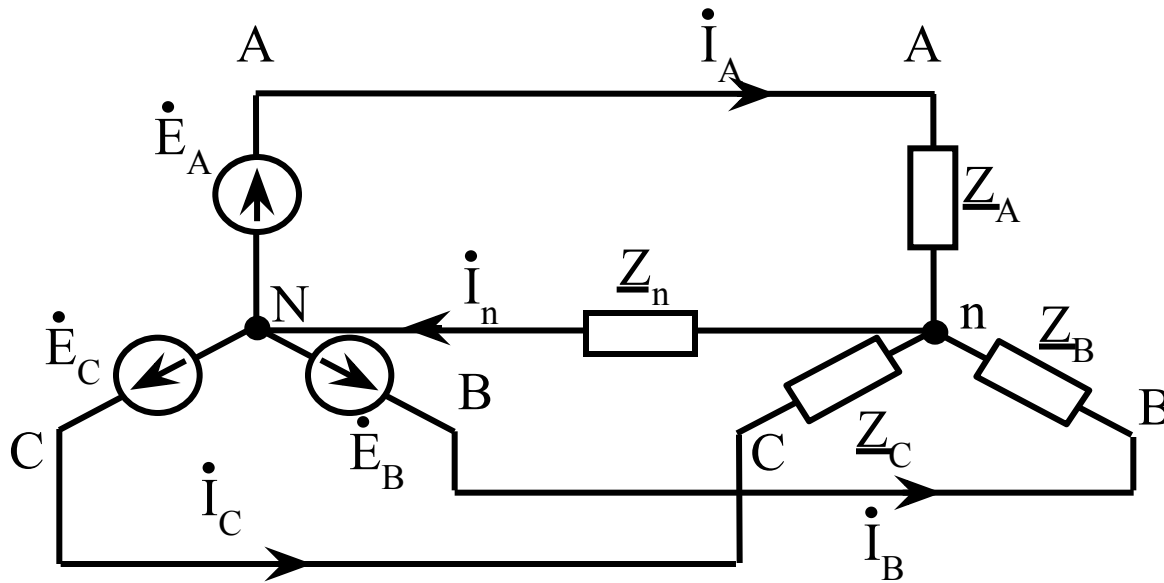
Звезда с нейтральным проводом,  $Z_n=0$ ,  $U_{nN} = 0$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A}, \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B}, \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_C}.$$

Ток в нейтральном проводе определится на основании первого закона Кирхгофа:

$$\underline{I}_n = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

# Звезда с нейтральным проводом, $Z_n \neq 0$ , $U_{nN} \neq 0$



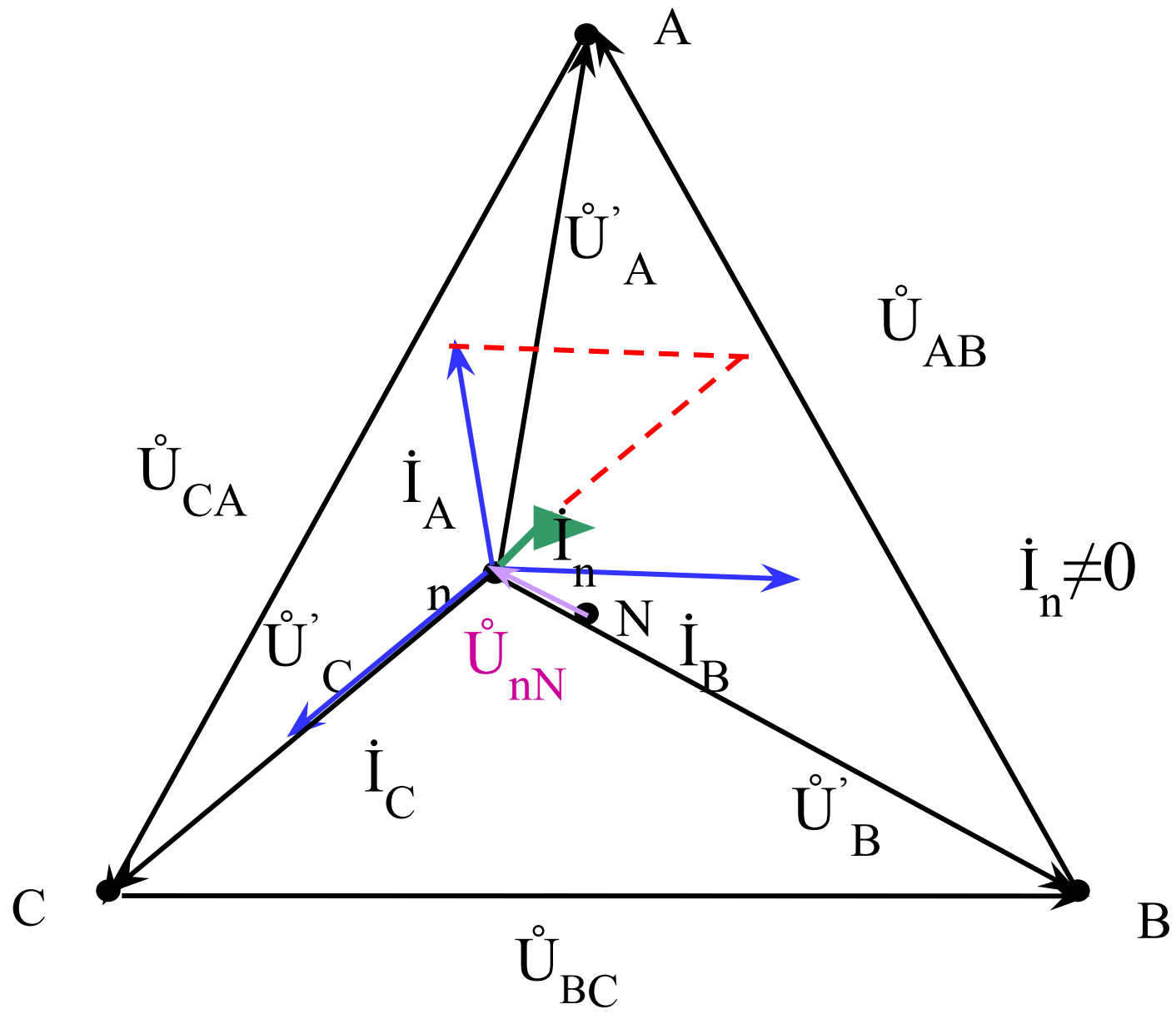
$$1) U_{nN} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_n}$$

$$2) U'_A = E_A - U_{nN}; \quad U'_B = E_B - U_{nN};$$

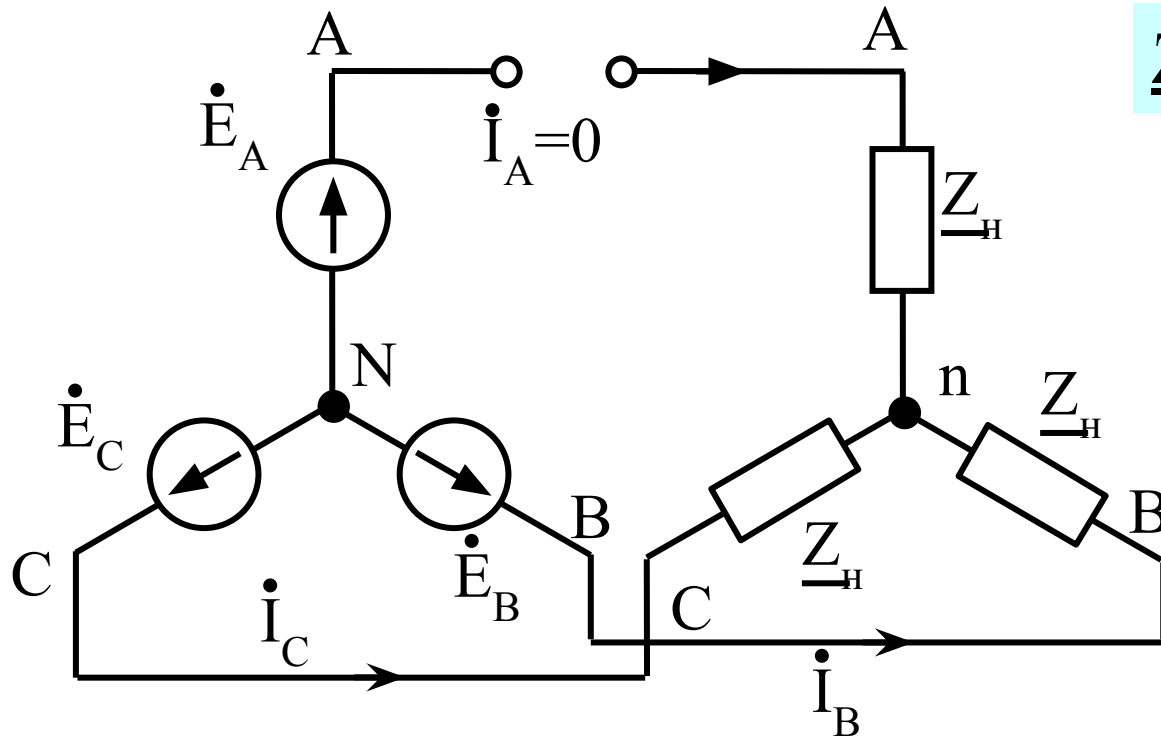
$$U'_C = E_C - U_{nN}$$

$$3) I_A = \frac{U'_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U'_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U'_C}{Z_C};$$

$$I_n = \frac{U_{nN}}{Z_n} \text{ ИЛИ } I_n = I_A + I_B + I_C$$



# Обрыв линейного провода в трехфазной трехпроводной цепи



$$\underline{Z}_A = \infty; \underline{Y}_A = 0$$

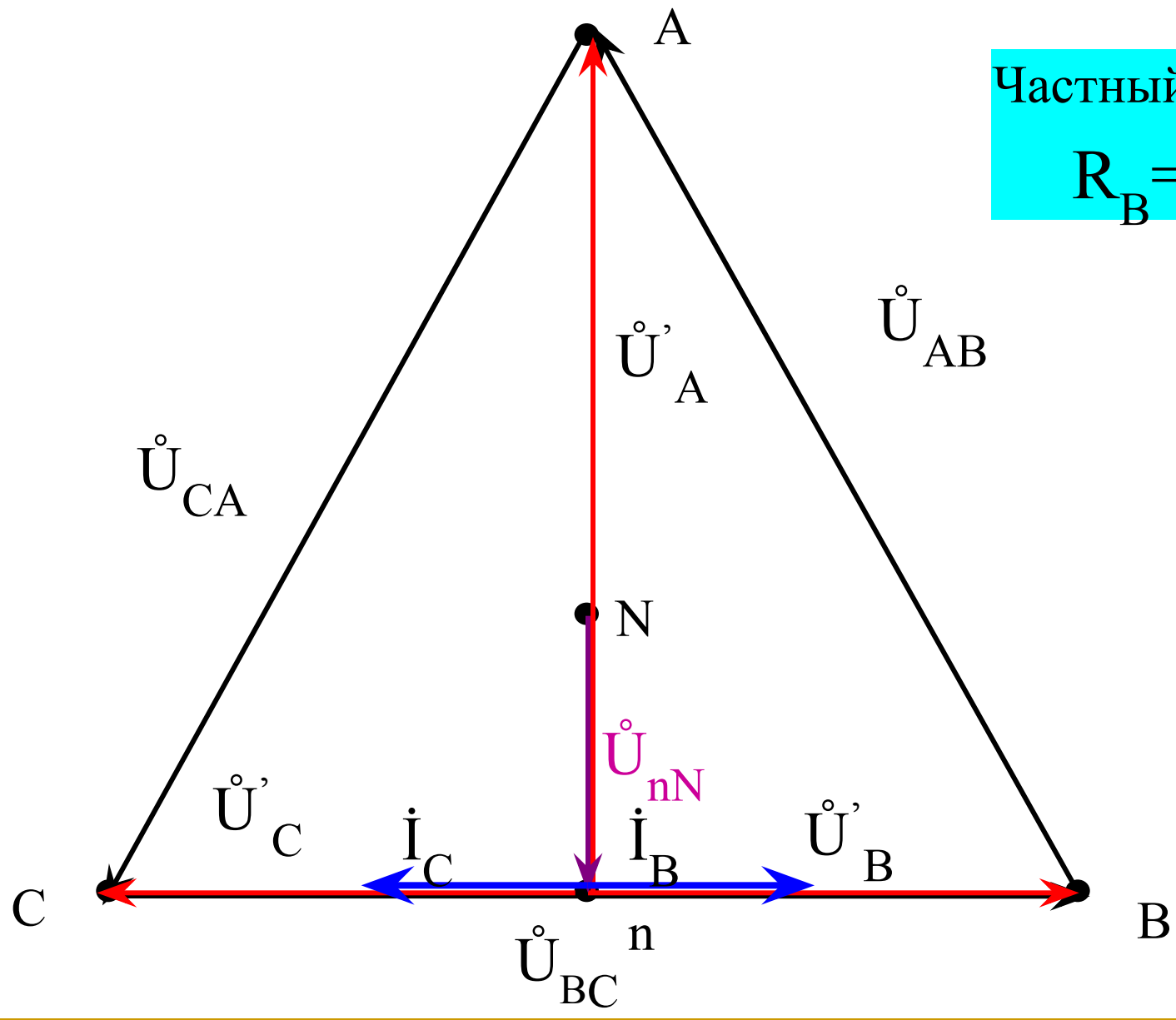
$$1) U_{nN} = \frac{E_A \cdot 0 + E_B Y_B + E_C Y_C}{0 + Y_B + Y_C}$$

$$2) U'_A = E_A - U_{nN}; \quad U'_B = E_B - U_{nN}; \\ U'_C = E_C - U_{nN}$$

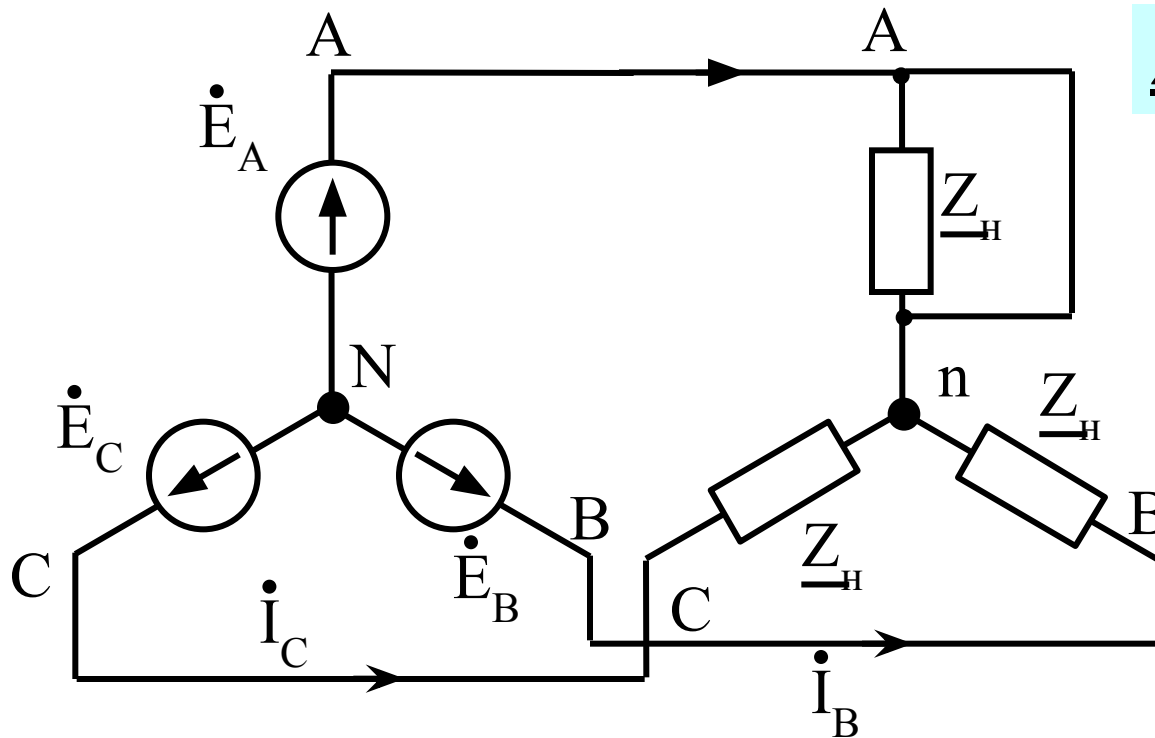
$$3) I_A = 0; \quad I_B = \frac{U'_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U'_C}{Z_C}$$



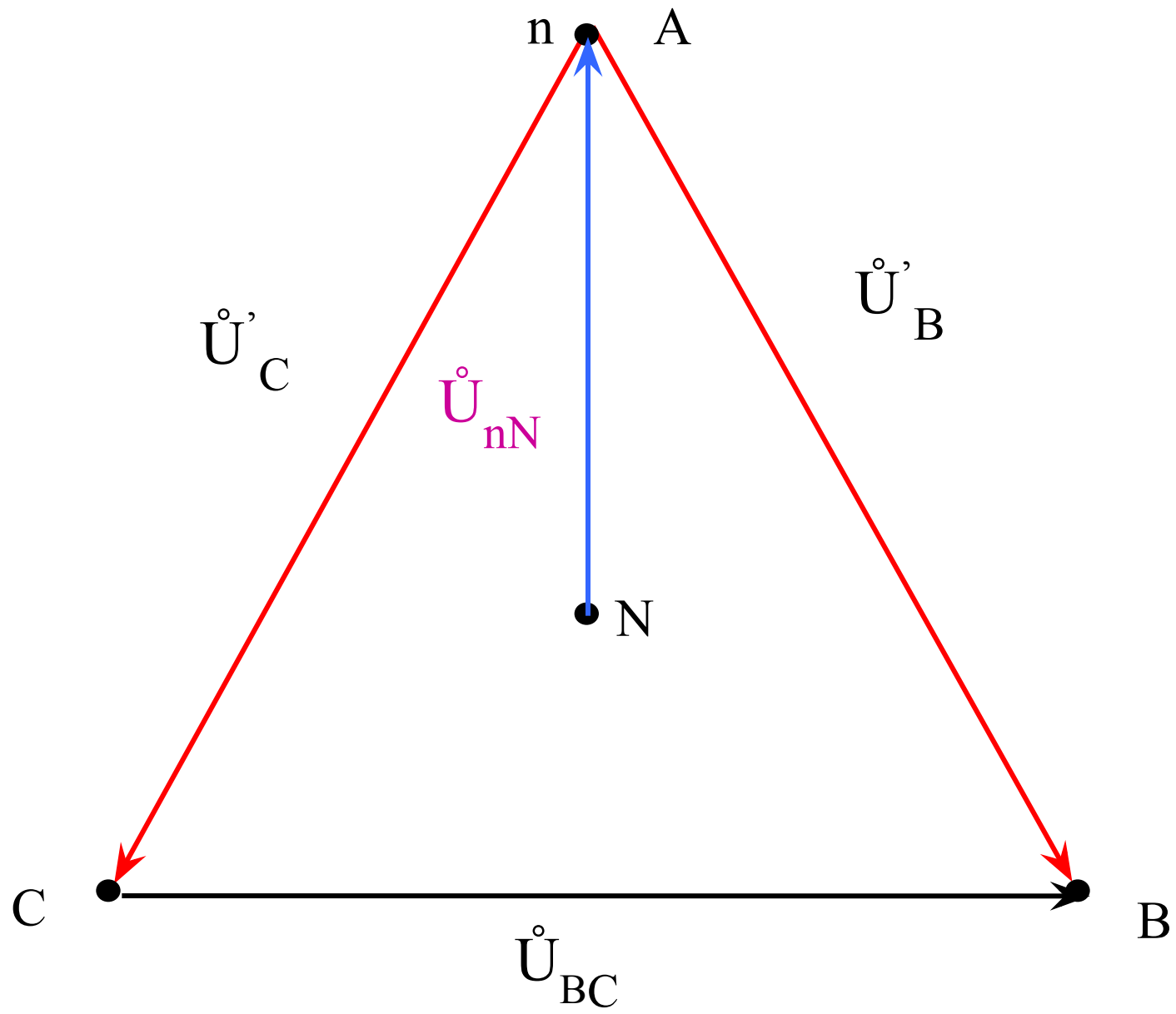
Частный случай  
 $R_B = R_C$



# Короткое замыкание фазы А в трехпроводной цепи



$$\underline{Z}_A = 0; \underline{Y}_A = \infty$$



$$1) U_{nN} = E_A$$

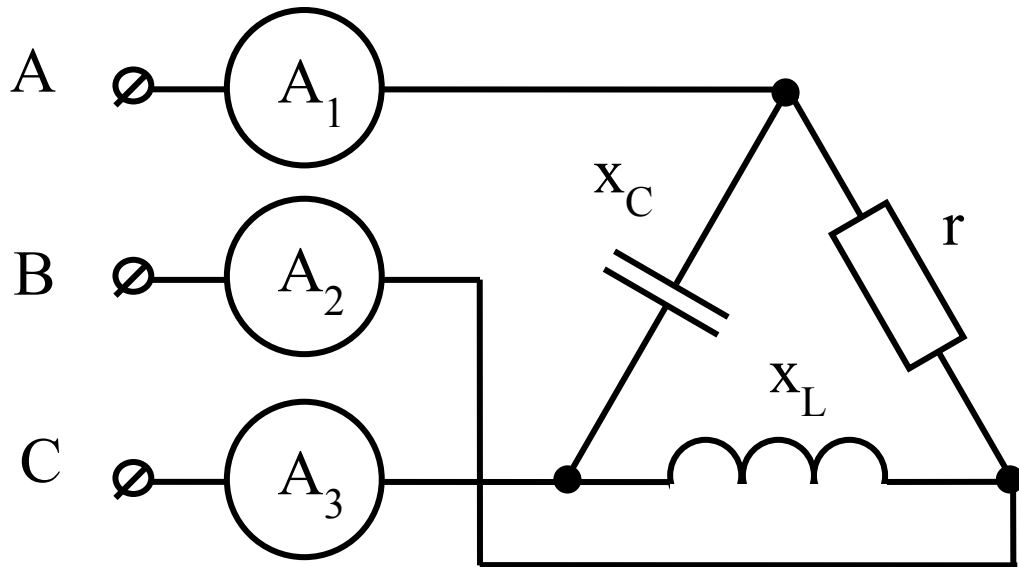
$$2) U'_A = 0;$$

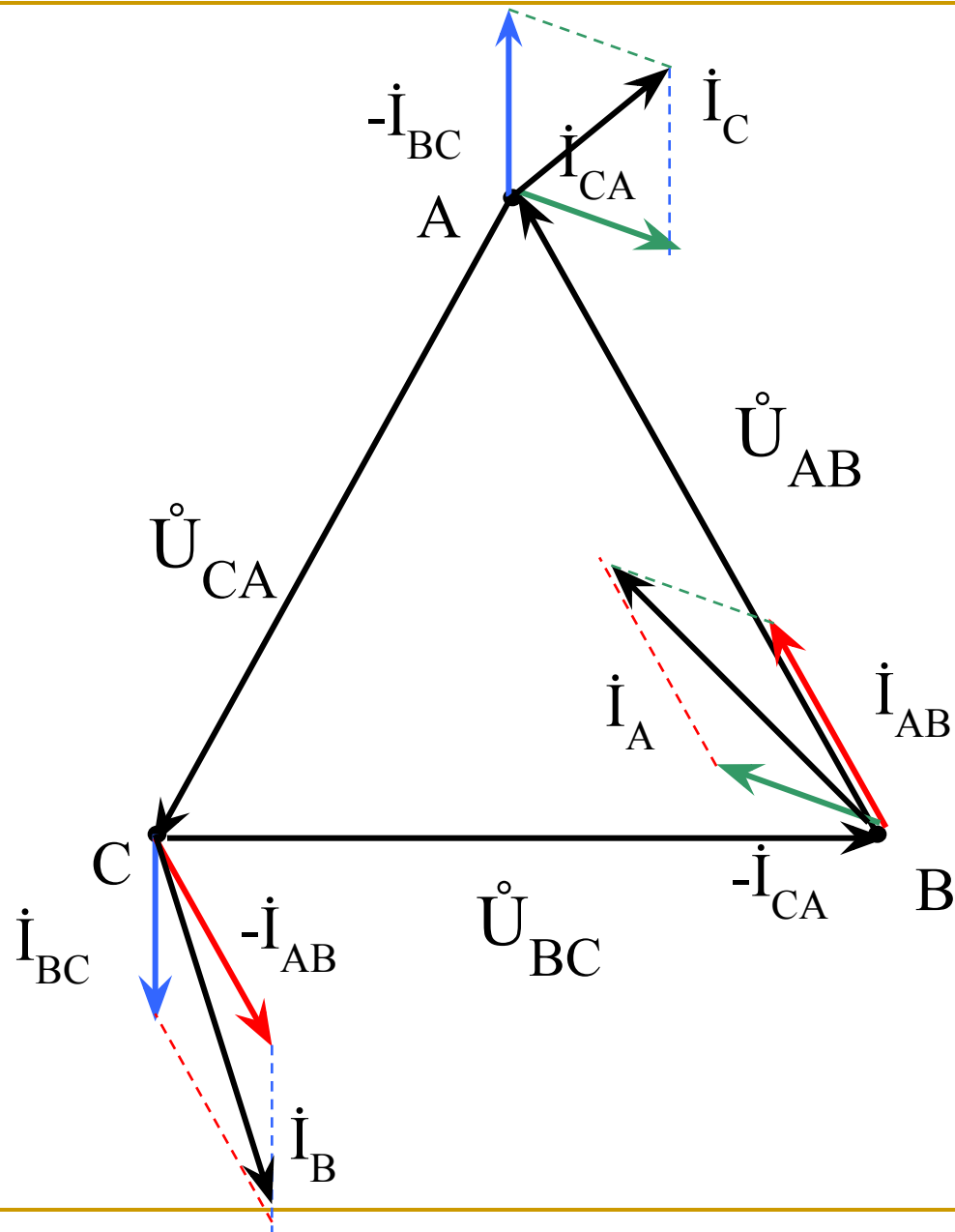
$$U'_B = E_B - U_{nN} = E_B - E_A = -U_{AB};$$

$$U'_C = E_C - E_A = U_{CA}$$

Напряжения на других фазах возрастают в  $\sqrt{3}$  раз.

# Пример

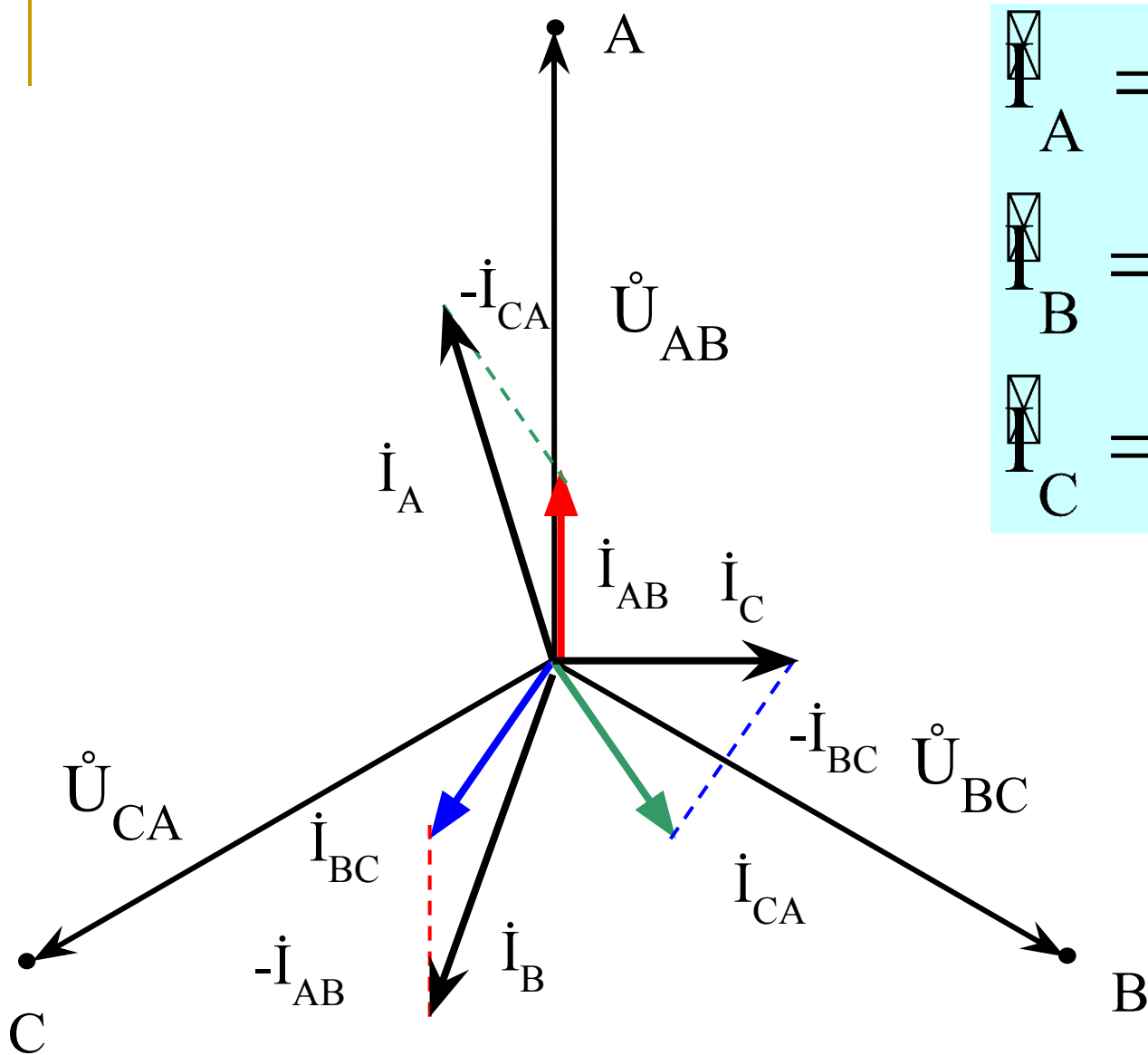




$$\dot{i}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA};$$

$$\dot{i}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB};$$

$$\dot{i}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC}.$$



$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned}$$

Возможное начертание векторной диаграммы

## 7.5 АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ, ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

При соединении обмоток генератора «звездой»:

$$P = P_A + P_B + P_C = E_A I_A \cos \varphi_A + E_B I_B \cos \varphi_B + E_C I_C \cos \varphi_C.$$

При соединении обмоток генератора «треугольником»:

$$P = E_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB} + E_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC} + E_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}$$

Если трехфазная цепь симметрична:

$$P = 3E_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi = \sqrt{3} E_L I_L \cos \varphi,$$



## Реактивная мощность трехфазной цепи:

При соединении обмоток генератора «звездой»:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = E_A I_A \sin \varphi_A + E_B I_B \sin \varphi_B + E_C I_C \sin \varphi_C.$$

При соединении обмоток генератора «треугольником»:

$$Q = E_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB} + E_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC} + E_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}.$$

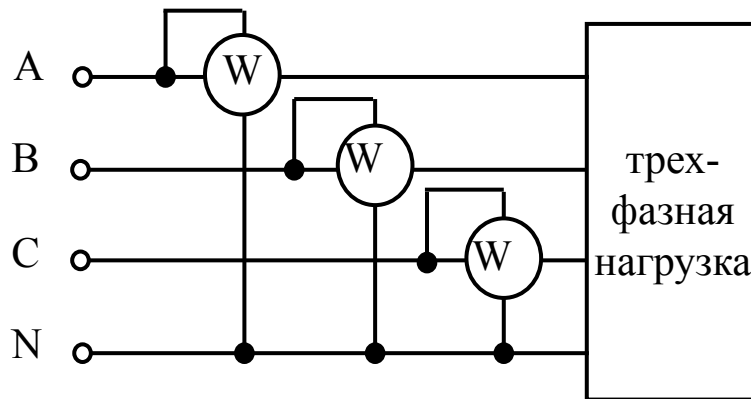
Если трехфазная цепь симметрична:

$$Q = 3E_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3} E_L I_L \sin \varphi,$$

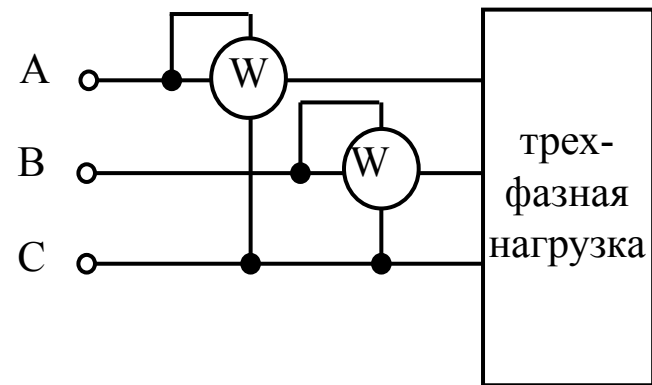
Полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

$$S = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$$



а



б

**Рисунок** - Схемы измерения мощности в трехфазных цепях с нейтральным проводом (а), при его отсутствии (б)

---

# Самостоятельная работа

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ:**

Последовательное, параллельное и смешанное соединение элементов

---