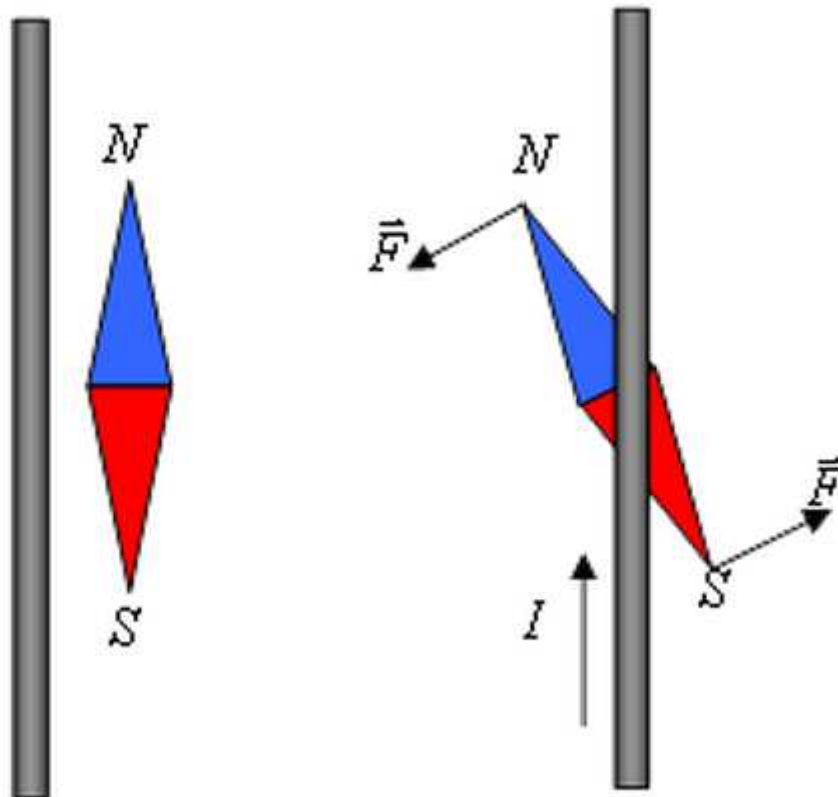
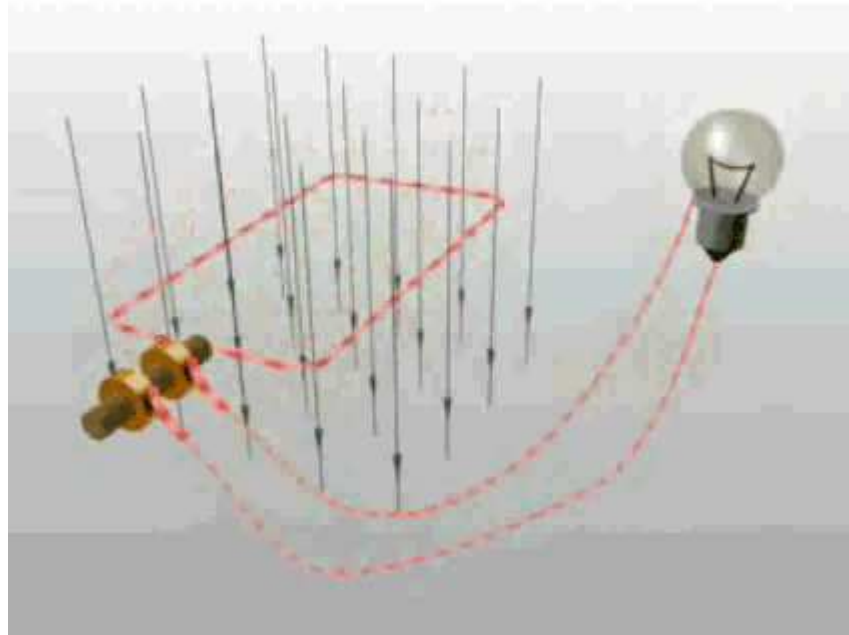
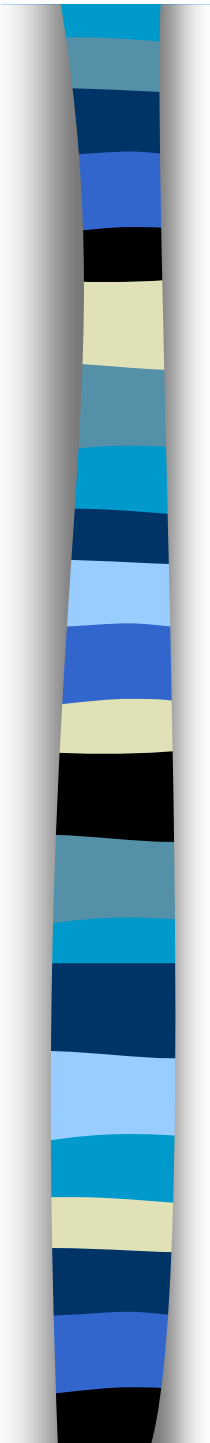


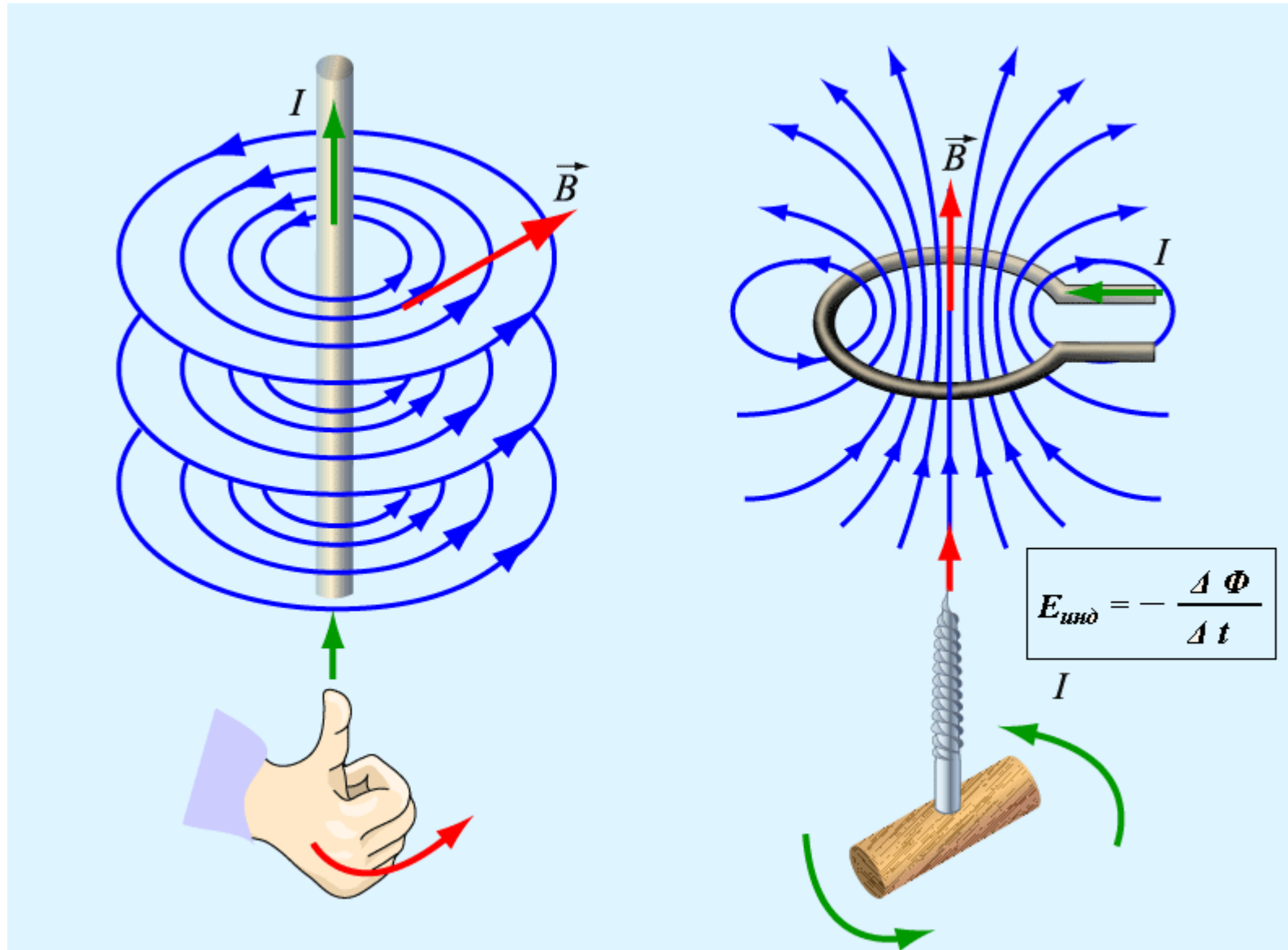
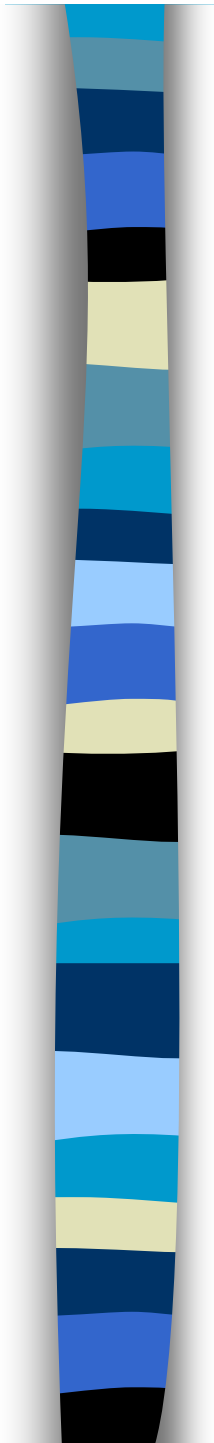


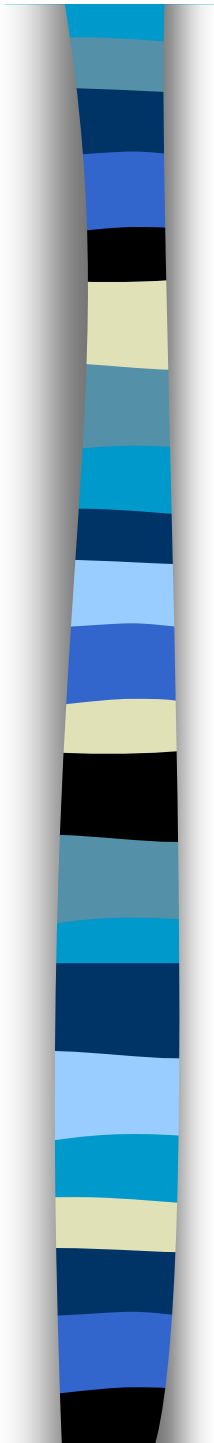
# Трехфазные цепи

# Магнитное поле

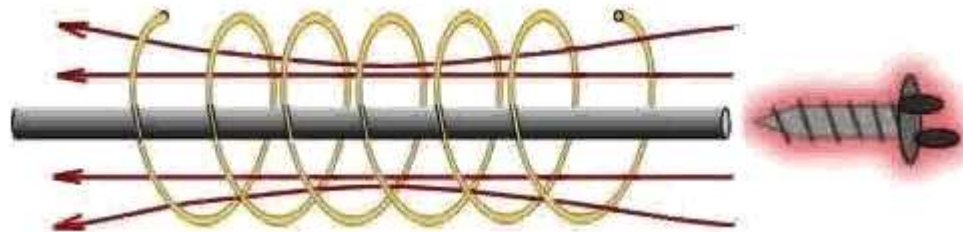
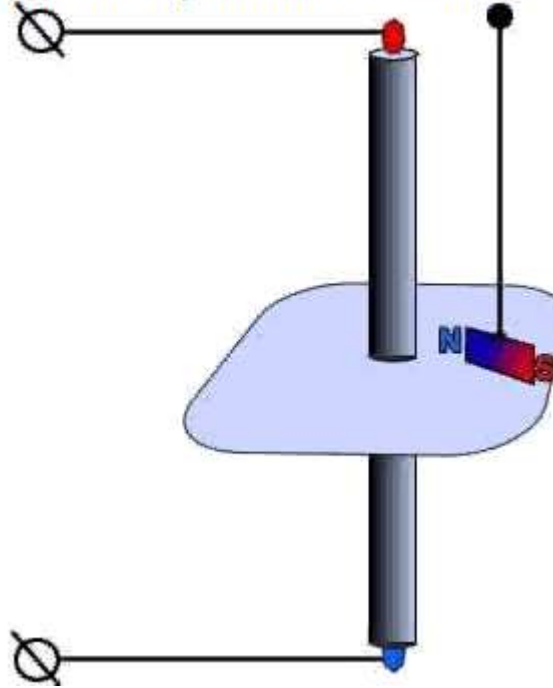








Магнитное поле  
прямого проводника с током





# Магнитная индукция

$$B = \frac{F}{I \cdot l}$$

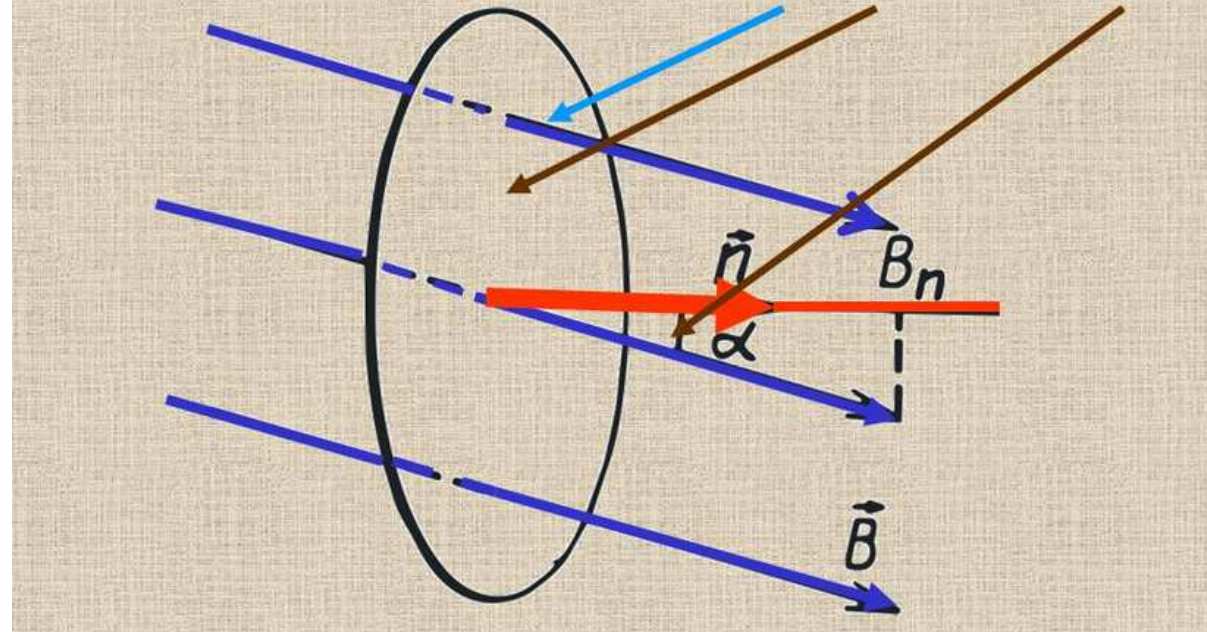
$I$  – ток в проводнике

$l$  – длина проводника

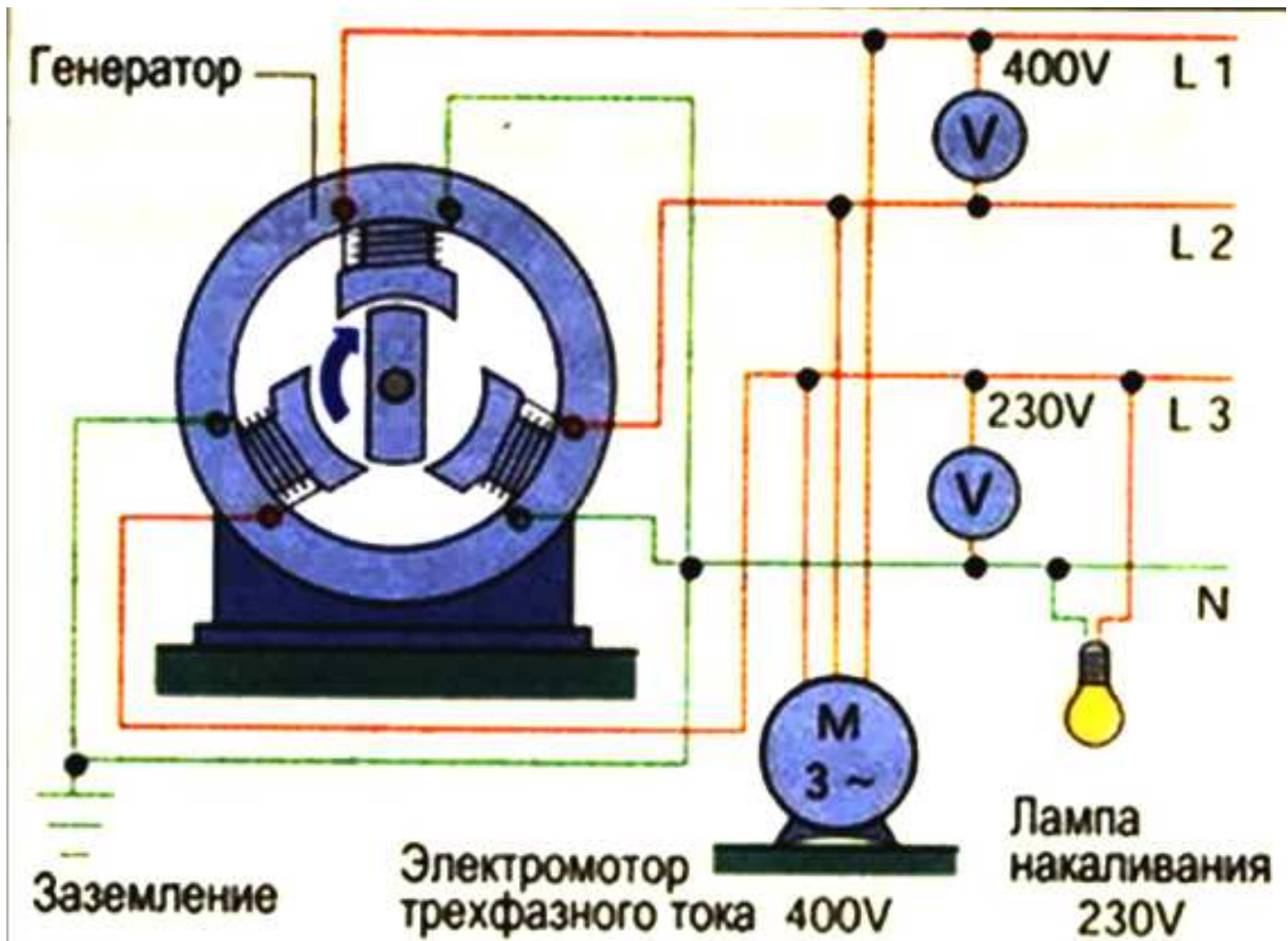
$F$  – сила, действующая на проводник  
(сила Ампера)

## Магнитный поток

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

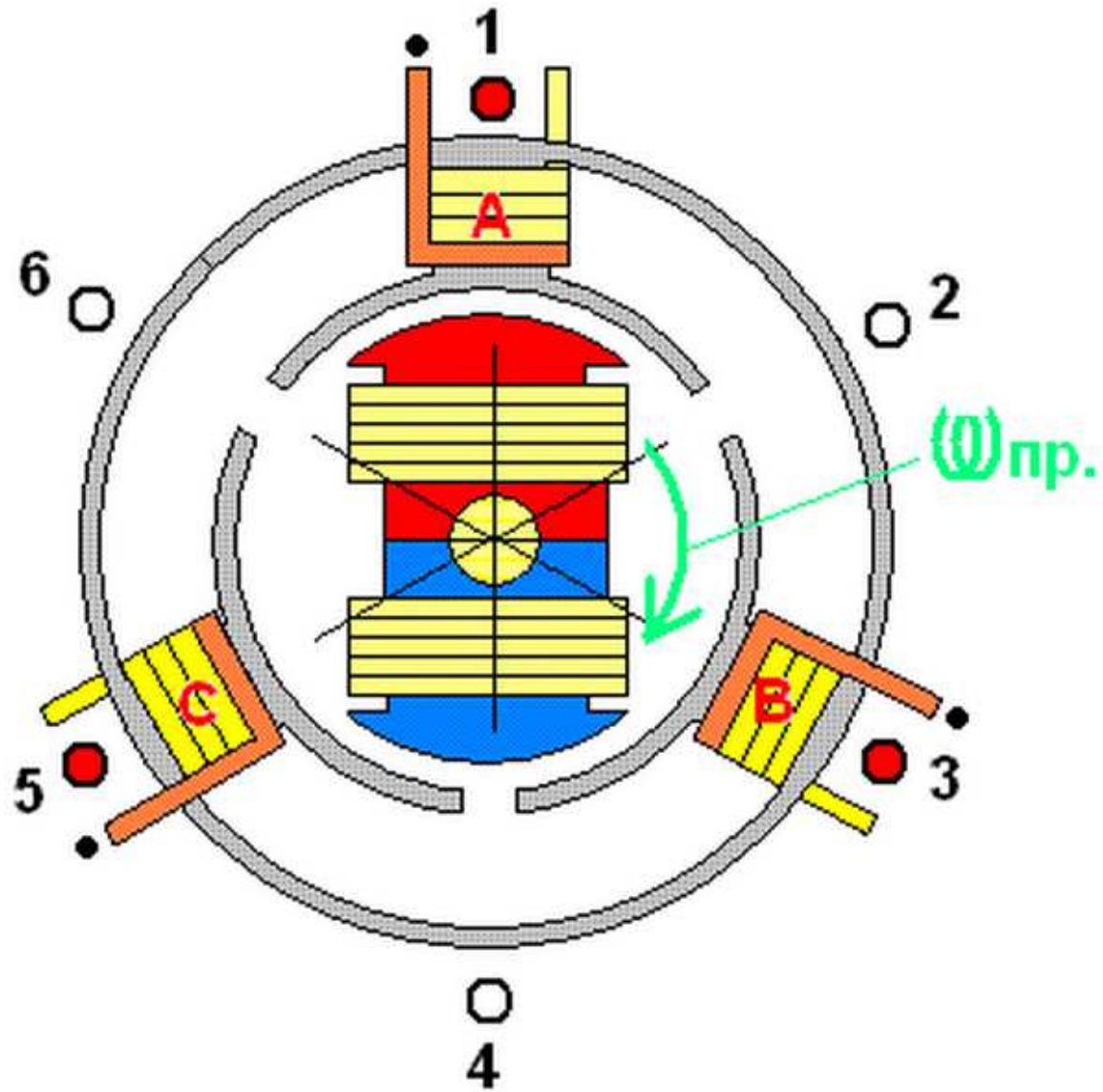


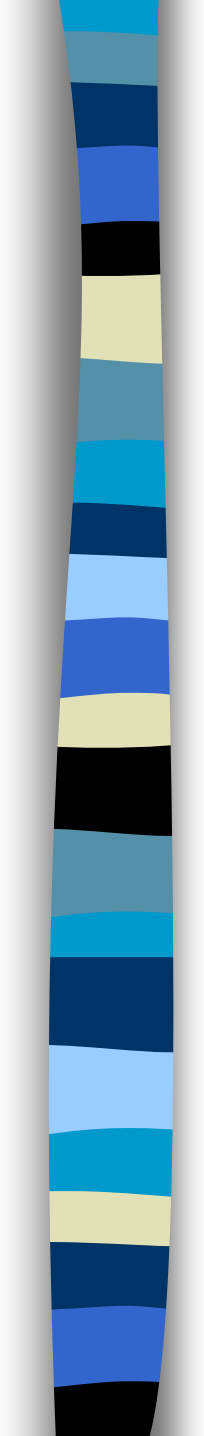
$$\Phi = BS \text{ при } \alpha = 0$$



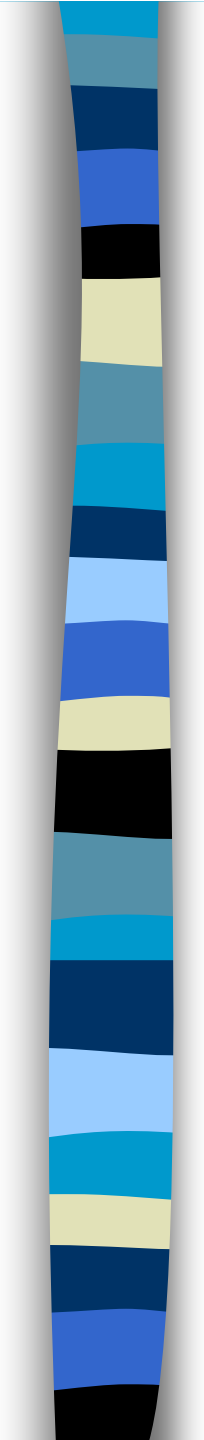


# Трехфазный генератор





Генерирование и распределение  
электрической энергии  
осуществляется посредством  
трехфазных цепей,  
которые запитываются от обмоток  
генераторов и трансформаторов,  
характеризуемых фазными ЭДС  
 $e_A(t)$ ,  $e_B(t)$ ,  $e_C(t)$

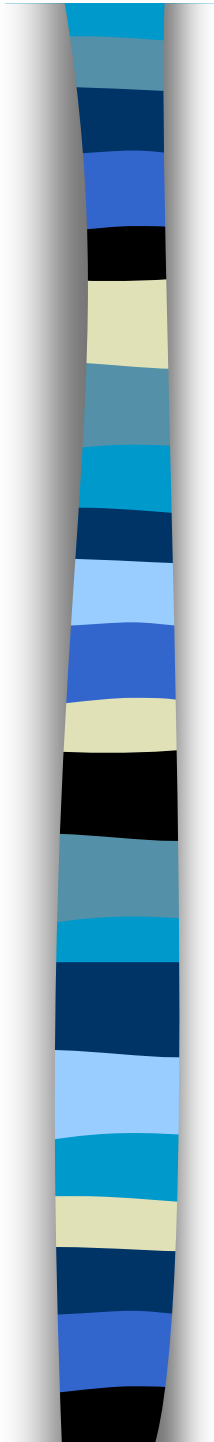


В нормальном режиме фазные ЭДС генераторов и трансформаторов образуют симметричную систему, т.е. имеют одинаковую гармоническую форму, одинаковые частоту и амплитуду и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120 градусов

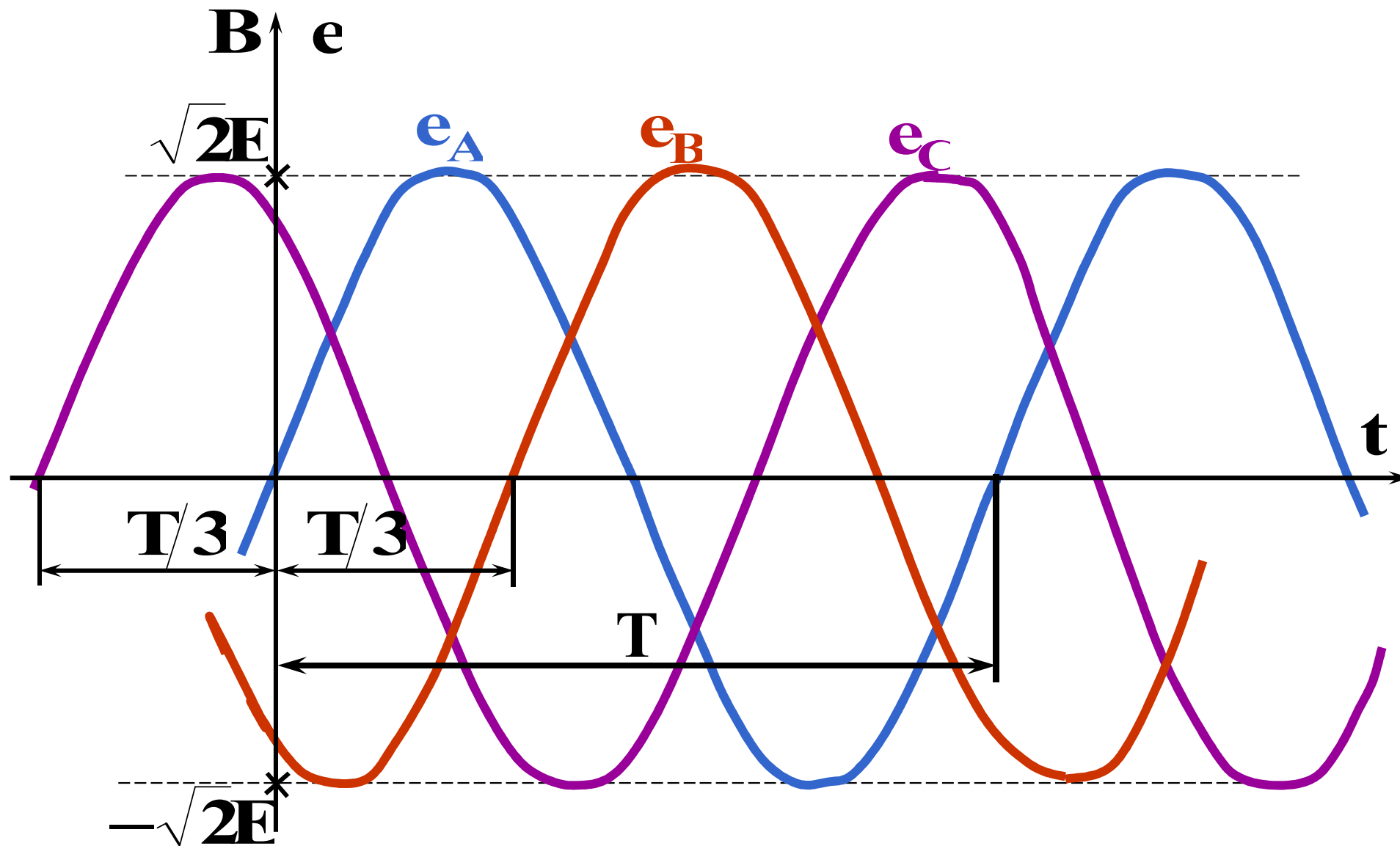
$$e_A(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha)$$

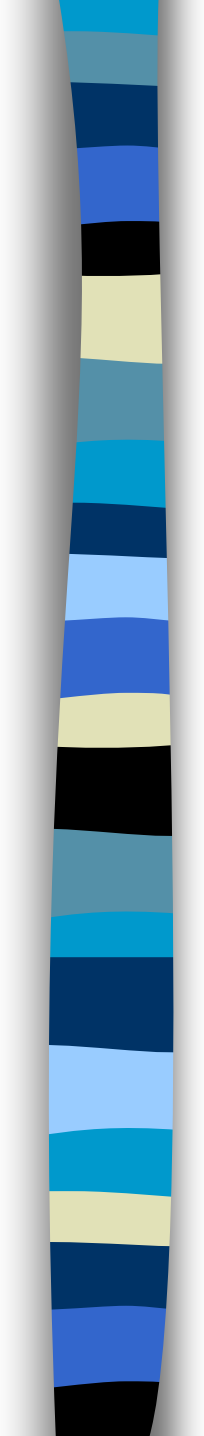
$$e_B(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ)$$

$$e_C(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ)$$



# Волновая диаграмма при $\alpha=0$



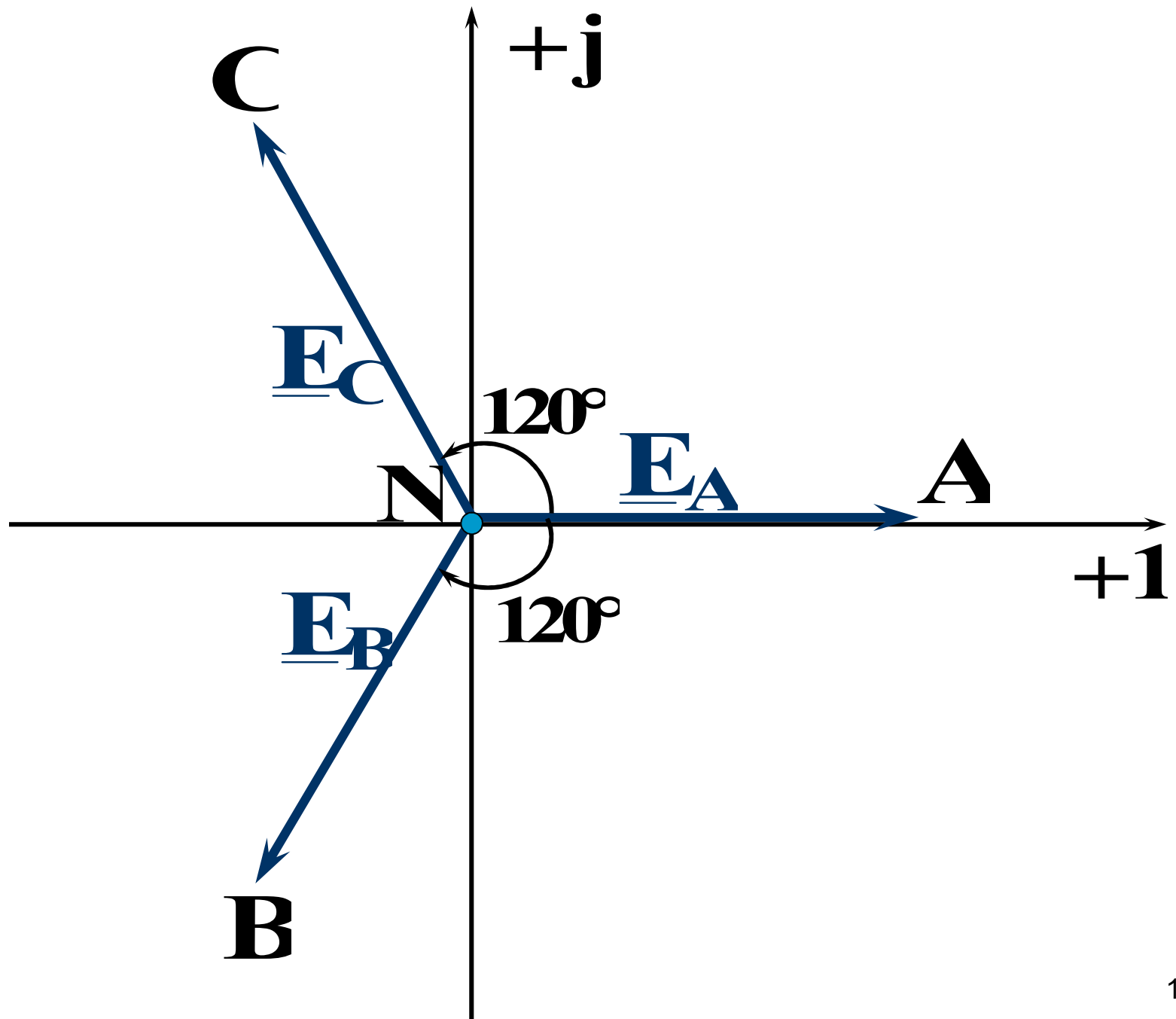


## Векторная диаграмма при $\alpha=0$

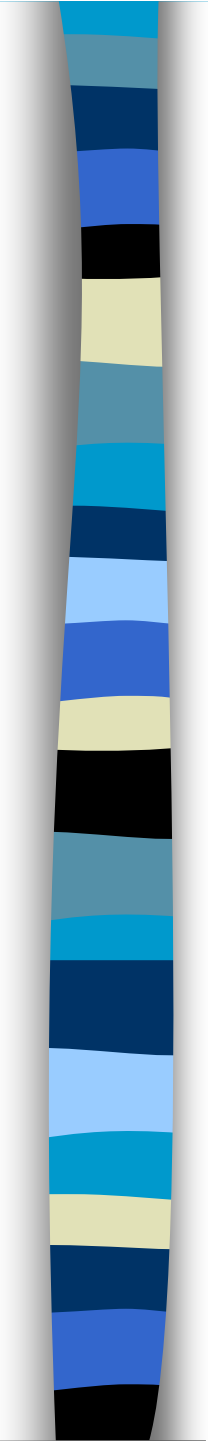
$$\underline{E}_A = E \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ}$$

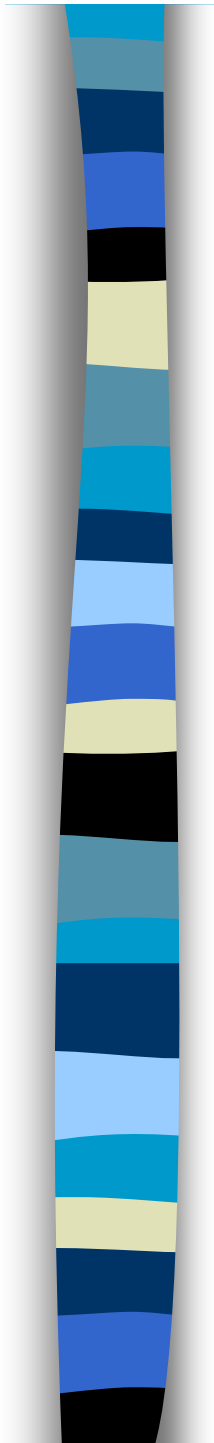
$$\underline{E}_C = E \cdot e^{j120^\circ}$$



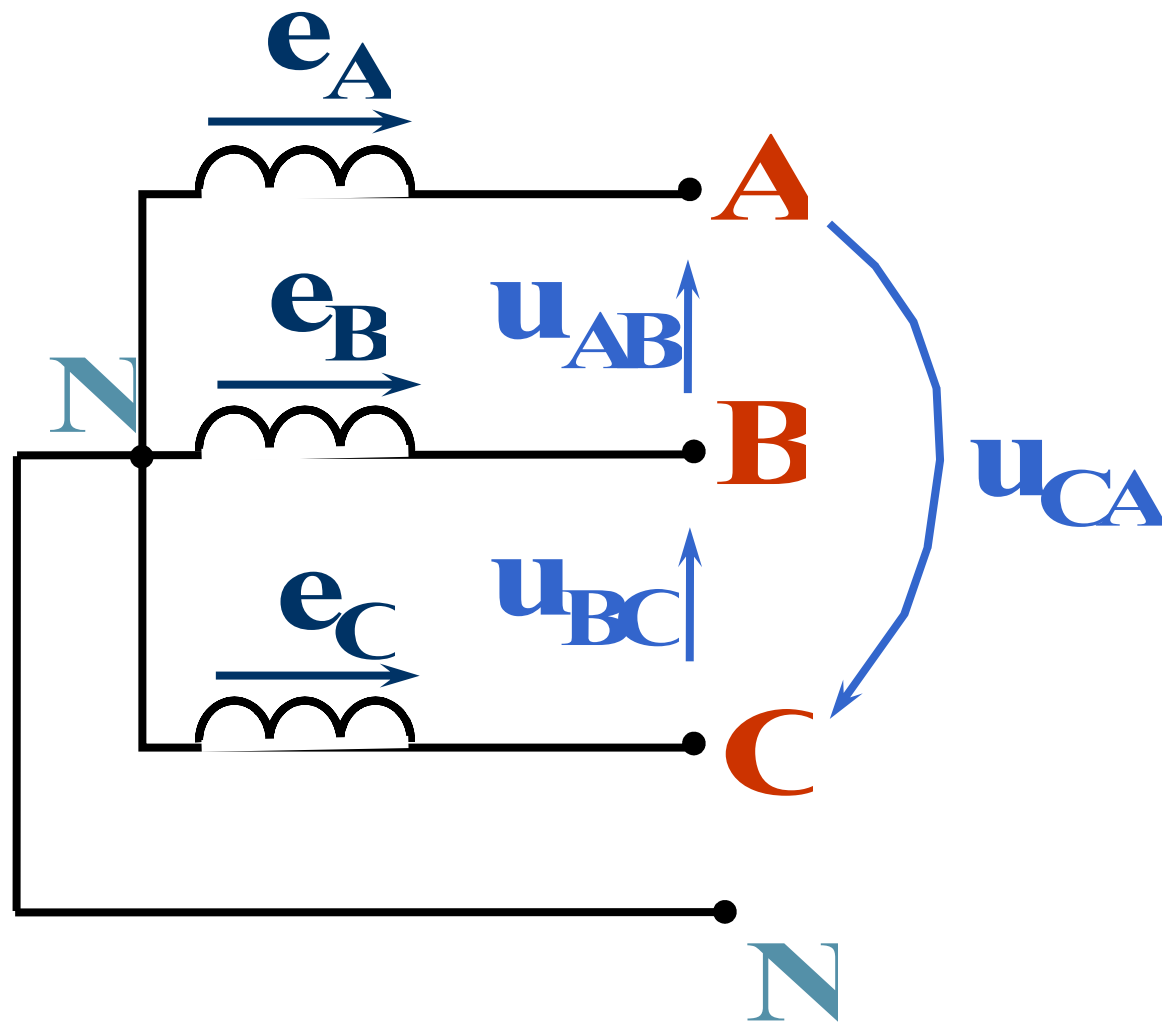


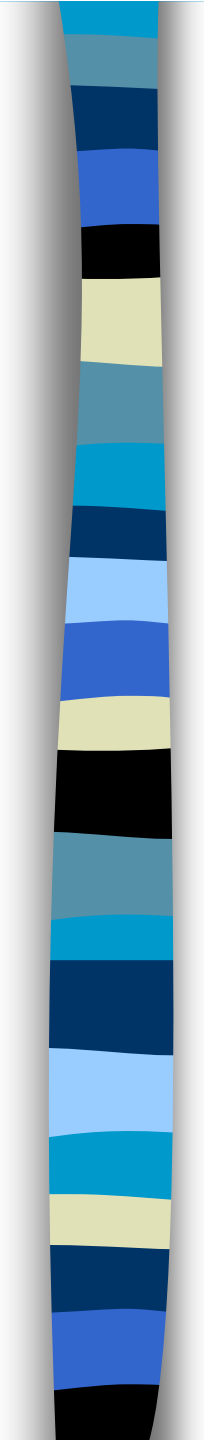

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = E \cdot e^{j0^\circ} + E \cdot e^{-j120^\circ} + E \cdot e^{j120^\circ} = 0$$

# Соединение обмоток трехфазного генератора звездой.

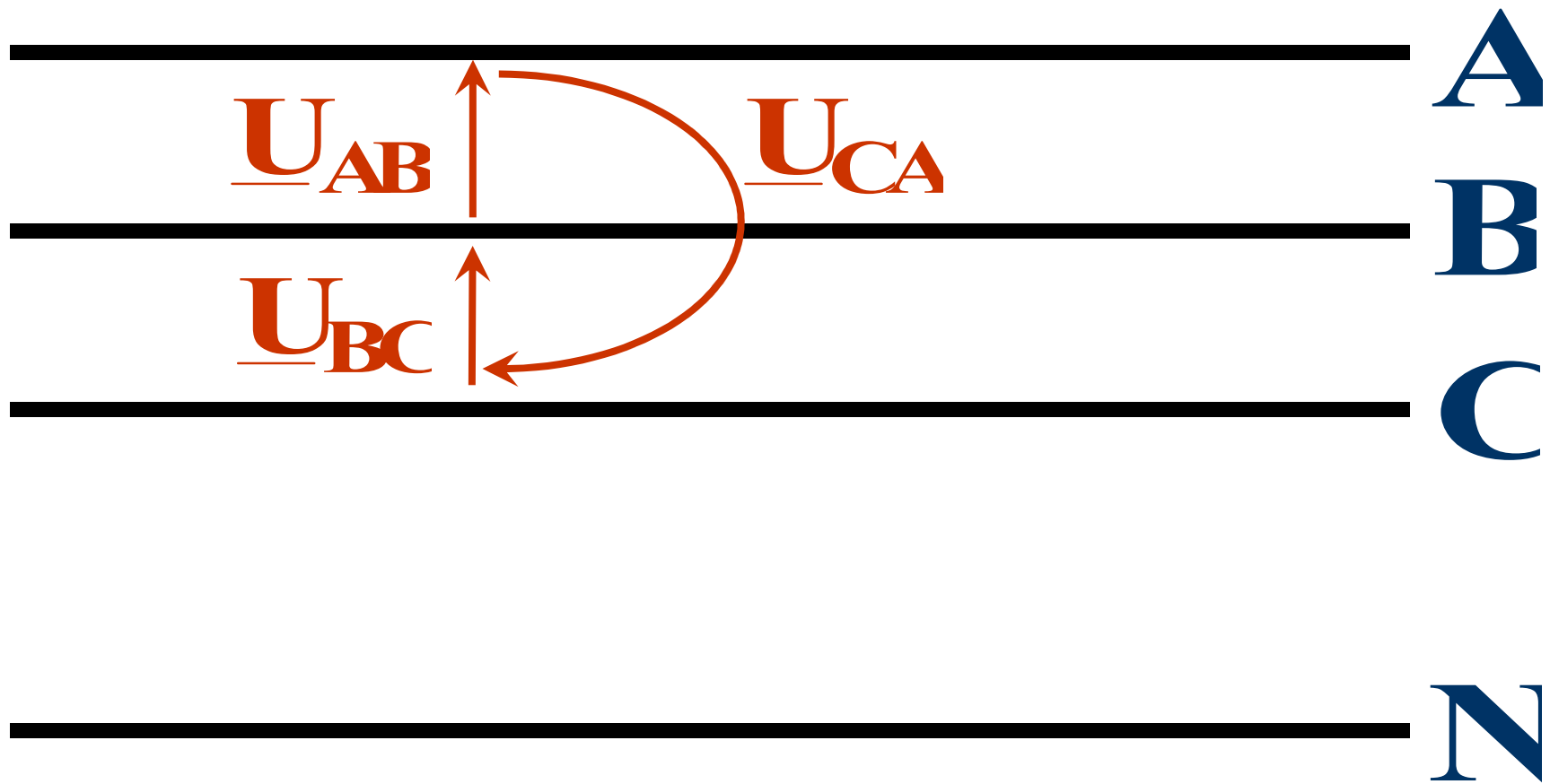


а) звездой:





напряжения между фазами  
называются линейными  
напряжениями и могут быть  
найжены по известным фазным  
ЭДС



**где**

$$U_{\text{Л}} = \sqrt{3E}$$

**- действующее значение**

$$e_A(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha)$$

$$e_B(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ)$$

$$e_C(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ)$$

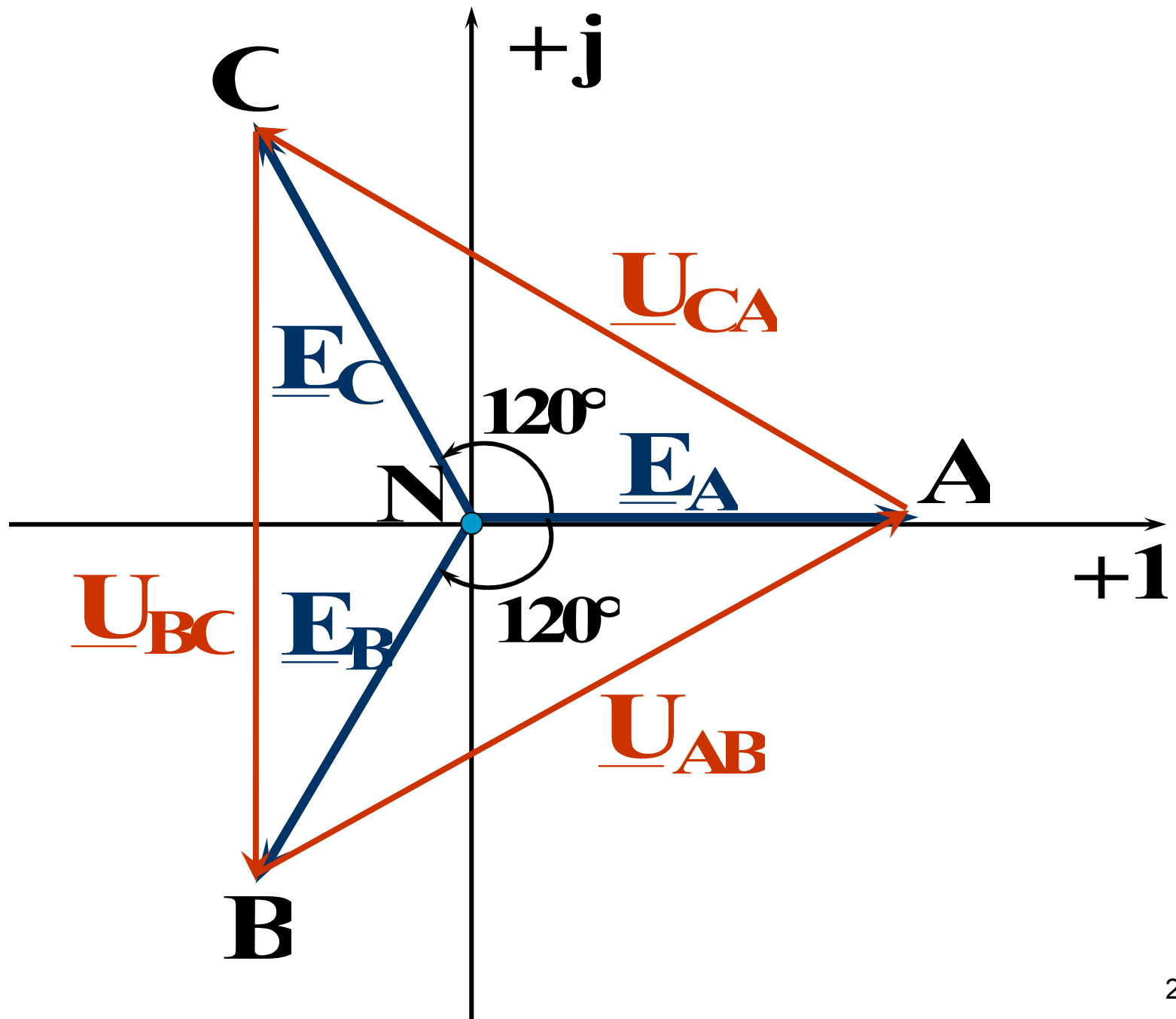
# Линейные напряжения :

$$u_{AB}(t) = e_A(t) - e_B(t) = \sqrt{2}\sqrt{3}E \sin(\omega t + \alpha + 30^\circ)$$

$$u_{BC}(t) = e_B(t) - e_C(t) = \sqrt{2}\sqrt{3}E \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ)$$

$$u_{CA}(t) = e_C(t) - e_A(t) = \sqrt{2}\sqrt{3}E \sin(\omega t + \alpha + 150^\circ)$$





где

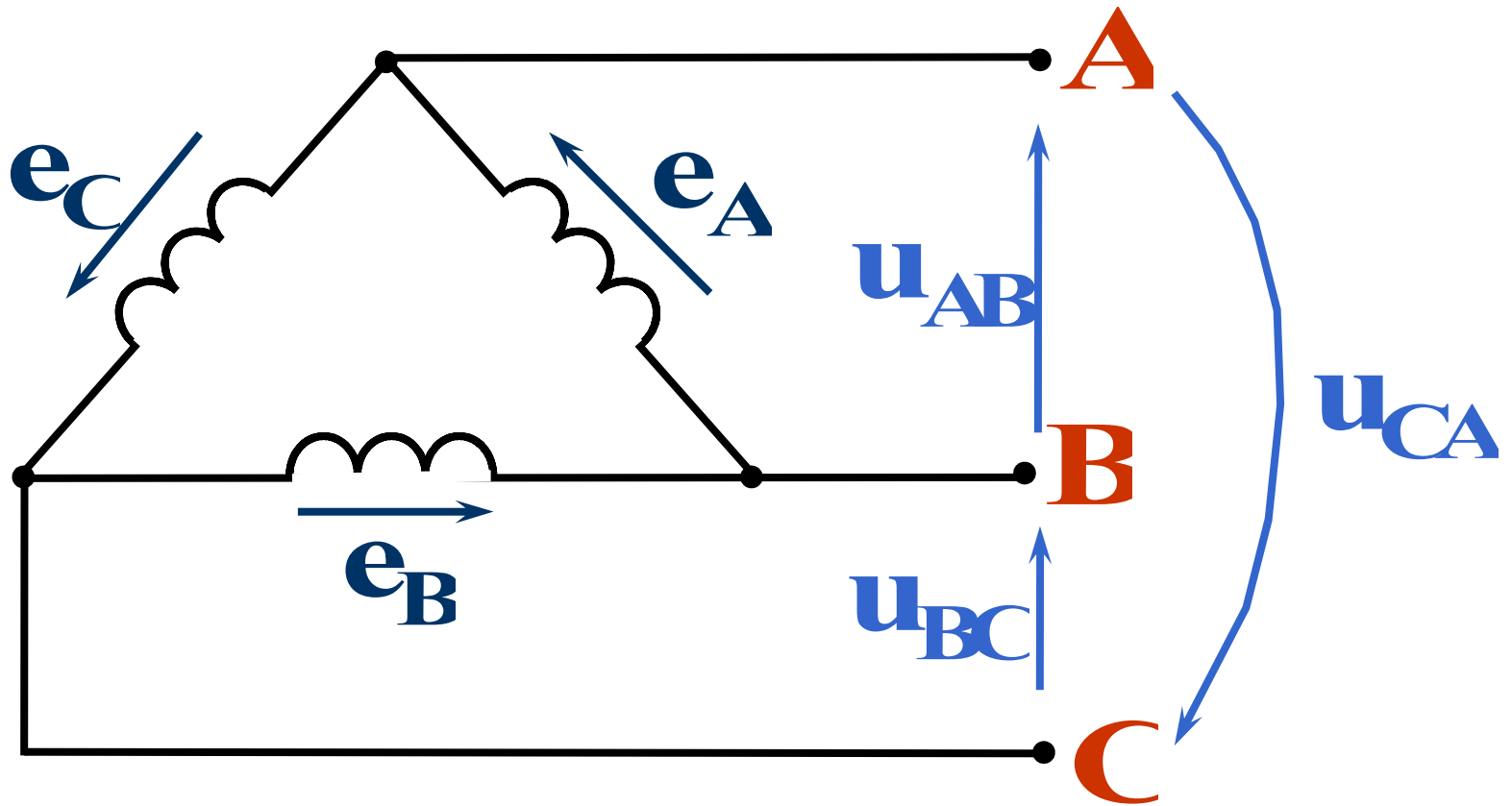
$$\underline{U}_{AB} = U_L \cdot e^{j(\alpha+30^\circ)}$$

$$\underline{U}_{BC} = U_L \cdot e^{j(\alpha-90^\circ)}$$

$$\underline{U}_{CA} = U_L \cdot e^{j(\alpha+150^\circ)}$$

**- комплексы действующих значений**

б) треугольником:

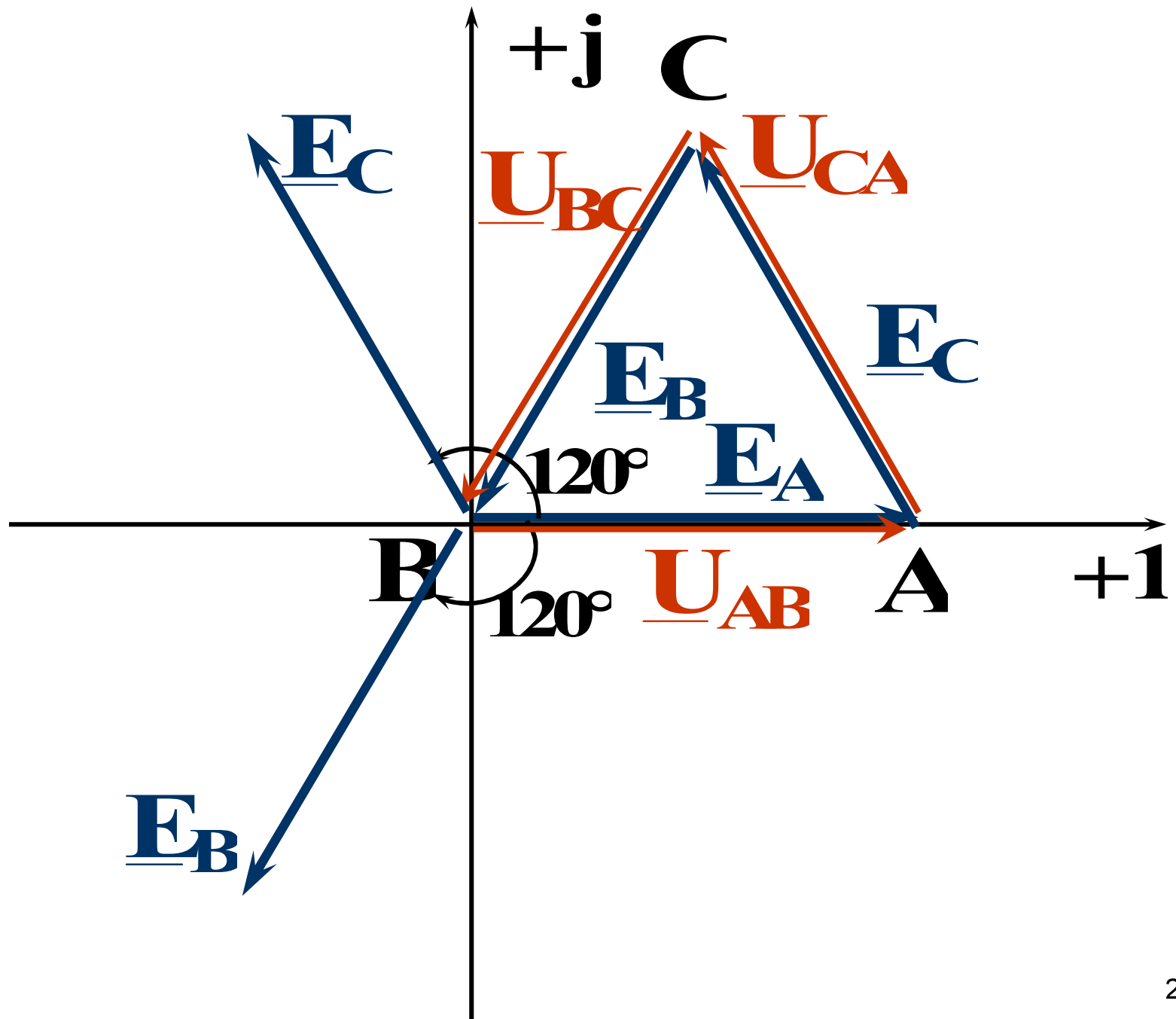


# Линейные напряжения :

$$u_{AB}(t) = e_A(t)$$

$$u_{BC}(t) = e_B(t)$$

$$u_{CA}(t) = e_C(t)$$



**где**

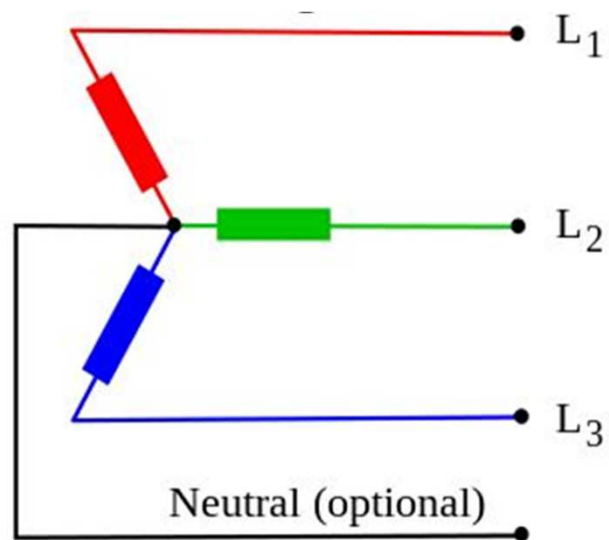
$$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A$$

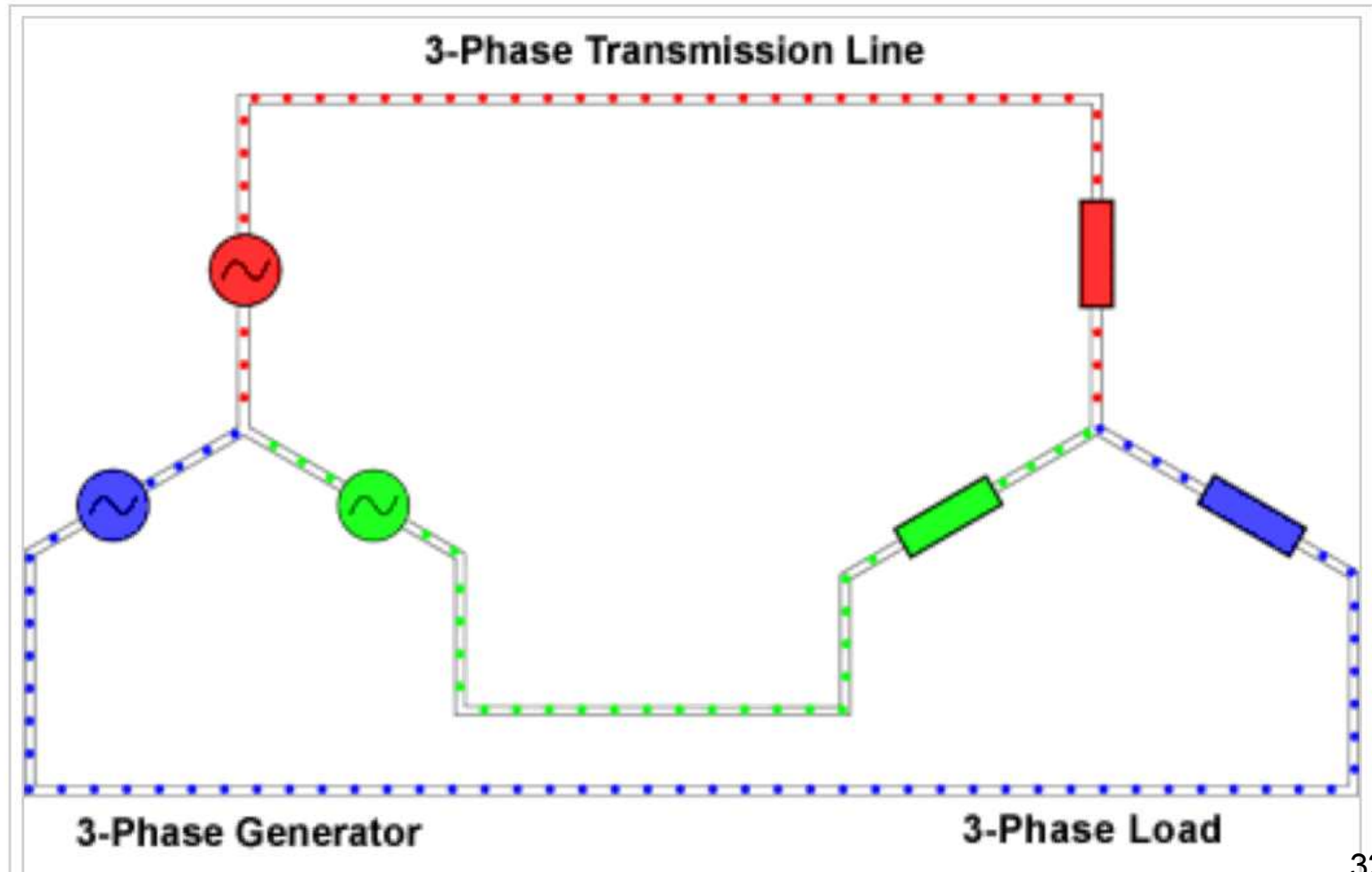
$$\underline{U}_{BC} = \underline{E}_B$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{E}_C$$

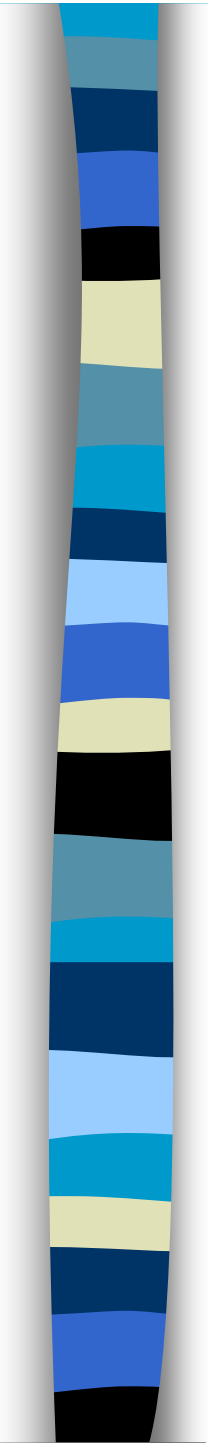
**- комплексы действующих значений**

# Соединение приемников электроэнергии звездой

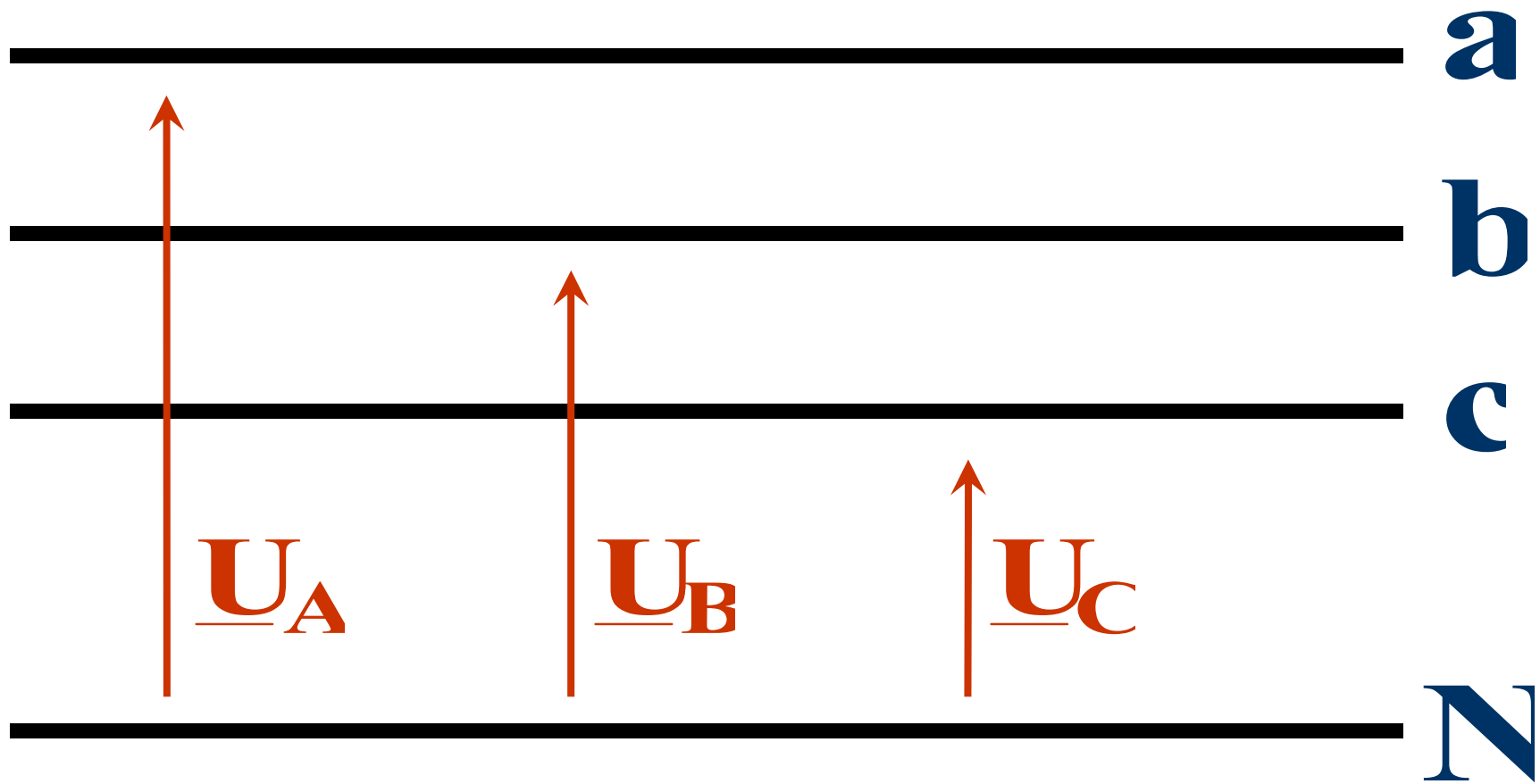








Фазные напряжения- это  
напряжения между фазами и  
нулевым проводом или нейтралью

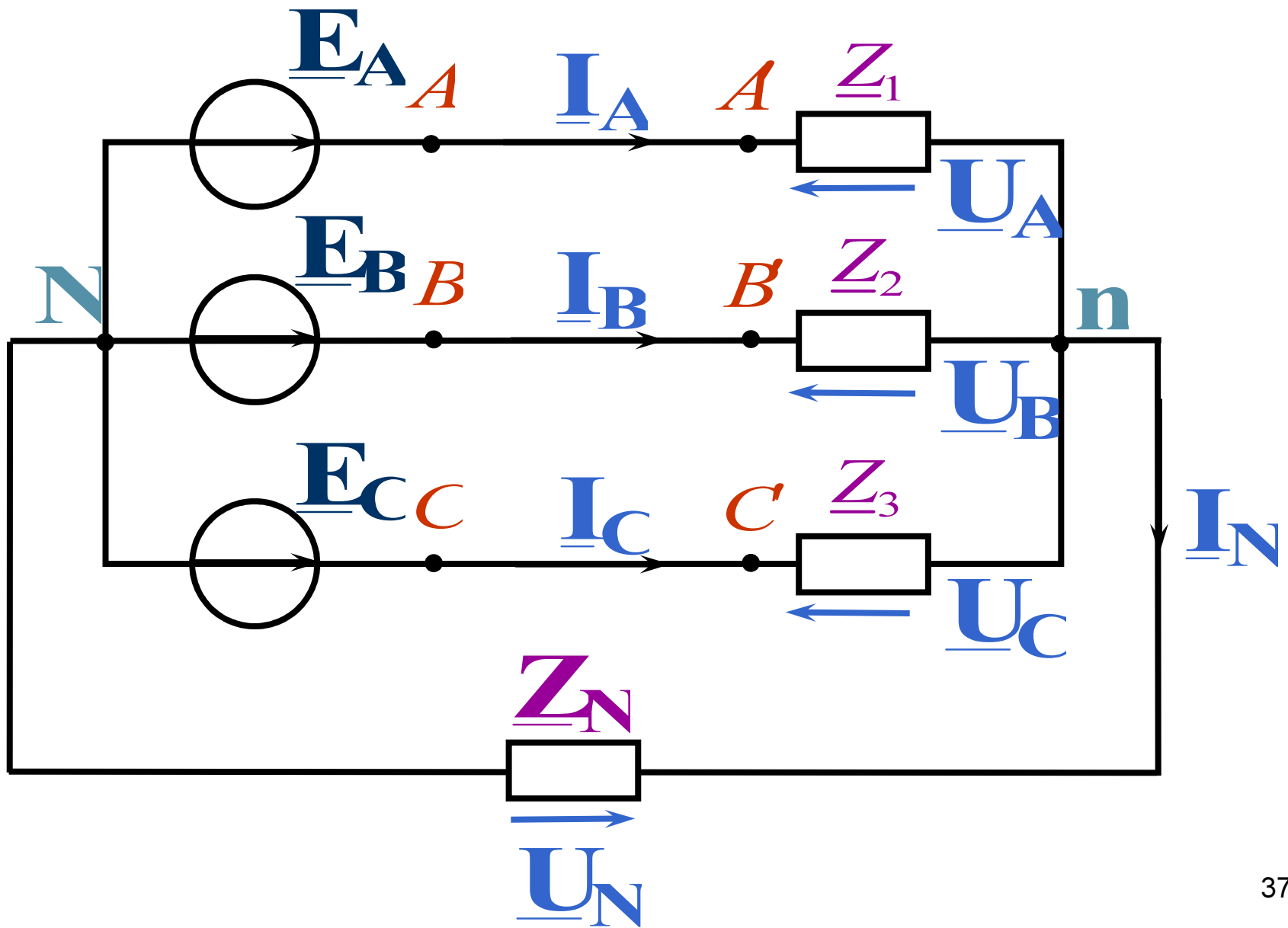


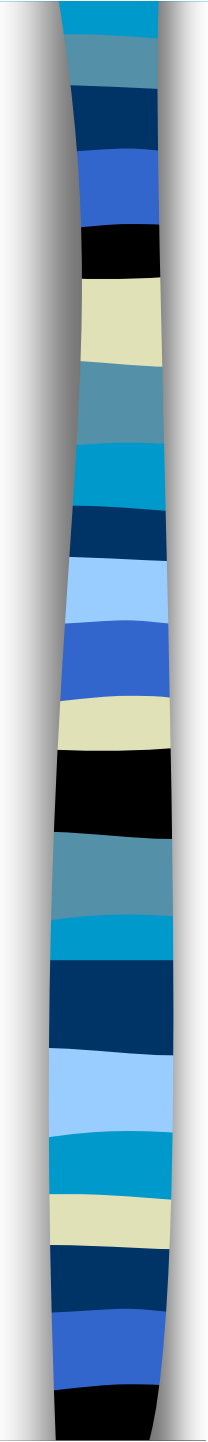
где

$$\begin{cases} \underline{U}_A = U_\Phi \cdot e^{j\beta_A} \\ \underline{U}_B = U_\Phi \cdot e^{j\beta_B} \\ \underline{U}_C = U_\Phi \cdot e^{j\beta_C} \end{cases}$$

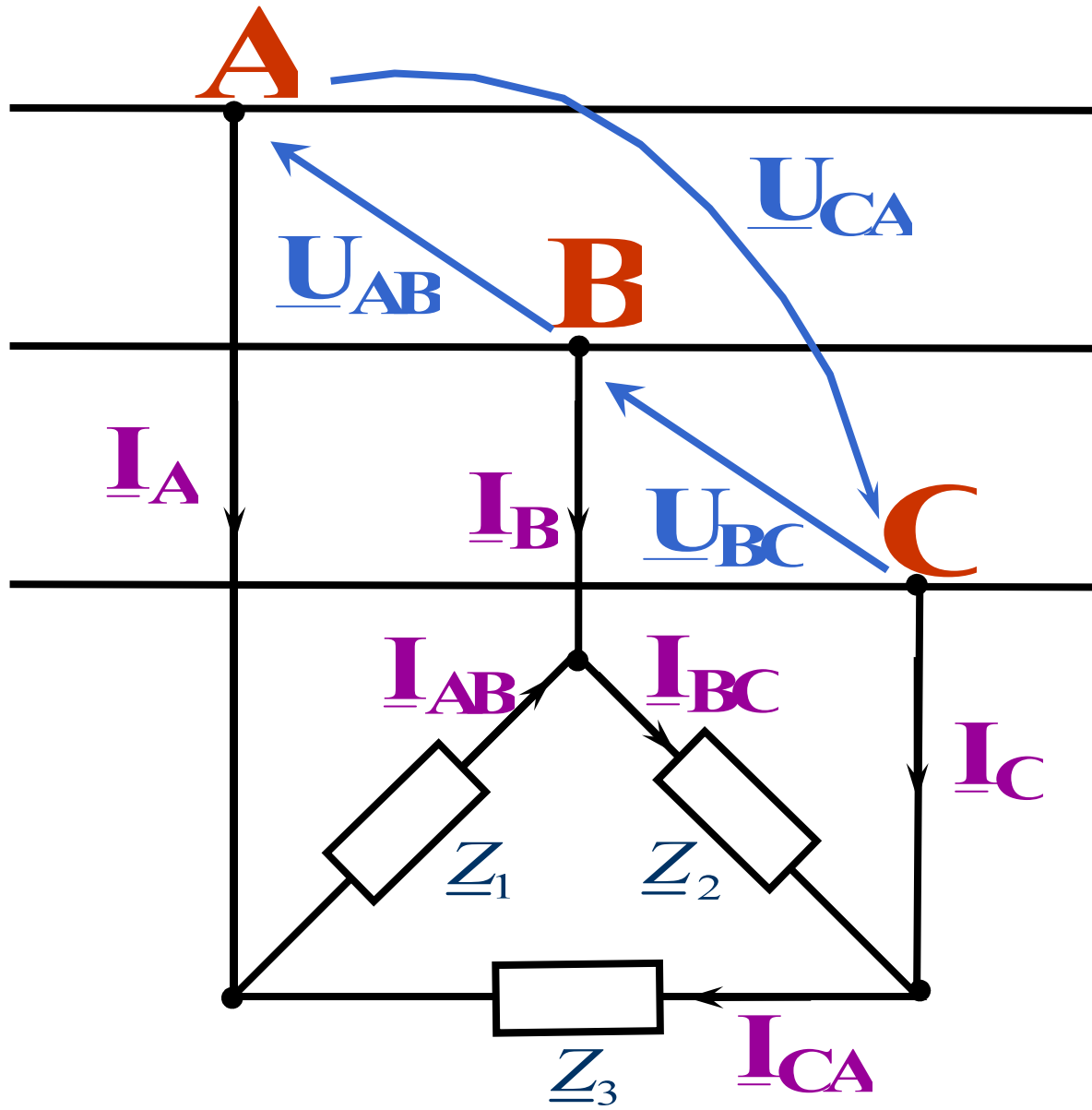
где

$$\begin{cases} \underline{I}_A = I_\Phi \cdot e^{j\alpha_A} \\ \underline{I}_B = I_\Phi \cdot e^{j\alpha_B} \\ \underline{I}_C = I_\Phi \cdot e^{j\alpha_C} \end{cases}$$





## 2. Соединение нагрузки треугольником



**где**

**$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  - линейные токи;**

**$\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$  - фазные токи;**

**$\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  - линейные  
напряжения, равные  
фазным  
напряжениям**





# По 1 закону Кирхгофа

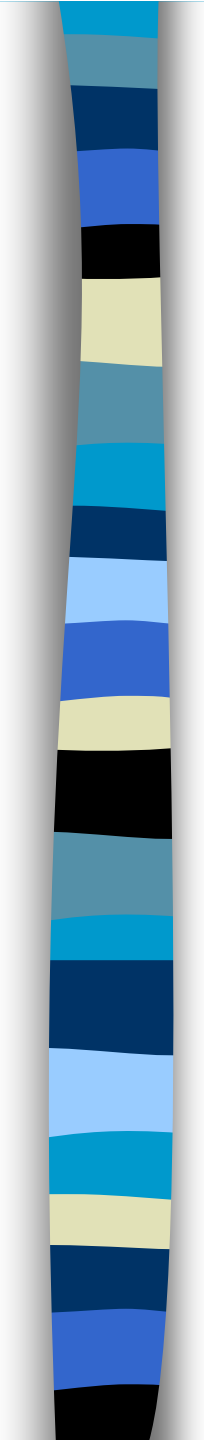
$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}$$

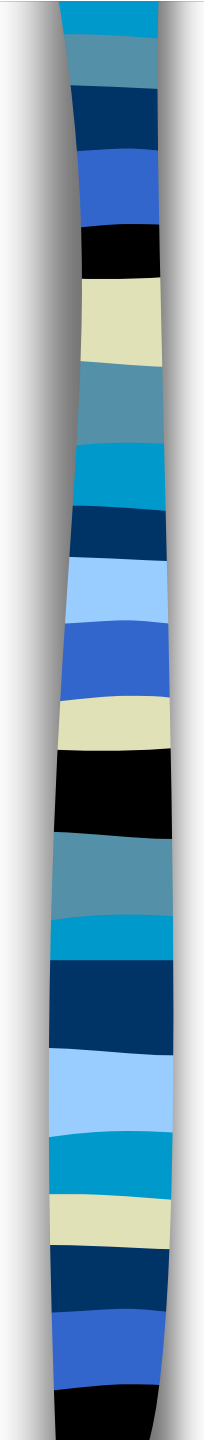
$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$$



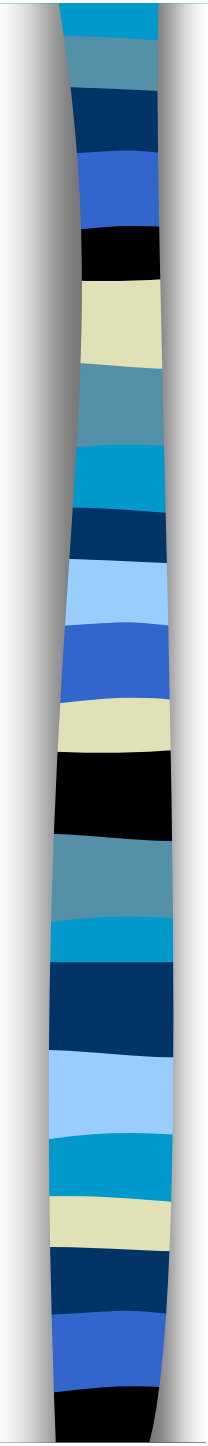
# Симметричный режим трехфазной цепи



Симметричный режим характеризуется симметричной системой фазных ЭДС и напряжений, а также одинаковой нагрузкой фаз



Симметричный режим является нормальным режимом трехфазных цепей и рассчитывается известными методами в комплексной форме



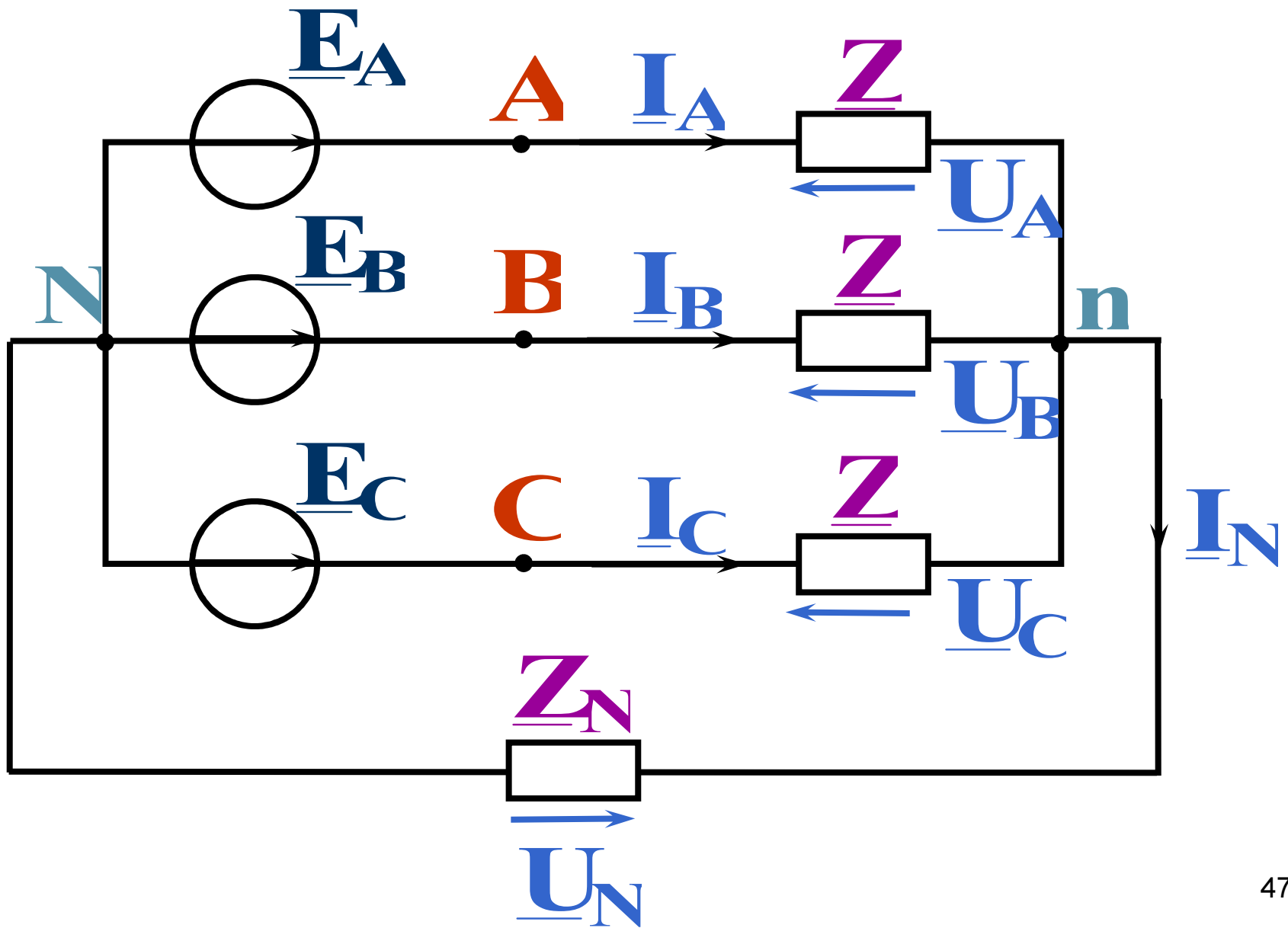
# 1. Соединение звезда- звезда с нулевым проводом

при

$$\underline{E}_A = E e^{j\alpha}$$

$$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$$

$$\underline{Z}_N = Z_N \cdot e^{j\varphi_N}$$



**где**

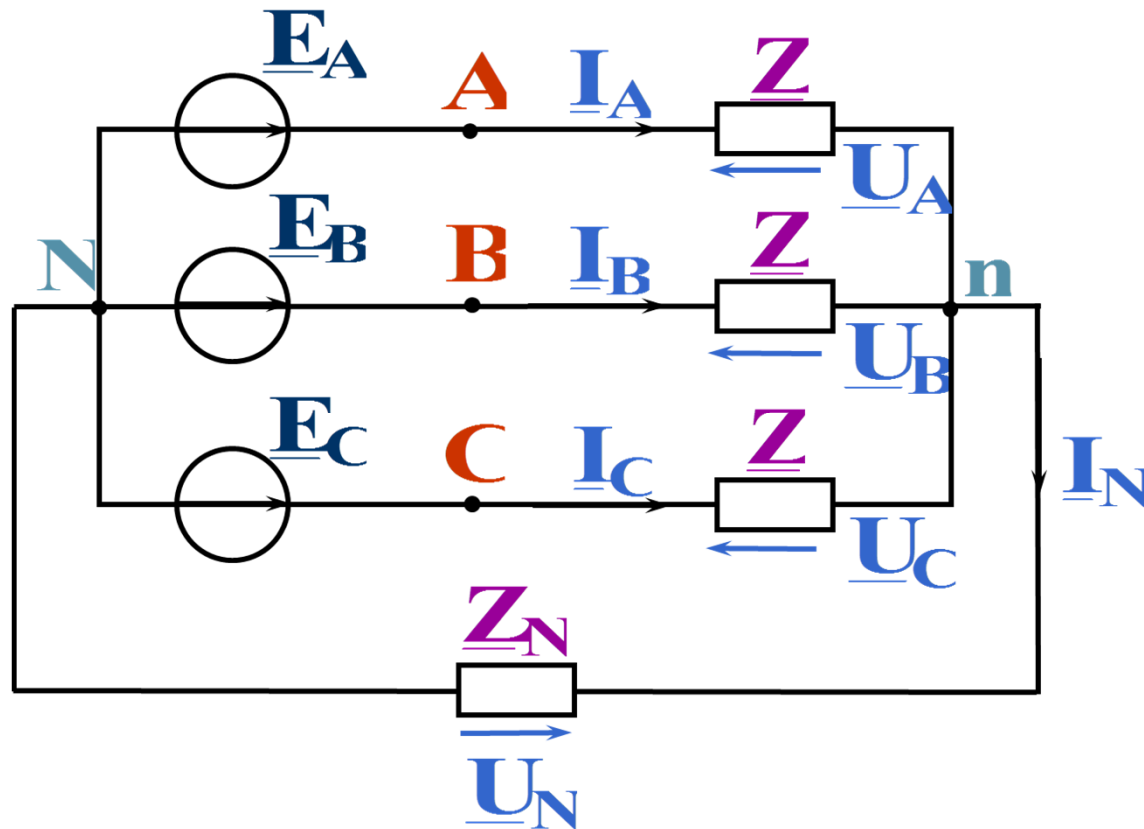
**$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  - линейные токи,  
равные фазным токам;**

**$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  - фазные напряжения;**

**$\underline{I}_N$  и  $\underline{U}_N$  - ток и напряжение  
нулевого провода**



По 2-му закону Кирхгофа и закону Ома:



$$\underline{I}_A = (\underline{E}_A - \underline{U}_N) / \underline{Z} = \underline{U}_A / \underline{Z}$$

$$\underline{I}_B = (\underline{E}_B - \underline{U}_N) / \underline{Z} = \underline{U}_B / \underline{Z}$$

$$\underline{I}_C = (\underline{E}_C - \underline{U}_N) / \underline{Z} = \underline{U}_C / \underline{Z}$$

Тогда по 1-му закону  
Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_N}{\underline{Z}_N} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C =$$
$$= \frac{\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C}{\underline{Z}} = \frac{3\underline{U}_N}{\underline{Z}}$$

**Ho**

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

**T.e.**

$$\underline{U}_N \left( \frac{1}{\underline{Z}_N} + \frac{3}{\underline{Z}} \right) = 0$$



Таким образом

$$\underline{U}_N = 0$$

$$\underline{I}_N = \underline{U}_N / \underline{Z}_N = 0$$



Таким образом

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}} = I_{\text{л}} e^{j(\alpha - \varphi)}$$

$$\underline{I}_B = a^2 \underline{I}_A$$

$$\underline{I}_C = a \underline{I}_A$$



Таким образом

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{E}_A$$

$$\underline{U}_C = a \underline{E}_A$$

# Комплекс полной вырабатываемой мощности

$$\begin{aligned}\underline{S}_B &= \underline{E}_A \underline{I}_A + \underline{E}_B \underline{I}_B + \underline{E}_C \underline{I}_C = \\ &= 3 \cdot \underline{E} \cdot \underline{I}_L e^{j\varphi} = \\ &= P_B + jQ_B, \text{ (ВА)}\end{aligned}$$



**а) АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ**

$$P_B = P_{II} = 3 \cdot E \cdot I_L \cos \varphi =$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cos \varphi =$$

$$= 3 \cdot I_L^2 \cdot [\operatorname{Re}(\underline{Z})], (\text{Вт})$$





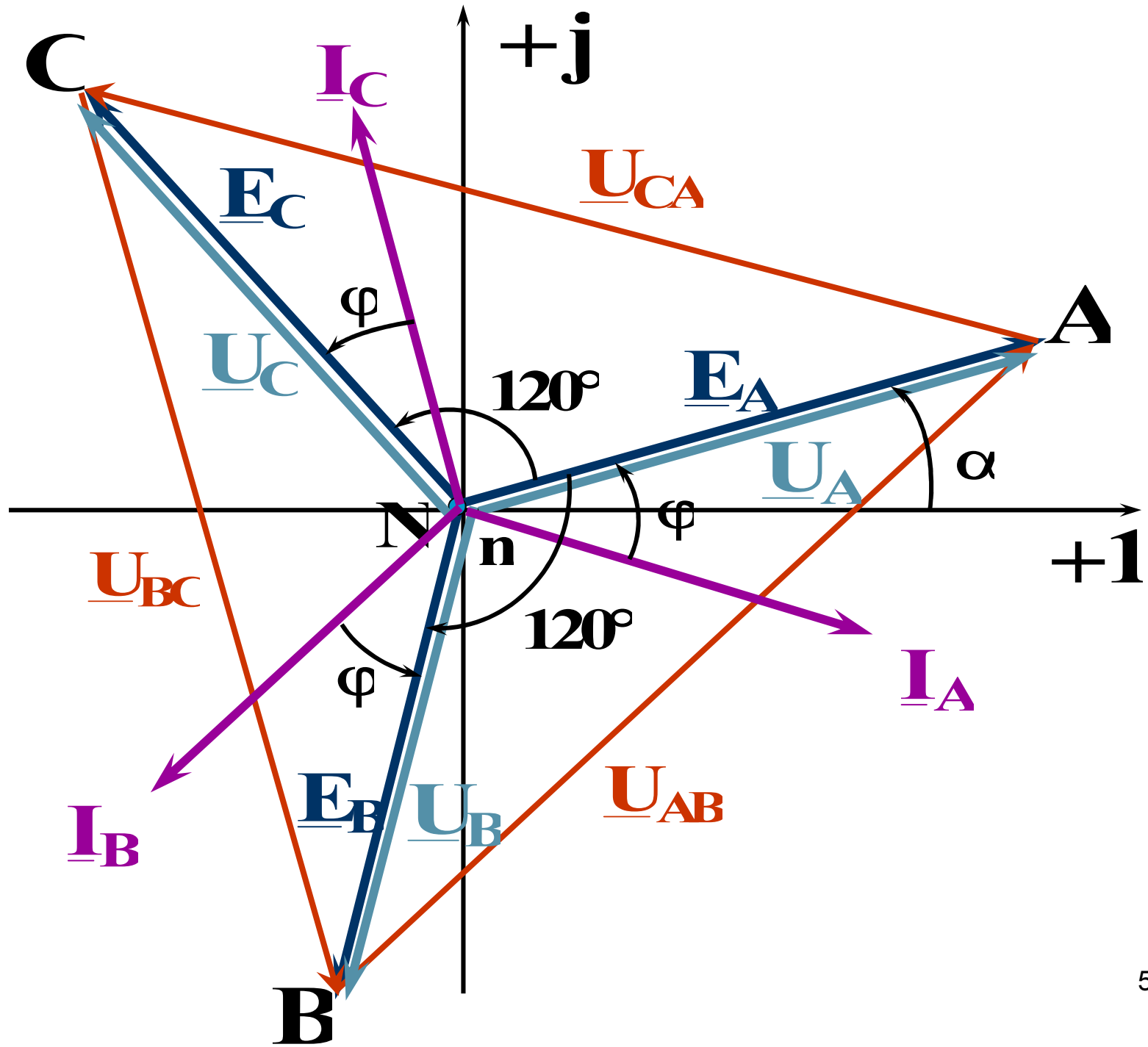
**б) реактивная мощность**

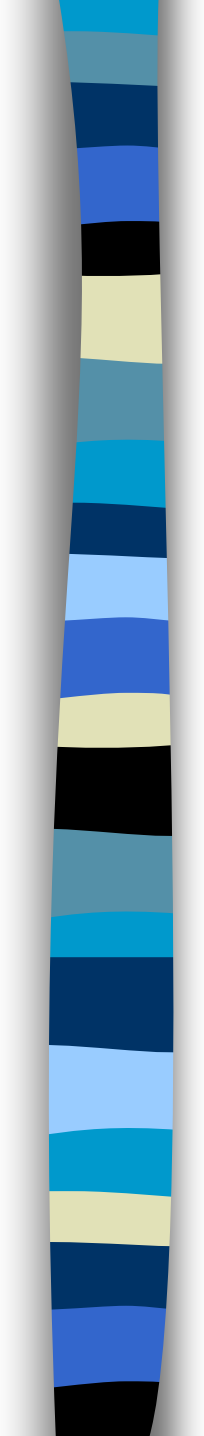
$$\begin{aligned} Q_{\text{В}} = Q_{\text{П}} &= 3 \cdot E \cdot I_{\text{Л}} \sin \varphi = \\ &= \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \sin \varphi = \\ &= 3 \cdot I_{\text{Л}}^2 \cdot [\text{Im}(\underline{Z})], \text{ (вар)} \end{aligned}$$



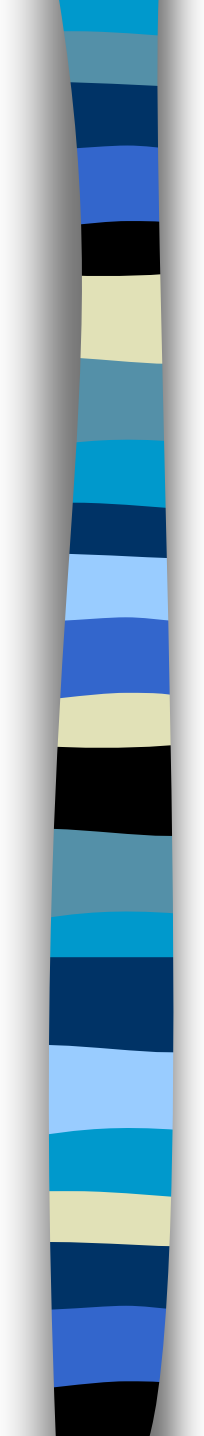
# Векторная диаграмма

$$\varphi > 0$$



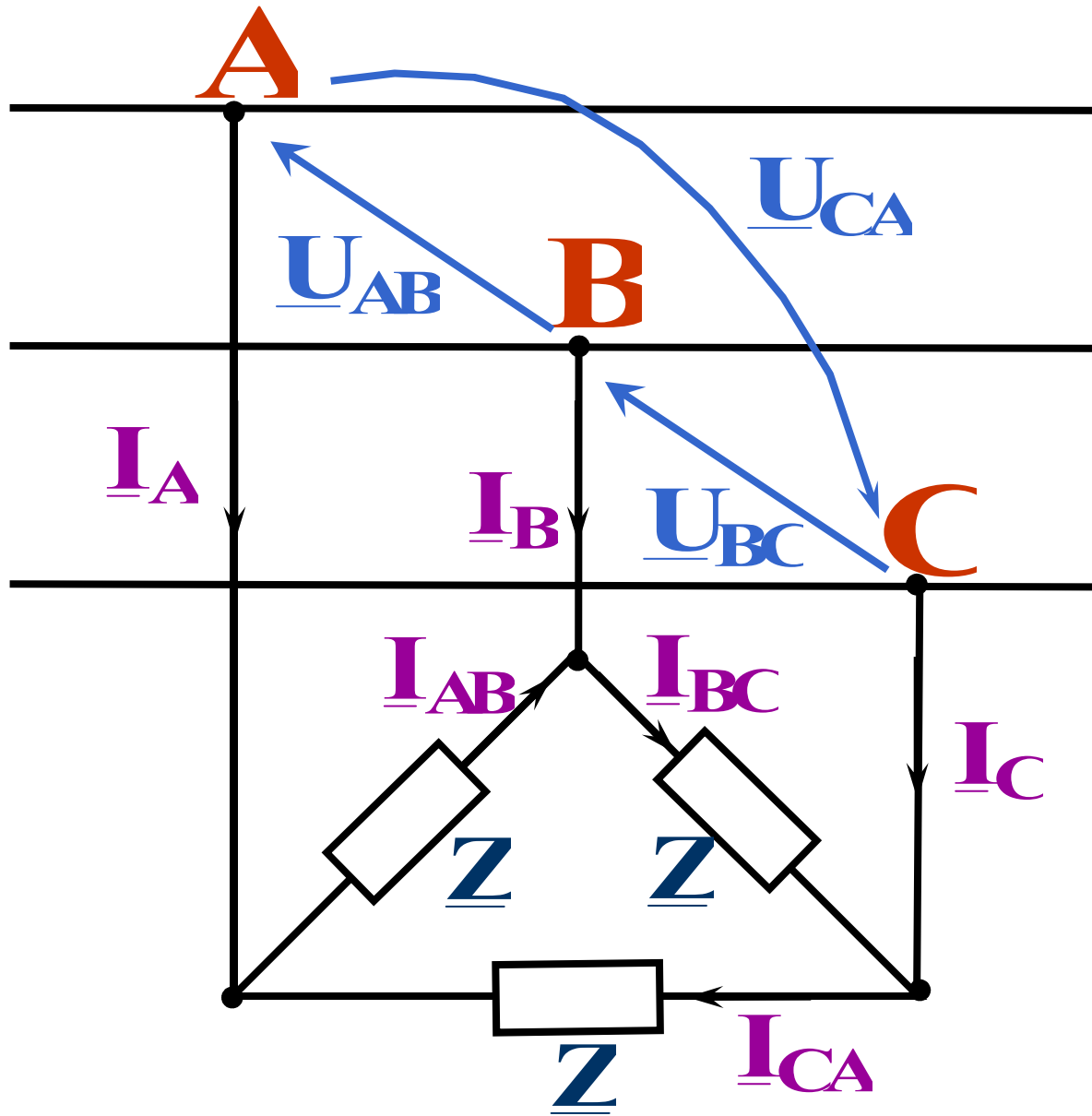


В симметричном режиме ток нулевого провода  $\underline{I}_N$  и напряжение смещения нейтралей  $\underline{U}_N$  равны нулю, поэтому цепь без нулевого провода рассчитывается аналогично, причем такой расчет можно вести на одну фазу (А)



## 2. Соединение нагрузки треугольником при

$$\underline{U}_{AB} = U_{\text{Л}} e^{j\lambda}, \quad \underline{Z} = Z e^{j\varphi}$$



**где**

**$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  - линейные токи;**

**$\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$  - фазные токи;**

**$\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$  - линейные  
напряжения, равные  
фазным  
напряжениям**



По закону Ома:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}} = I_{\phi} e^{j(\lambda - \varphi)}$$

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}} = a^2 \underline{I}_{AB}$$

$$\underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}} = a \cdot \underline{I}_{AB}$$





## По 1 закону Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA} = I_{\text{Л}} e^{j(\lambda - \varphi - 30^\circ)}$$

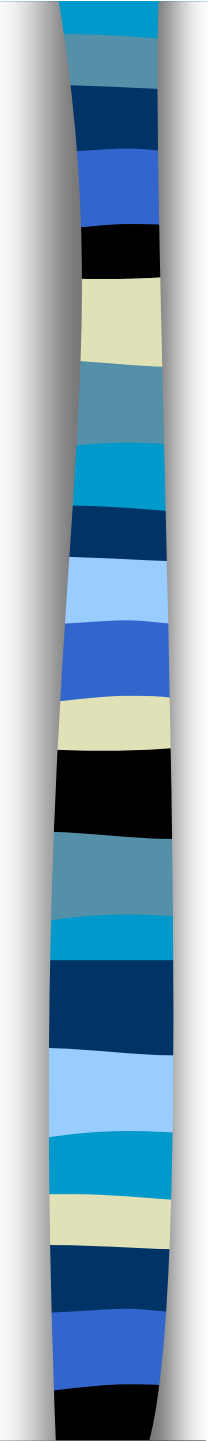
$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = a^2 \underline{I}_A$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC} = a \cdot \underline{I}_A$$

где

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{Z}$$

$$I_{\text{Л}} = \sqrt{3} I_{\Phi}$$



**а) активная потребляемая  
МОЩНОСТЬ**

$$\begin{aligned} P_{\Pi} &= 3 \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\Phi} \cos \varphi = \\ &= \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cos \varphi = \\ &= 3 \cdot I_{\Phi}^2 \cdot [\text{Re}(\underline{Z})], \text{ (Вт)} \end{aligned}$$



**б) реактивная потребляемая  
МОЩНОСТЬ**

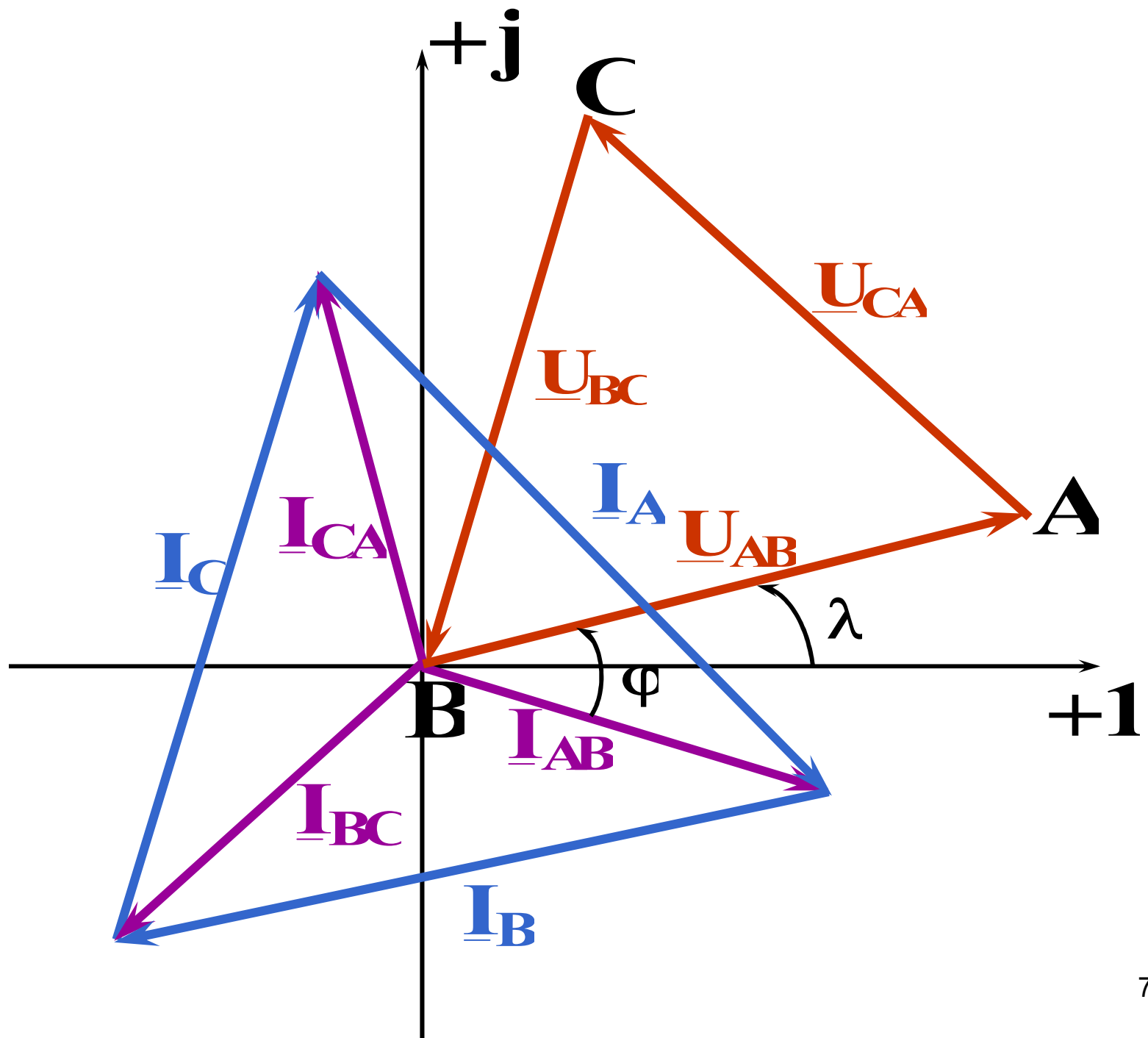
$$Q_{\Pi} = 3 \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\Phi} \sin \varphi =$$

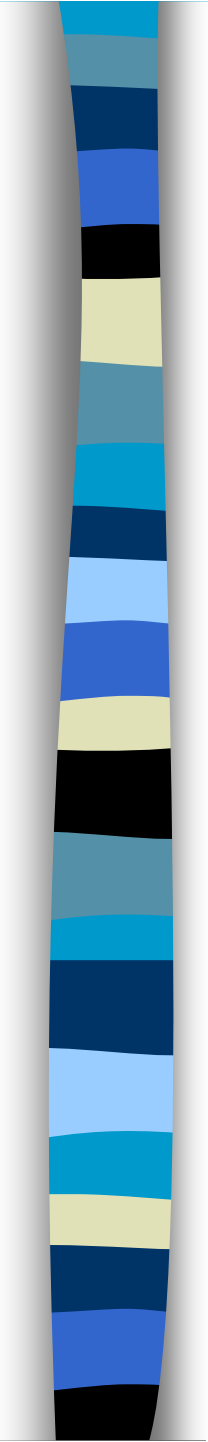
$$= \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \sin \varphi =$$

$$= 3 \cdot I_{\Phi}^2 \cdot [\text{Im}(\underline{Z})], \text{ (вар)}$$



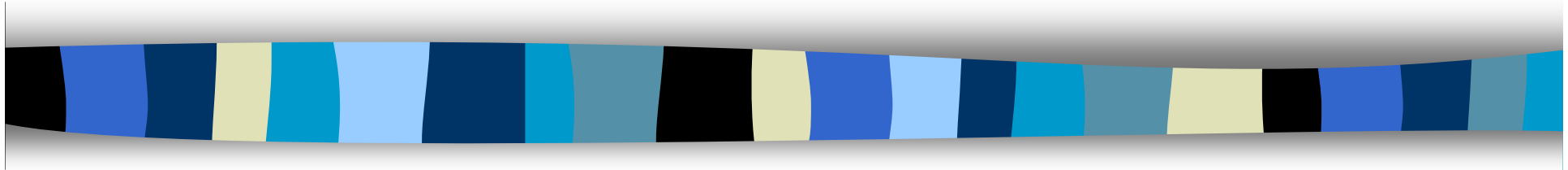
**Векторная диаграмма**  
при  $\lambda > 0$  и  $\varphi > 0$



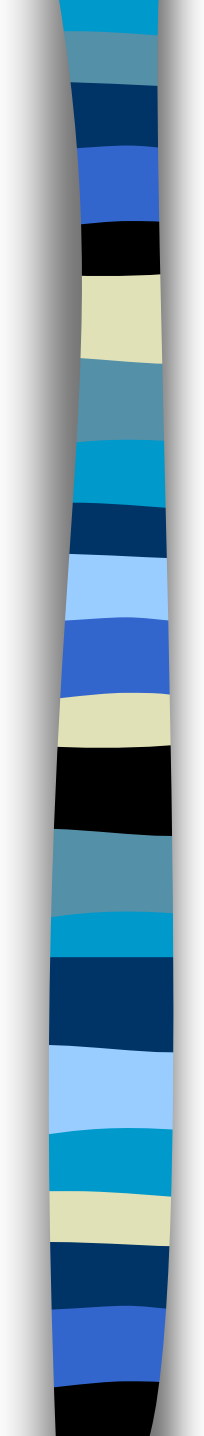


В симметричном режиме при соединении нагрузки треугольником расчет можно было бы вести на одну фазу (А)

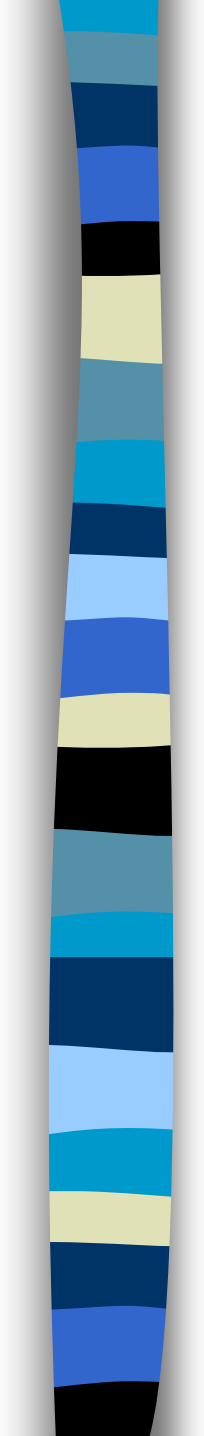
# Несимметричный режим трехфазных цепей



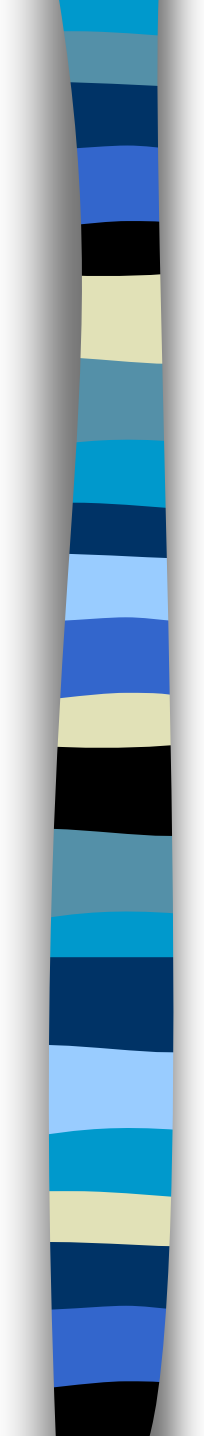




**Несимметричный режим  
обусловлен различной нагрузкой  
фаз или несимметричной  
системой  
напряжений трехфазного  
источника,  
причем в этом режиме  
напряжения и токи фаз  
не образуют симметричные  
системы**

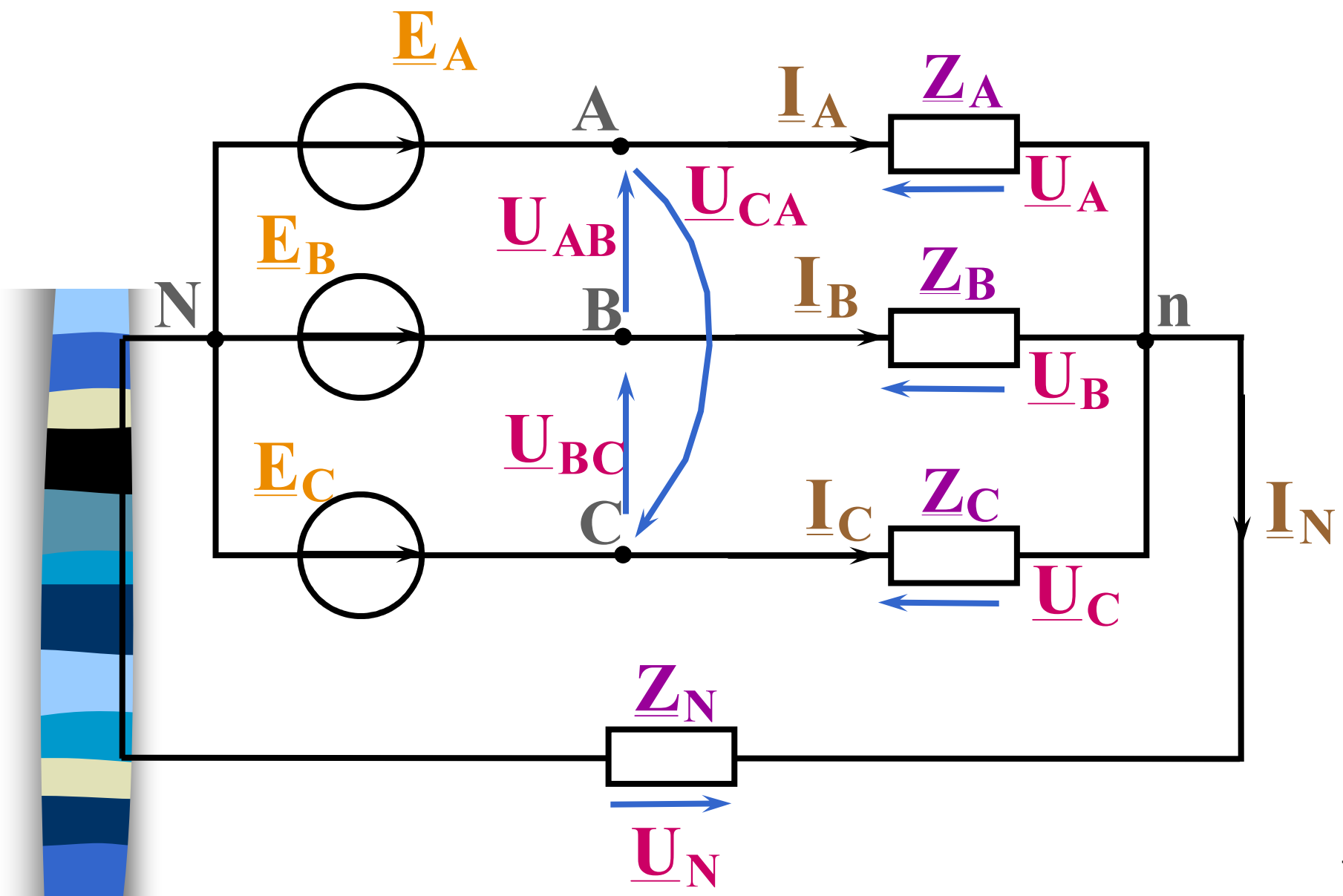


**Несимметричный режим  
при статической нагрузке фаз  
рассчитывается известными  
методами в комплексной  
форме,  
причем в этом режиме ток и  
напряжение в нулевом  
проводе  
могут быть не равны нулю**



1. Соединение  
несимметричной нагрузки  
звездой  
при заданных фазных  
ЭДС

$$(\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C)$$





**Дано:**

$$\underline{\mathbf{E}}_A = \mathbf{E}e^{j\alpha}, \quad \underline{\mathbf{E}}_B = a^2 \underline{\mathbf{E}}_A$$

$$\underline{\mathbf{E}}_C = a \underline{\mathbf{E}}_A$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_A, \quad \underline{\mathbf{Z}}_B, \quad \underline{\mathbf{Z}}_C, \quad \underline{\mathbf{Z}}_N$$



**Определить:**

**а)  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$**

**б)  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$**

**в)  $\underline{I}_N$  и  $\underline{U}_N$**

# По методу узловых потенциалов

$$\underline{\varphi}_N = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{\varphi}_n (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N) = \\ = \underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C \end{aligned}$$



где проводимости:

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$$

$$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$$



# Напряжение смещения нейтралей

$$\underline{U}_N = \underline{\varphi}_n - \underline{\varphi}_N =$$

$$= \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} =$$

$$= \underline{U}_N e^{j\varphi_N}$$



**По первому закону  
Кирхгофа:**

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$



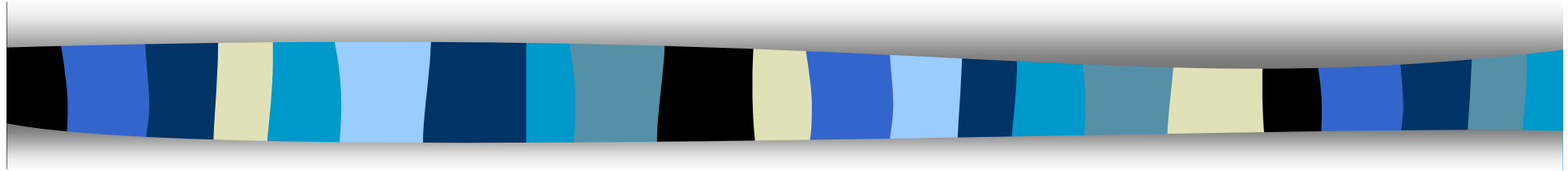
**По закону Ома:**

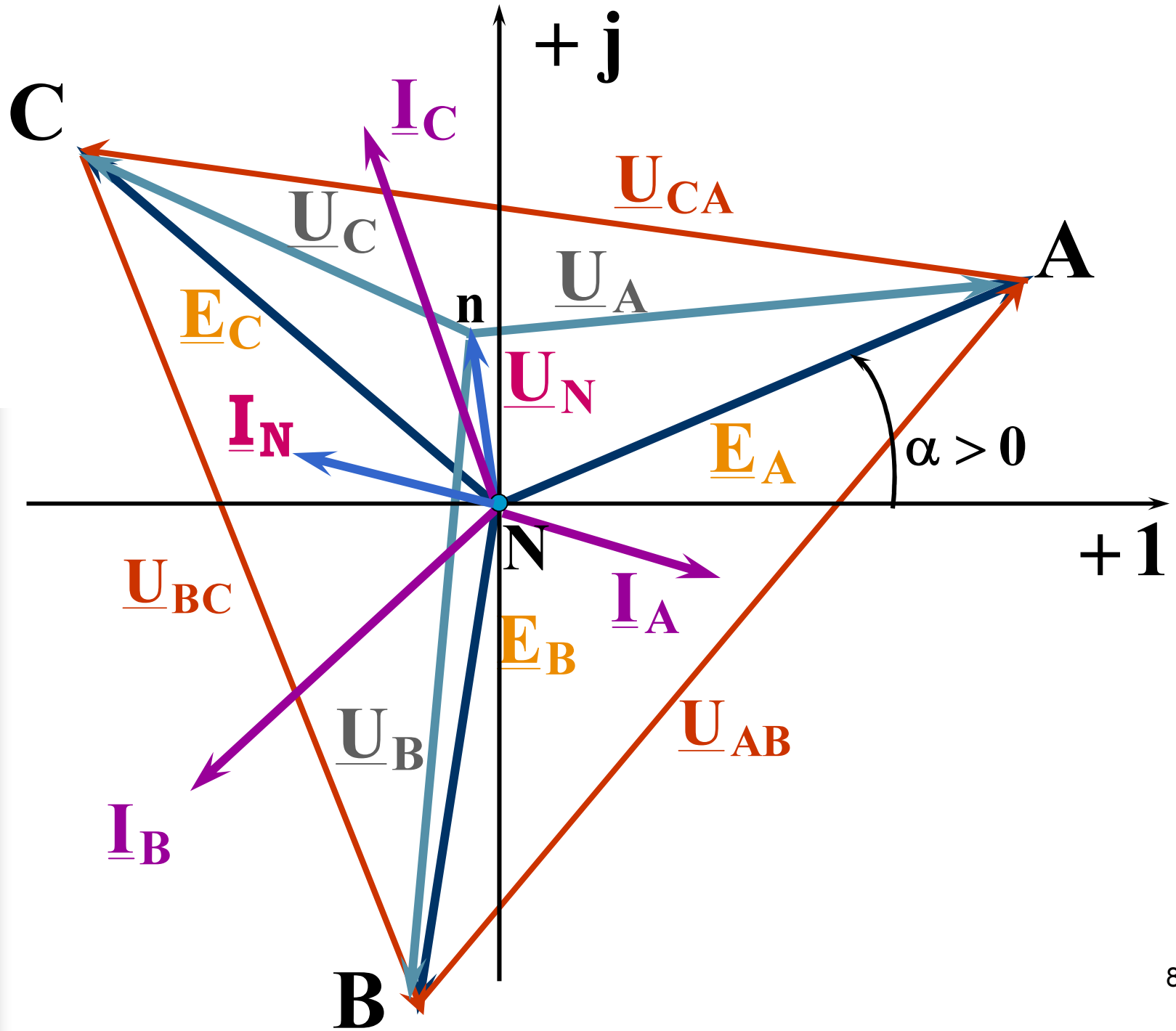
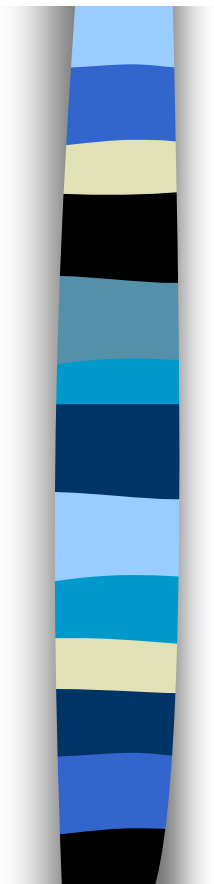
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{\varphi}_N^0 - \underline{\varphi}_n + \underline{E}_A}{\underline{Z}_A}$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{\varphi}_N^0 - \underline{\varphi}_n + \underline{E}_B}{\underline{Z}_B}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{\varphi}_N^0 - \underline{\varphi}_n + \underline{E}_C}{\underline{Z}_C}$$

# Векторная диаграмма





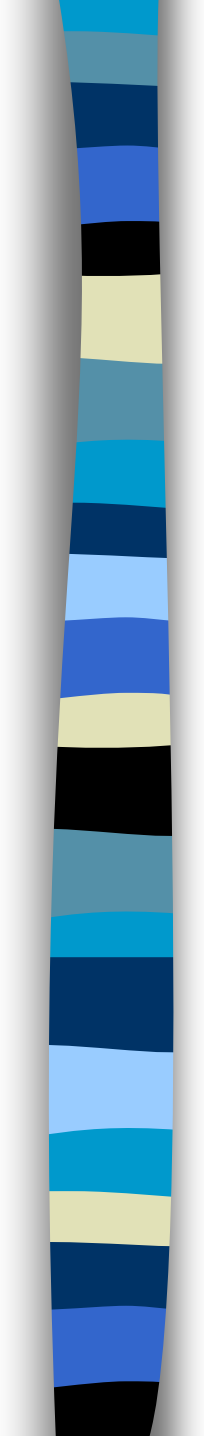


если  $\underline{Z}_N = 0$  , то

$$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N} = \infty$$

Тогда  $\underline{U}_N = 0$  и

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A; \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B; \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C$$



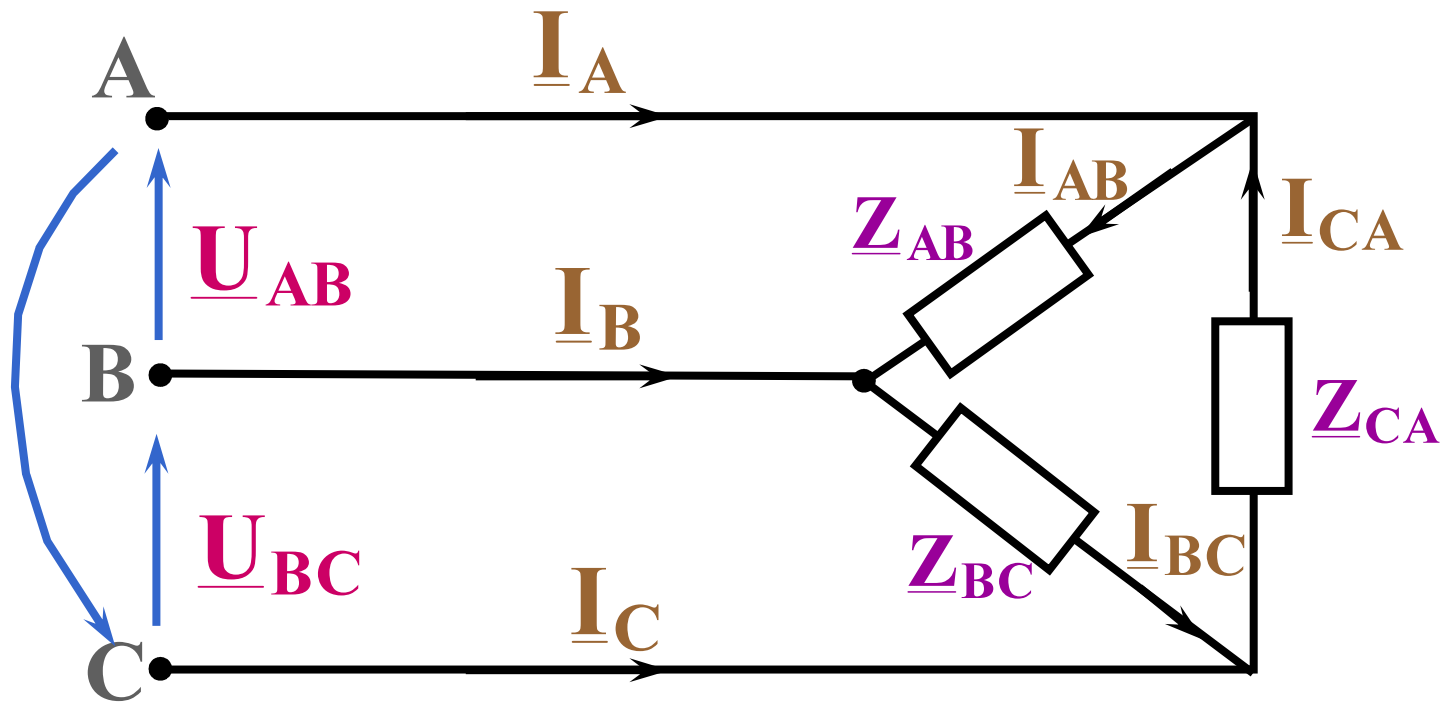
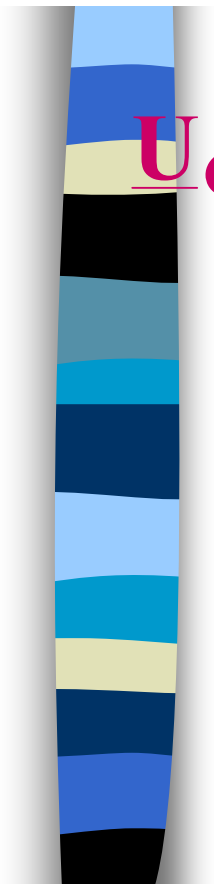
**Таким образом,  
нулевой провод выравнивает  
величины фазных напряжений  
нагрузки, что используется  
в бытовых электрических  
сетях**



### 3. Соединение несимметричной нагрузки треугольником

$$(\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA})$$







**Дано:**

$$\underline{U}_{AB} = U_{\text{Л}} e^{j\lambda}, \quad \underline{U}_{BC} = a^2 \underline{U}_{AB},$$

$$\underline{U}_{CA} = a \underline{U}_{AB},$$

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



**Определить:**

**а) фазные токи**

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

**б) линейные токи**

$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$



По закону Ома:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}$$

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}$$

$$\underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}$$



По первому закону

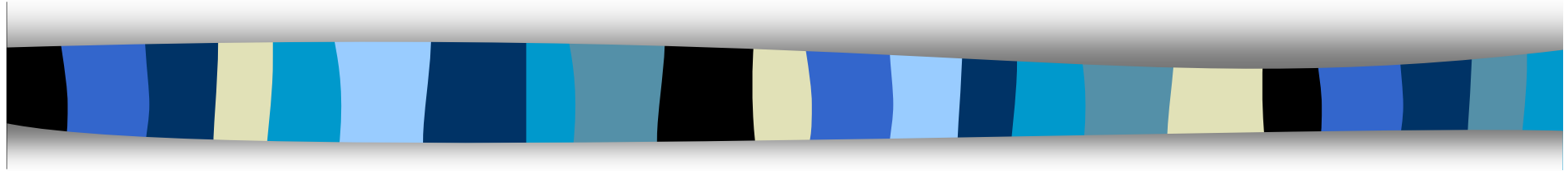
Кирхгофа:

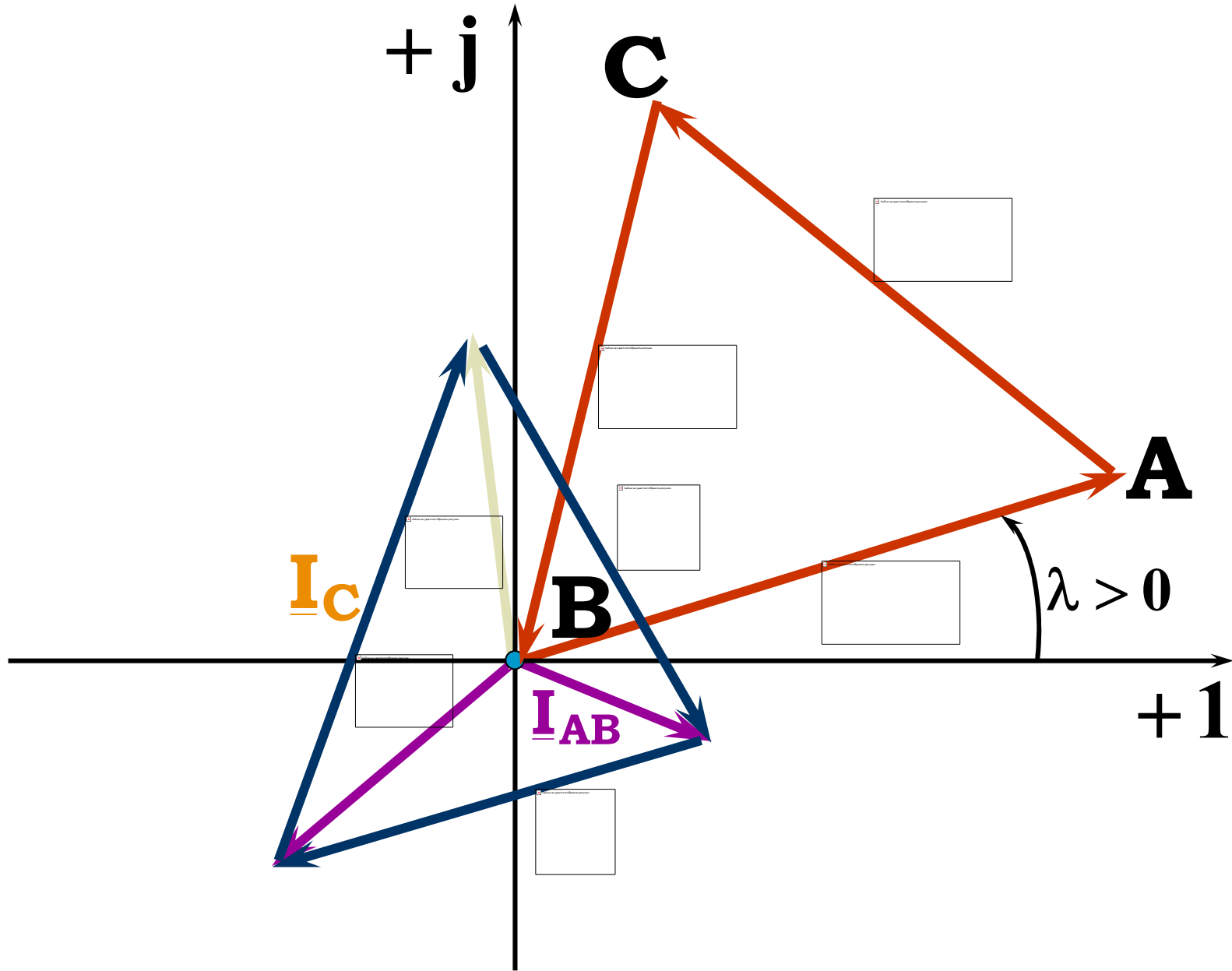
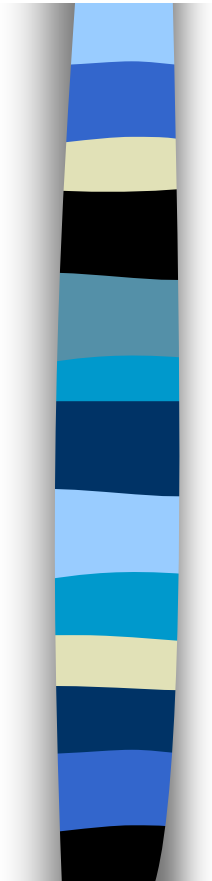
$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$$

# Векторная диаграмма

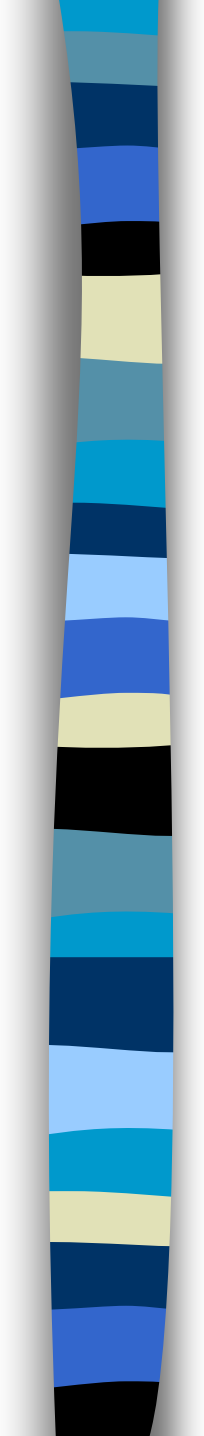






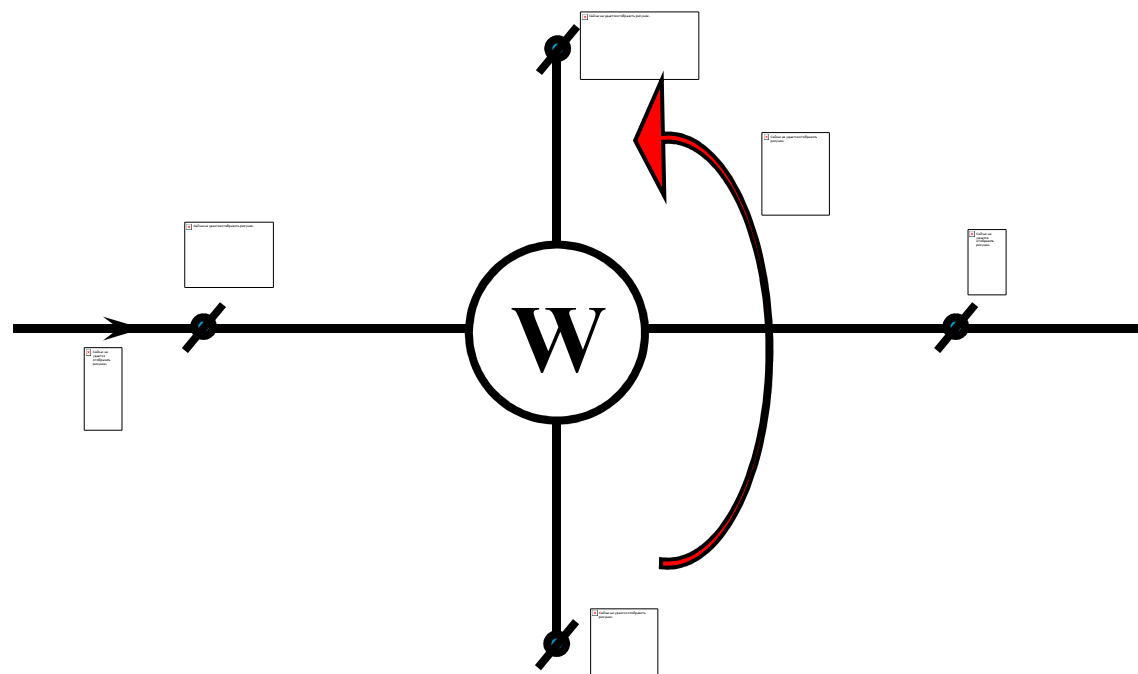
# Измерение мощности в трехфазных цепях





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

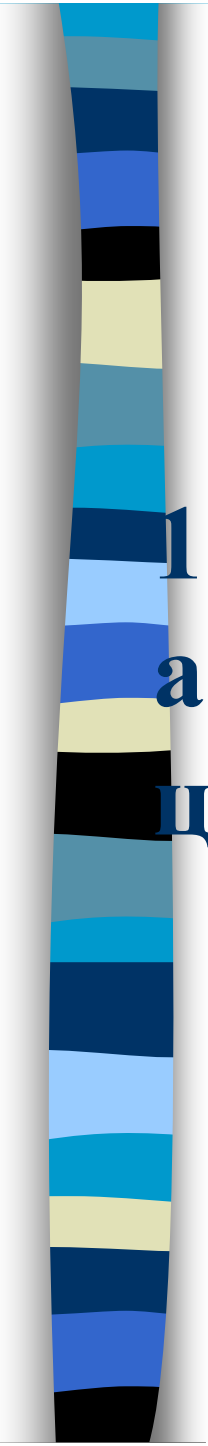
■ При этом ваттметр имеет четыре клеммы



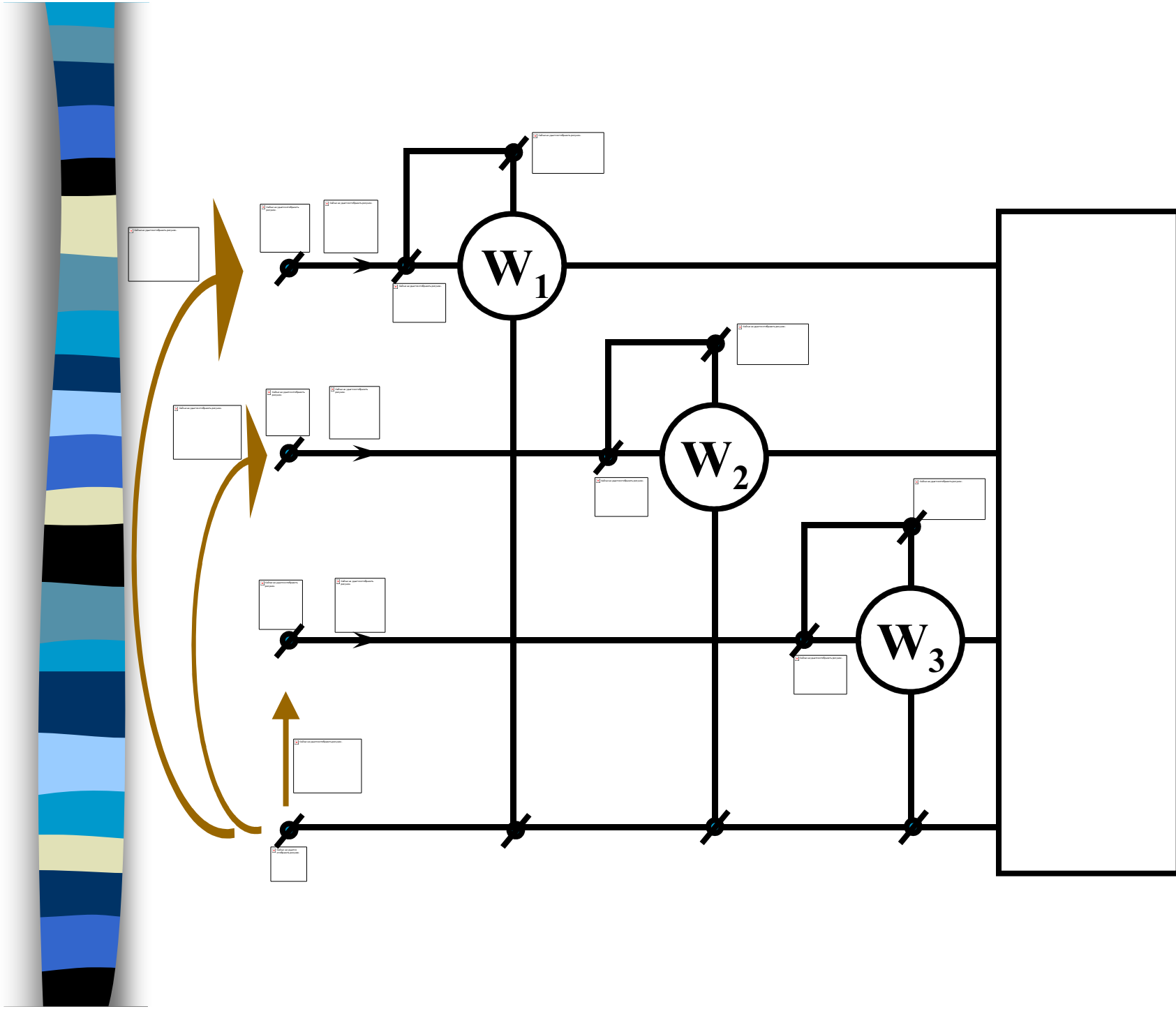


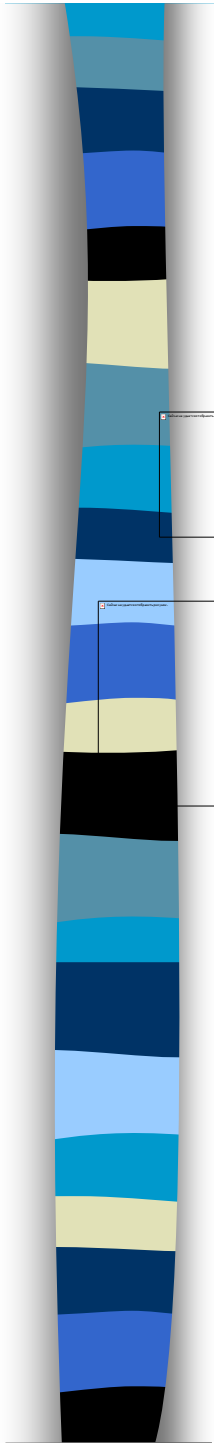
# Показание ваттметра:

где



# **1. Измерение суммарной активной мощности трехфазной цепи с нулевым проводом**






Empty rectangular box for text input.

Empty rectangular box for text input.


Empty rectangular box for text input.

Empty rectangular box for text input.

Empty rectangular box for text input.

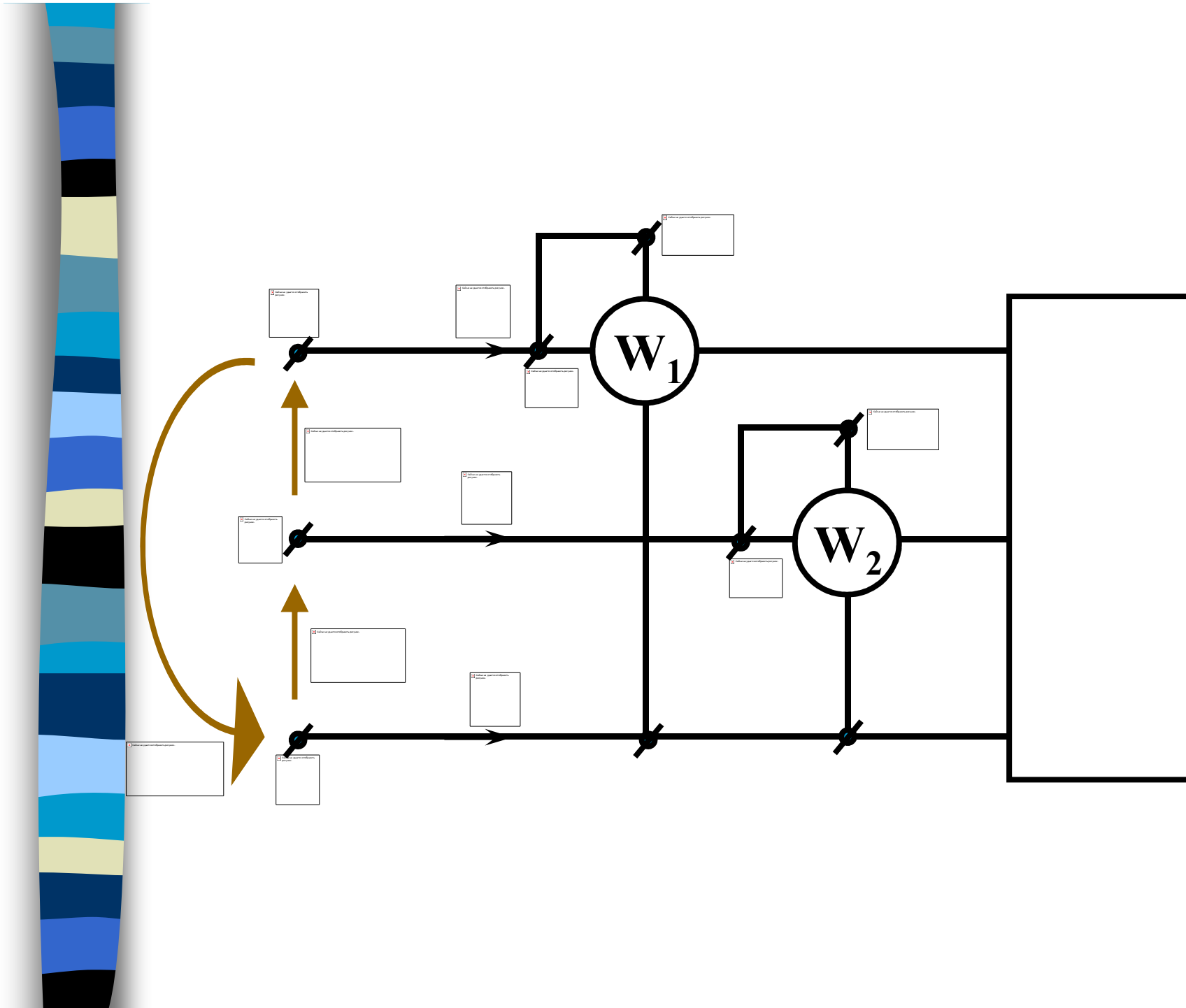


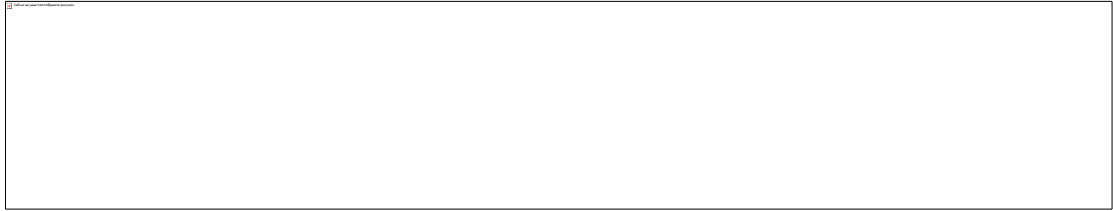
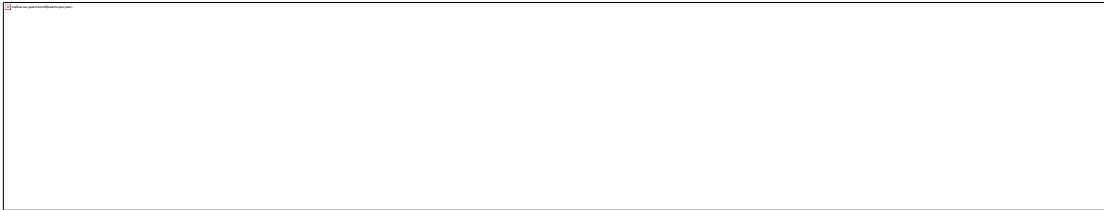
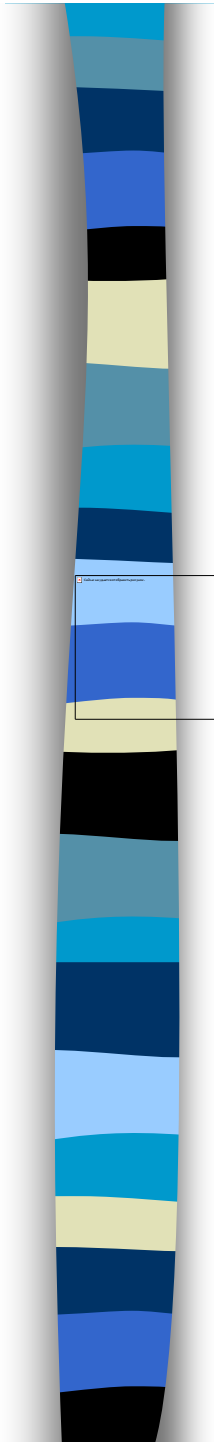
## **2. Измерение суммарной активной мощности трехфазной цепи без нулевого провода**

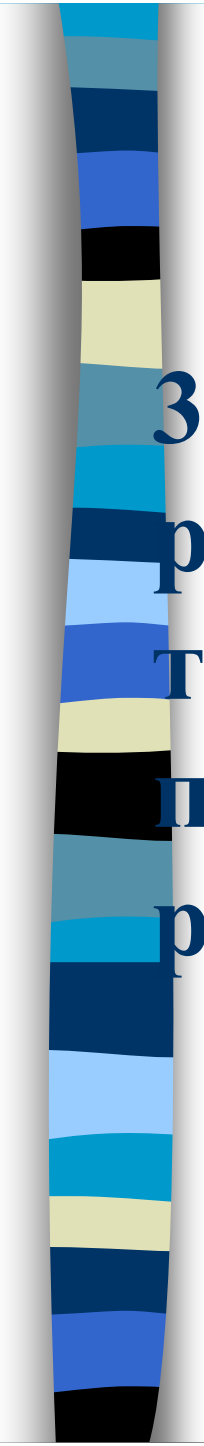


**Измерение мощности  
осуществляется двумя  
ваттметрами, причем одна из  
трех возможных схем  
следующая**

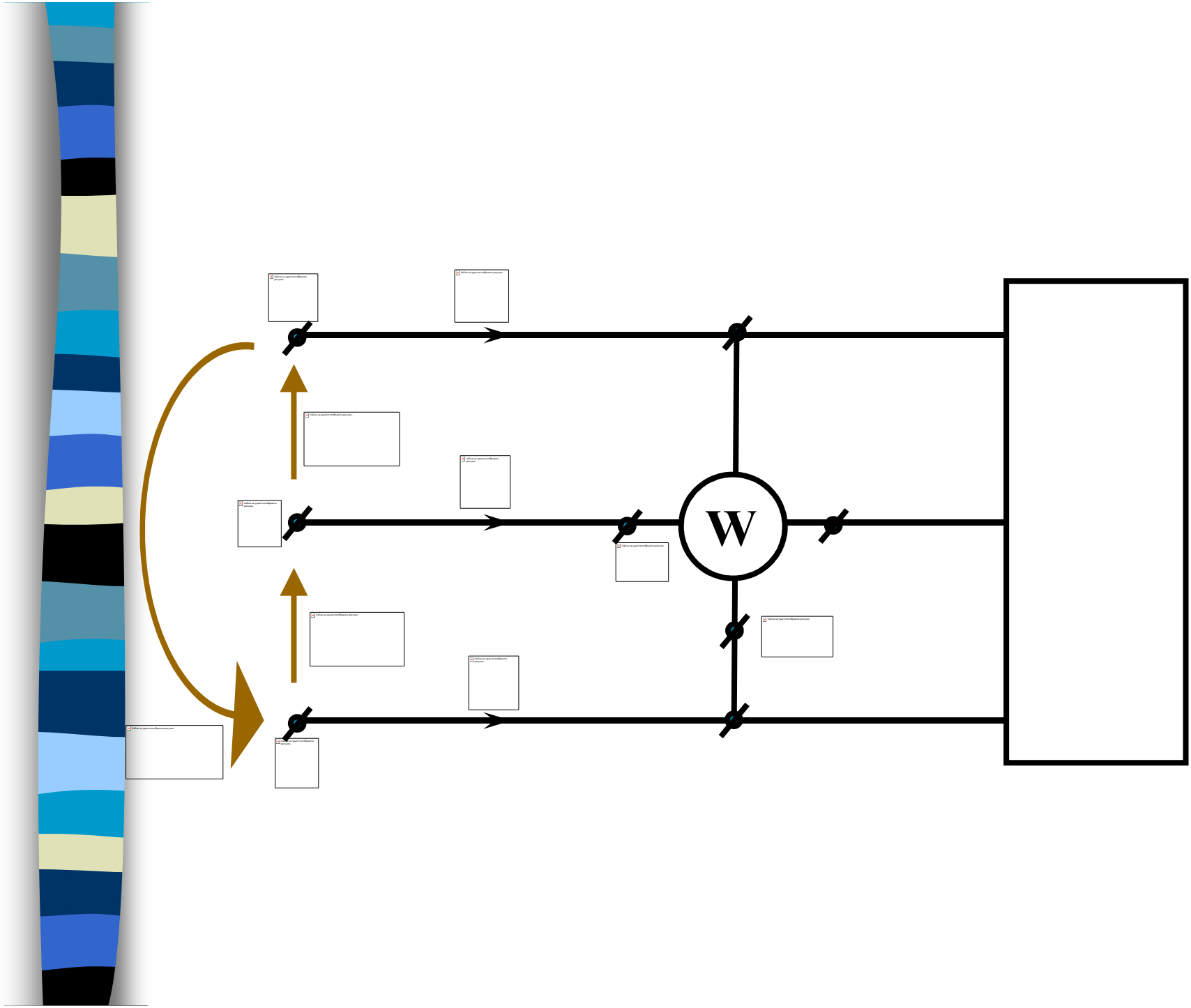


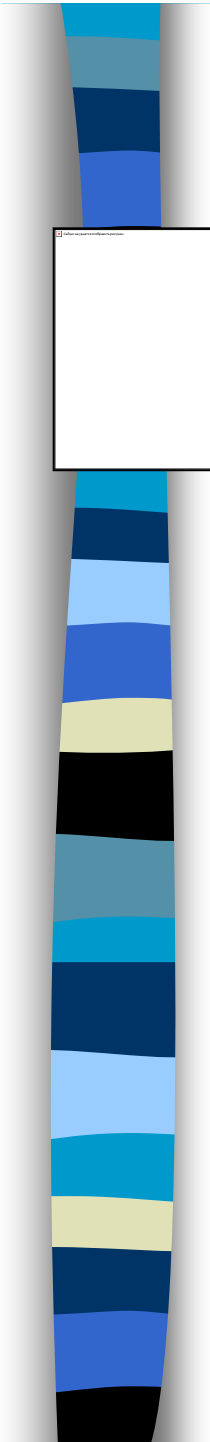






### **3. Измерение суммарной реактивной мощности трехфазной цепи без нулевого провода в симметричном режиме**



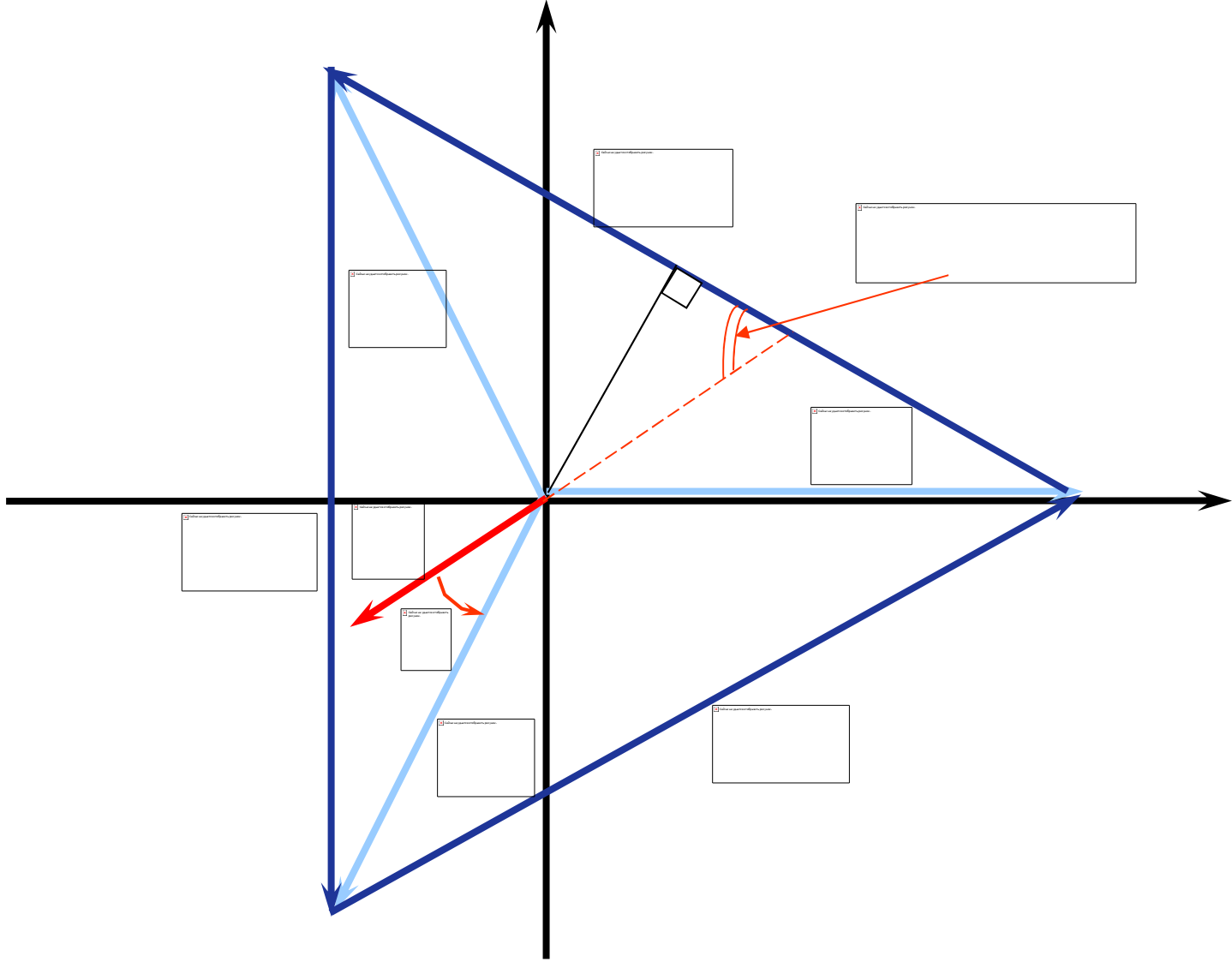


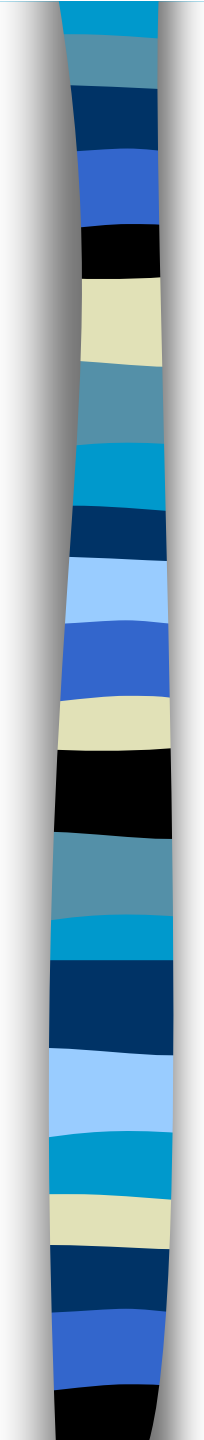
[Empty rectangular box]

[Empty rectangular box]


[Empty rectangular box]

[Empty rectangular box]



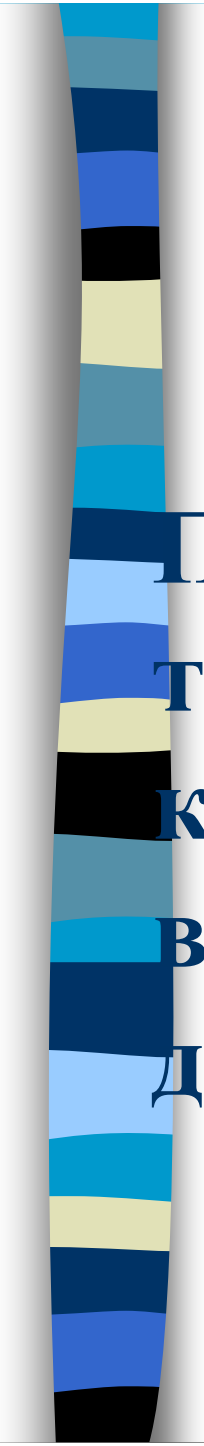


# **Круговое вращающееся магнитное поле**




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

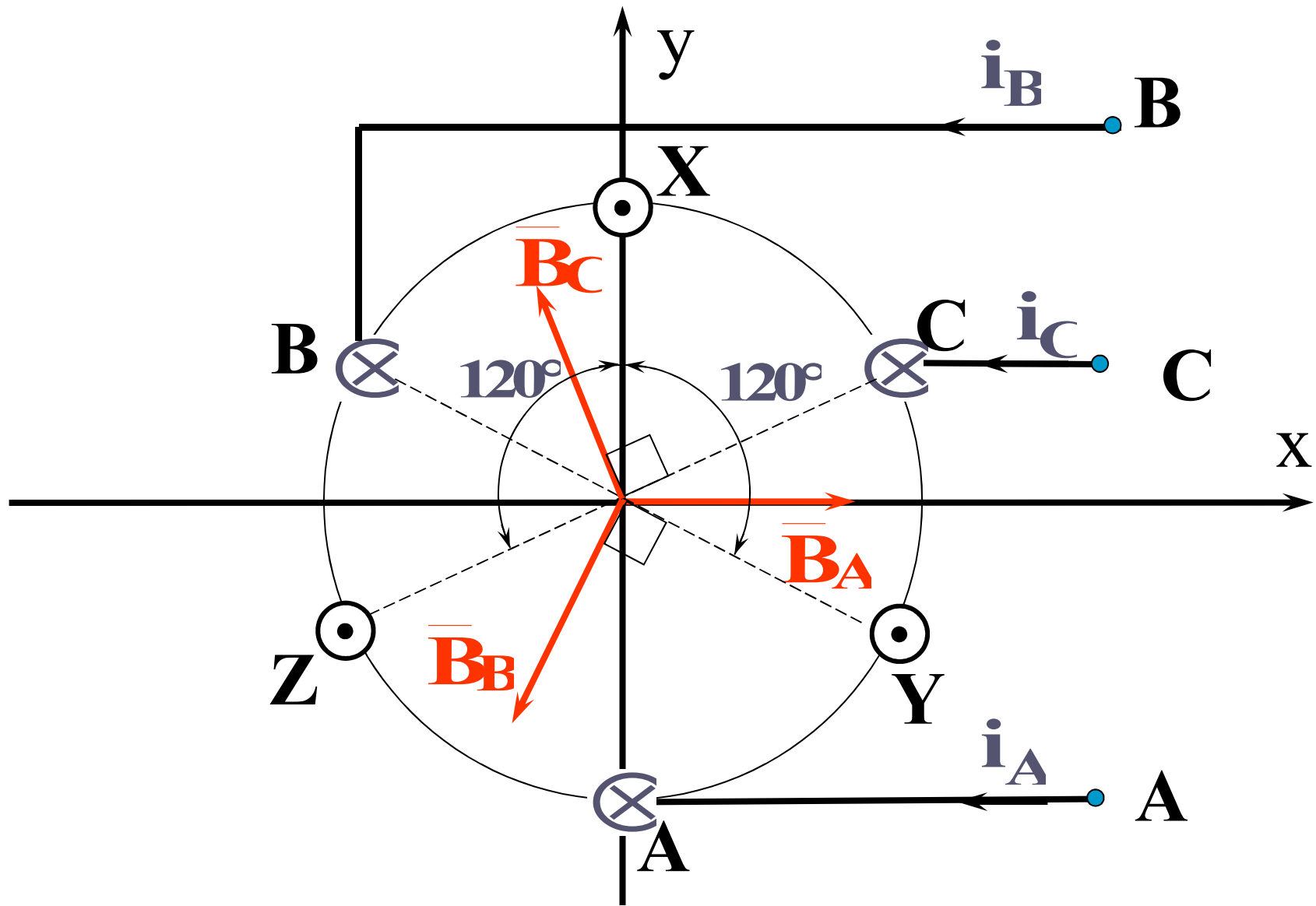




**Присоединим к трехфазной цепи  
три одинаковые неподвижные  
катушки, оси которых сдвинуты  
в пространстве по отношению к  
друг другу на 120 градусов**



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:

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

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

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

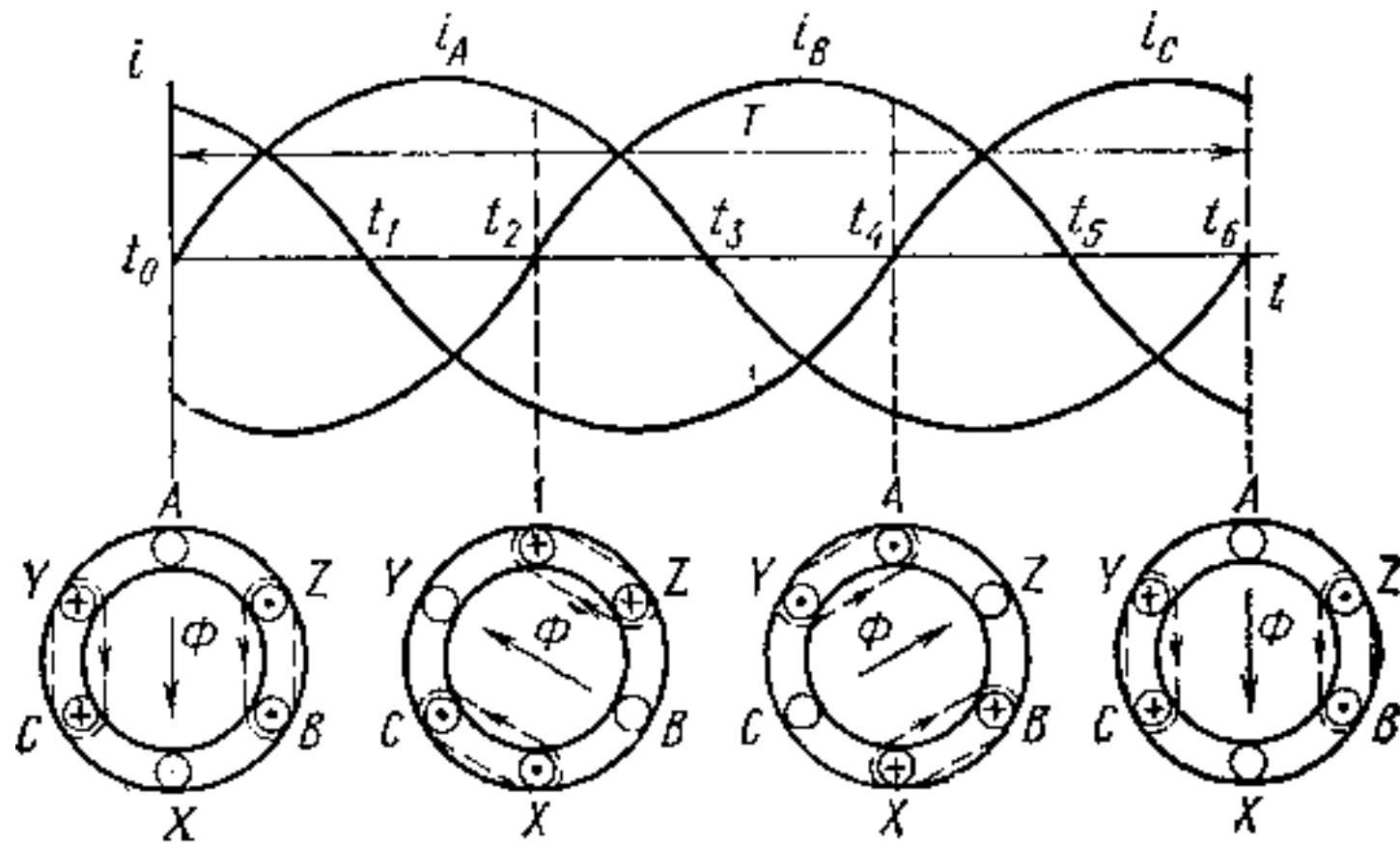


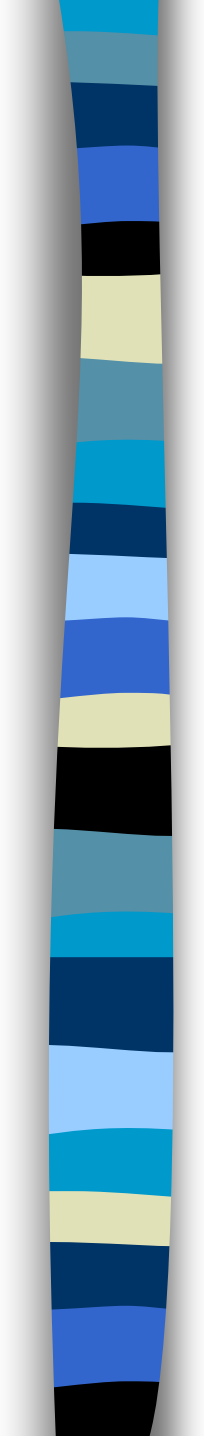
**Фазные индукции магнитного поля:**

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

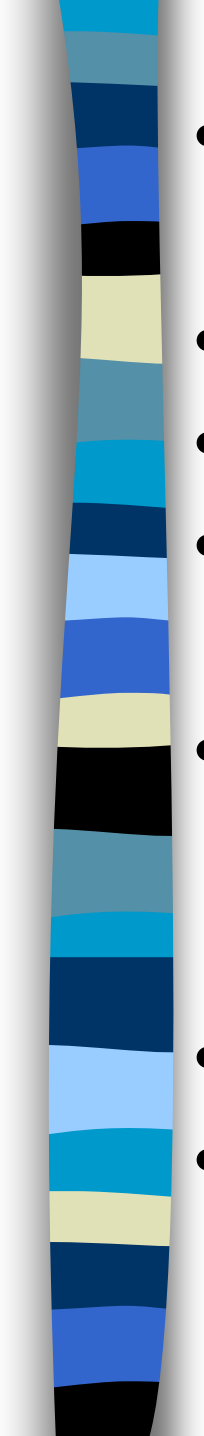
$$B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

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





**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**

- 
- Как можно определить, протекает ли ток по проводнику?
  - Что такое магнитная индукция?
  - Какая цепь называется трехфазной?
  - Что такое фазные и линейные напряжения?
  - Как вы думаете, чем опасно короткое замыкание фазы при включенном нулевом проводе.
  - Где применяются трехфазные цепи?
  - Как получается вращающееся магнитное поле?