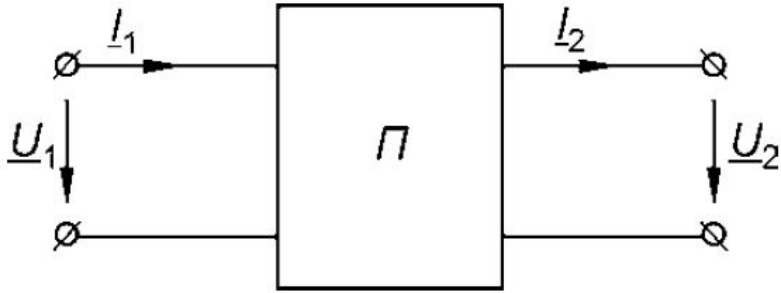
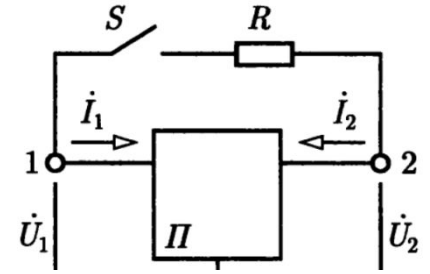


Четырехполюсники



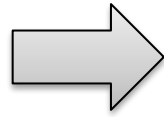
$$z_{11}; \quad z_{12} = z_{21}; \quad z_{22}$$

- активный, пассивный;
- автономный, неавтономный;
- линейный, нелинейный;
- с прямым и обратным питанием



$$-\dot{U}_1 + \dot{I}_1 z_{11} - \dot{I}_2 z_{12} = 0 \quad \boxtimes \quad \dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_1 + \dot{I}_1 z_{11}}{z_{12}}$$

$$\dot{U}_2 + \dot{I}_2 z_{22} - \dot{I}_1 z_{21} = 0 \quad \boxtimes \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 z_{22}}{z_{21}}$$



$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left[\frac{z_{11}}{z_{21}} \right] + \dot{I}_2 \left[\frac{z_{22} z_{11}}{z_{21}} \right]$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 A + \dot{I}_2 B$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 \left[\frac{1}{z_{21}} \right] + \dot{I}_2 \left[\frac{z_{22}}{z_{21}} \right]$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 C + \dot{I}_2 D$$

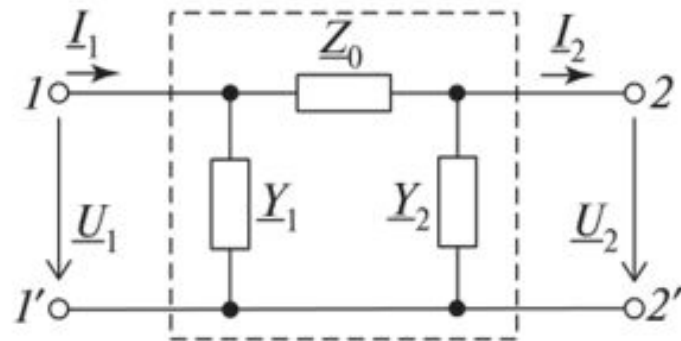
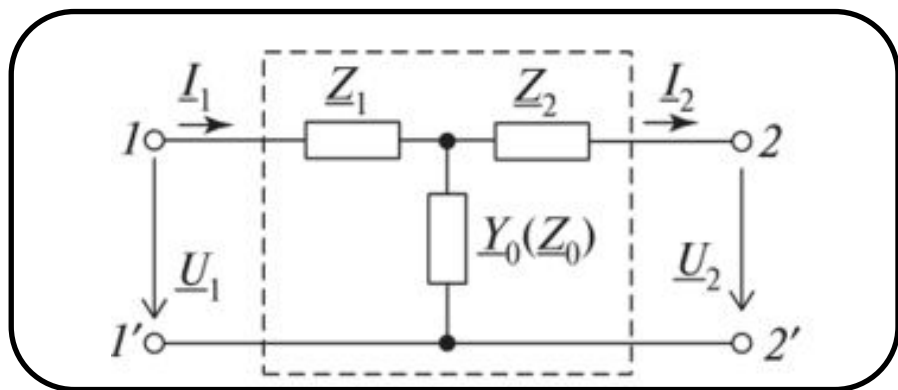
$$\dot{I}_2 = 0 \text{ НЫТ ХХ} \quad \boxtimes \quad A = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \quad C = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}$$

$$\dot{U}_2 = 0 \text{ НЫТ КЗ} \quad \boxtimes \quad B = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \quad D = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}$$

$$z_{1X} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{A}{C}; \quad z_{1K} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{B}{D}$$

Аквэфф D-х полюсника
 A – [б/р], B – [Ом], C – [См], D – [б/р]
 $A = D$ – симметричный

Четырехполюсники



$$I_0 = I_1 - I_2;$$

$$-U_1 + I_1 z_1 + I_0 z_0 = 0$$

$$U_2 + I_2 z_2 - I_0 z_0 = 0$$

$$I_1 = \frac{U_2}{z_0} + I_2 \left(\frac{z_0 + z_2}{z_0} \right)$$

$$U_1 = U_2 \left[\frac{z_1}{z_0} \right] + I_2 \left[\frac{(z_0 + z_2)z_1}{z_0} \right] + (I_1 - I_2)z_0$$

$$U_1 = U_2 \left[\frac{z_1}{z_0} \right] + I_2 \left[\frac{(z_0 + z_2)z_1}{z_0} \right] + U_2 + (z_0 + z_2)I_2 - I_2 z_0 = U_2 \left[\frac{z_1}{z_0} + 1 \right] + I_2 \left[\frac{(z_0 + z_2)z_1}{z_0} + z_2 \right]$$

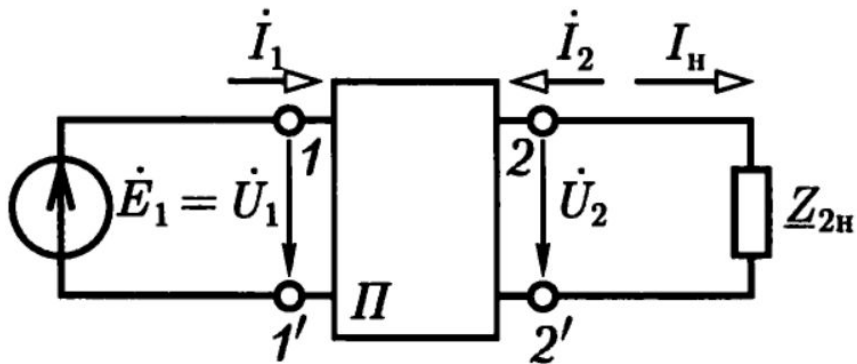
$$U_1 = U_2 A + I_2 B$$

$$A = \frac{z_1}{z_0} + 1; B = \frac{(z_0 + z_2)z_1}{z_0} + z_2$$

$$I_1 = U_2 C + I_2 D$$

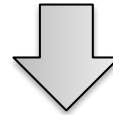
$$C = 1/z_0; D = \frac{z_2}{z_0} + 1$$

Четырехполюсники



$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2; (1)$$

$$I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2; (2)$$



Коэффициенты передачи

$$(2) / U_2 \boxtimes \frac{U_1}{U_2} = K_H^{-1} = \frac{Y_{2H} - Y_{22}}{Y_{21}} \quad (Y_2 = \frac{U_2}{I_2})$$

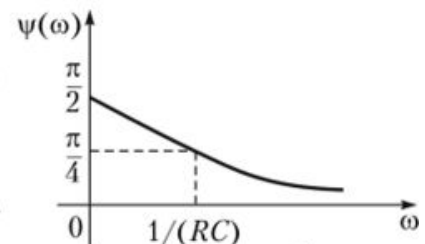
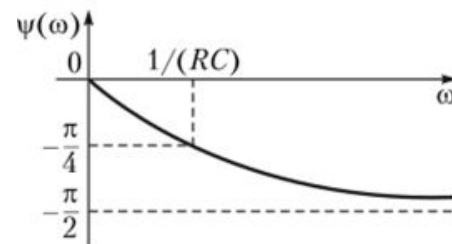
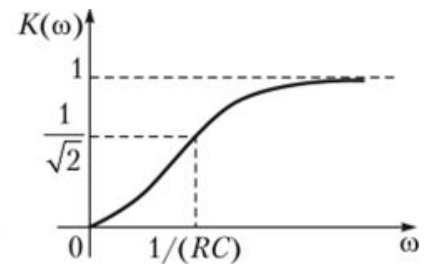
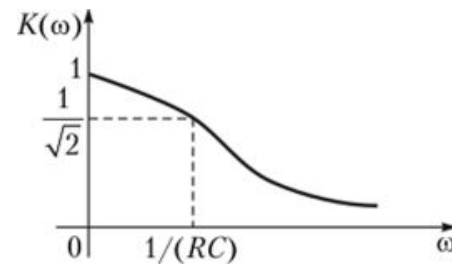
$$K_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\varphi_{U2} - \varphi_{U1})} \quad (1) \quad (2) \quad U_1$$

$$K_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_2}{I_1} e^{j(\varphi_{I2} - \varphi_{I1})}$$

$$\varphi_{U2} - \varphi_{U1} = \varphi \boxtimes \varphi(\omega);$$

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} \boxtimes \frac{I_2}{I_1} \boxtimes K_U(\omega), K_I(\omega) -$$

$$U_1 \boxtimes \frac{I_1}{I_2} = K_I^{-1} = \frac{Y_{11} + Y_{12}(U_2 / U_1)}{Y_{21} + Y_{22}(U_2 / U_1)}$$



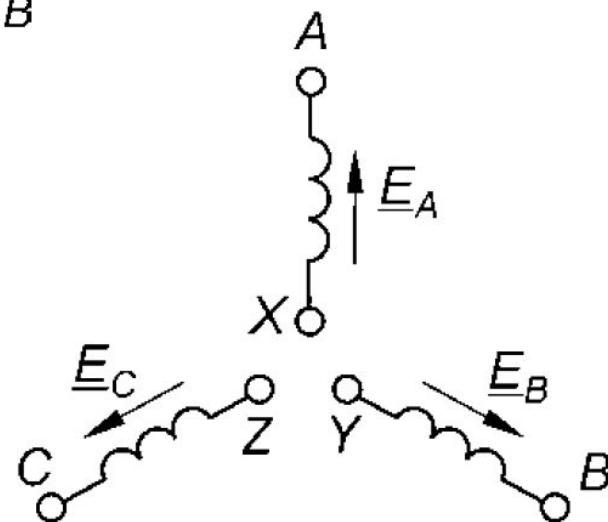
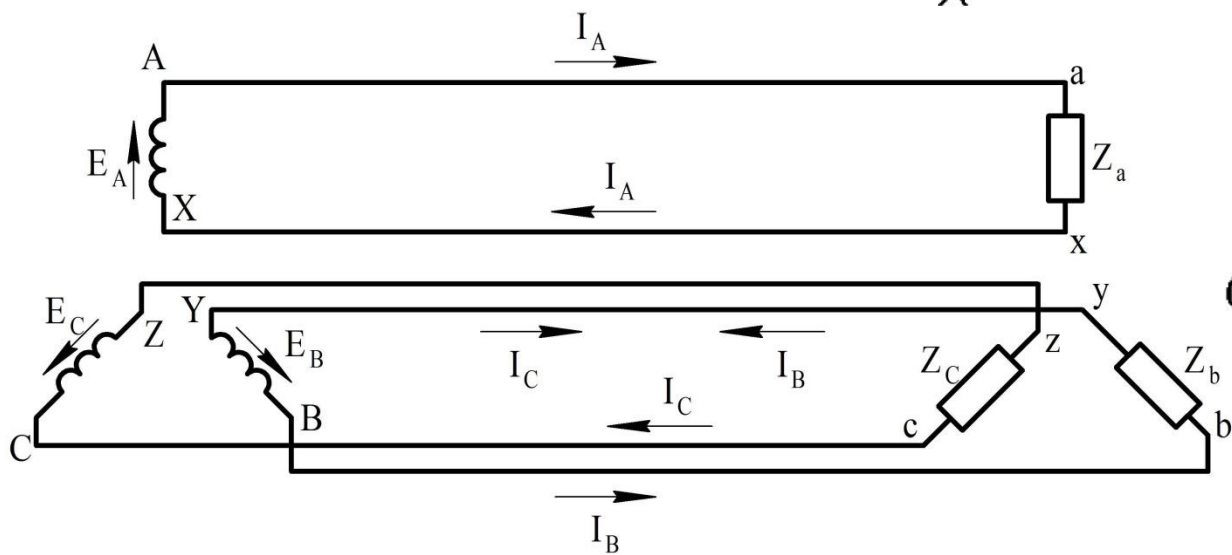
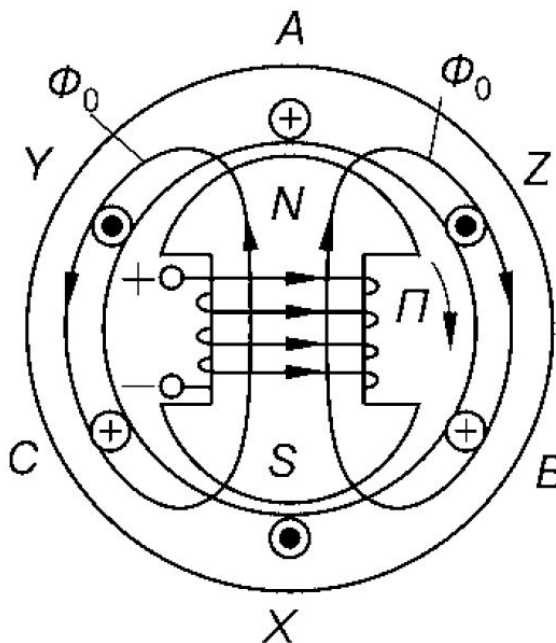
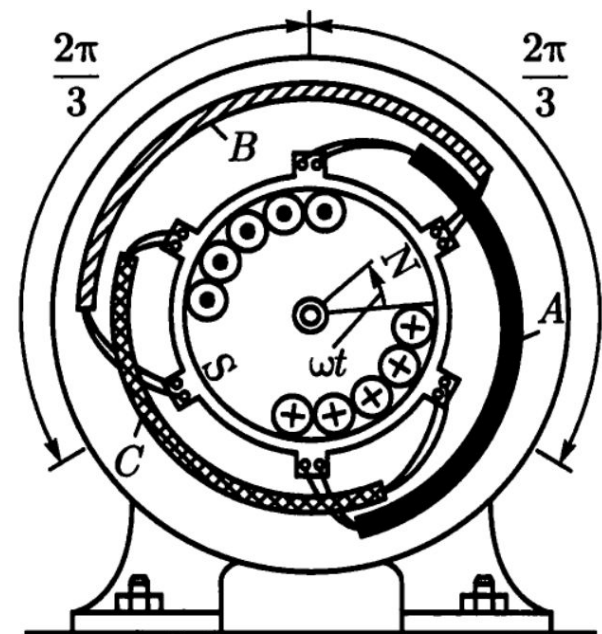
Пример для RC



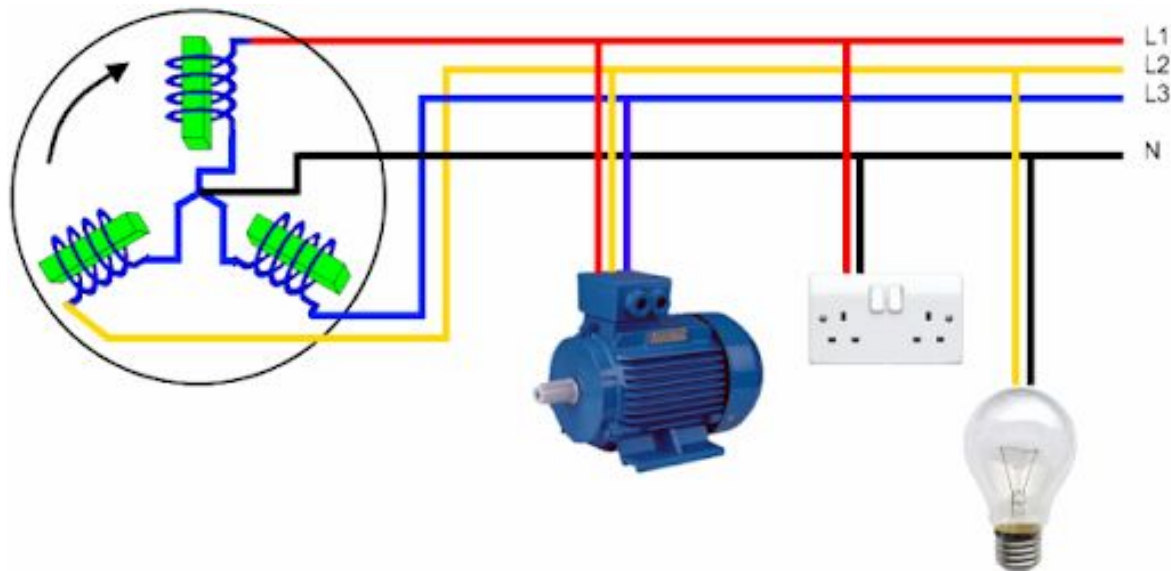
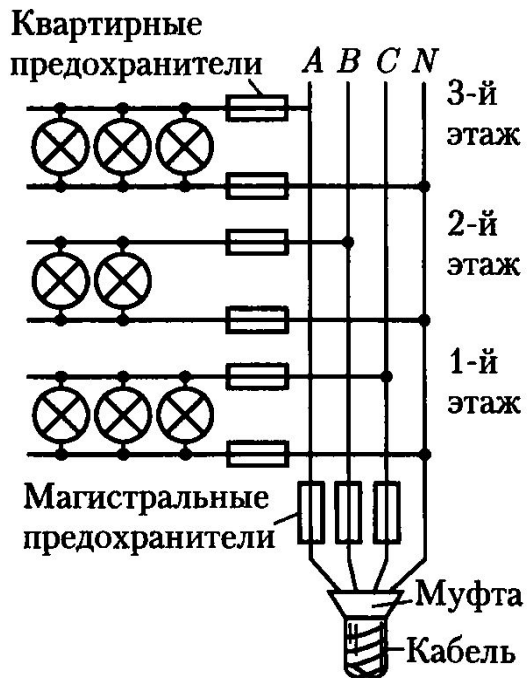
Трёхфазные цепи синусоидального тока



1891
г.
М. О. Доливо-Добровольский



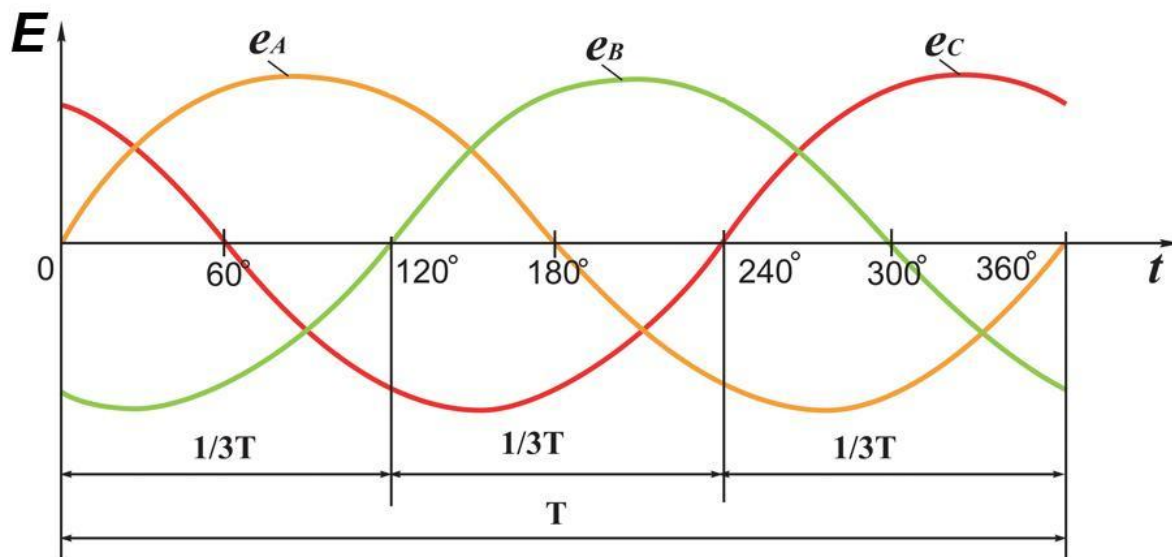
Трёхфазные цепи синусоидального тока



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

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

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

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

$$\dot{E}_A = E_\phi \angle 0^\circ = E_\phi;$$

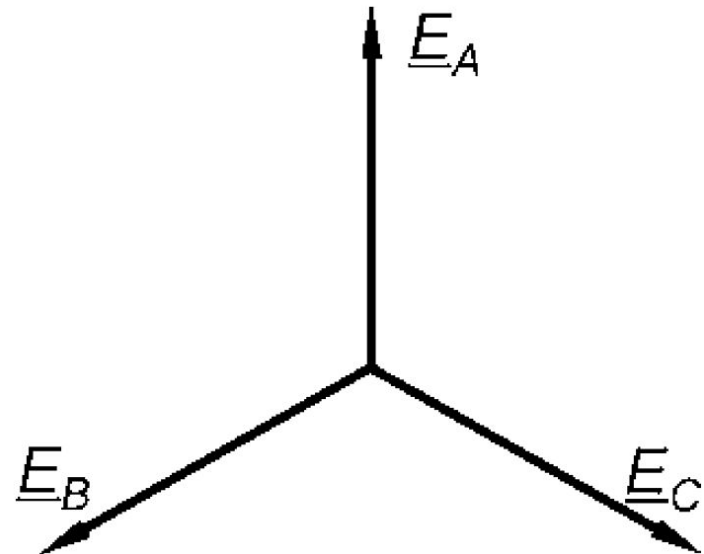
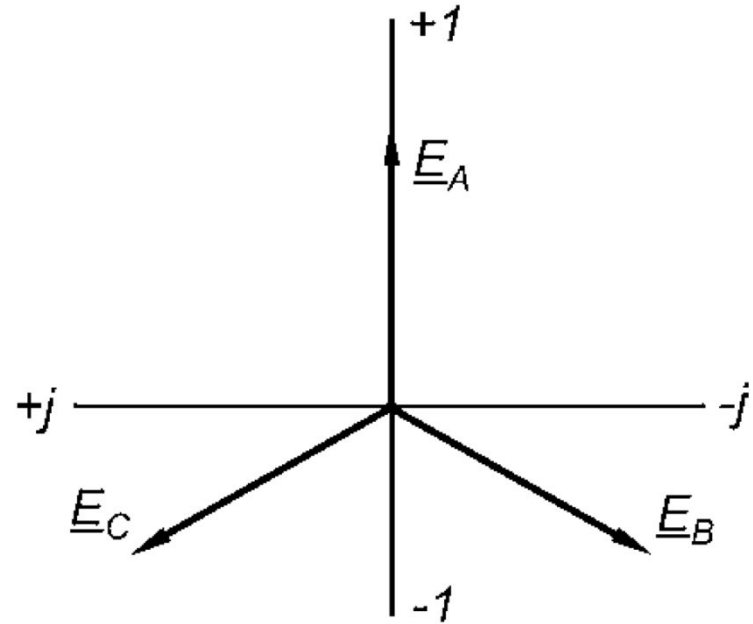
$$\dot{E}_B = E_\phi e^{-j2\pi/3} = E_\phi \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_C = E_\phi e^{j2\pi/3} = E_\phi \angle +120^\circ$$

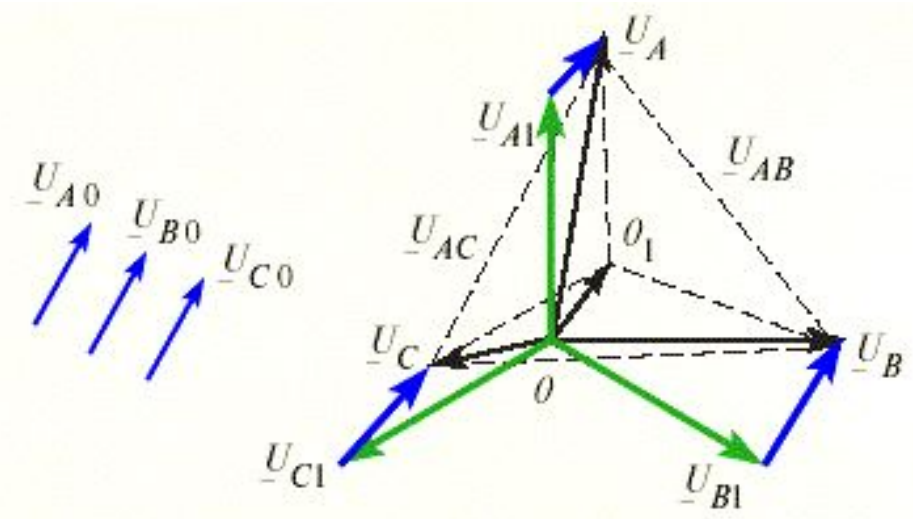
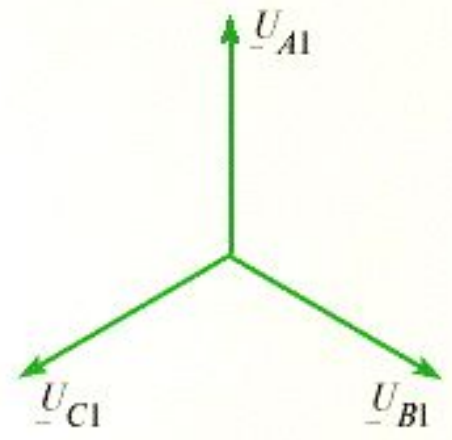
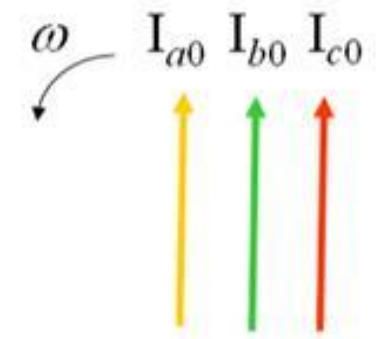
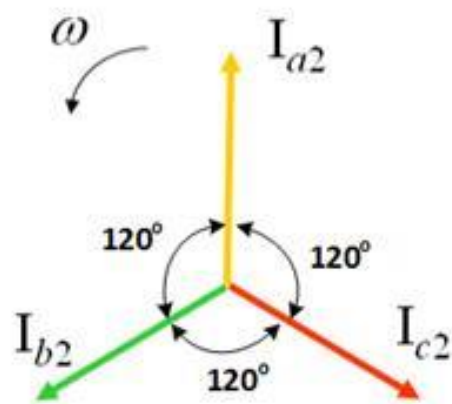
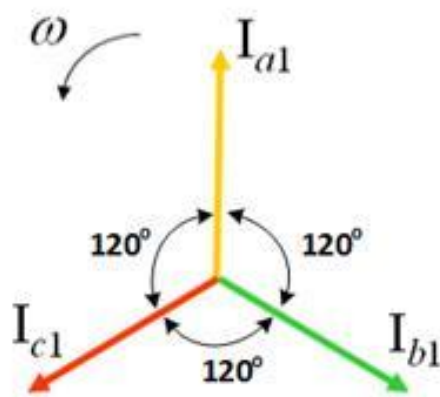
$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0 \quad e_A + e_B + e_C = 0$$

$$e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\dot{E}_A = E_\phi; \dot{E}_B = E_\phi a^2; \dot{E}_C = E_\phi a$$

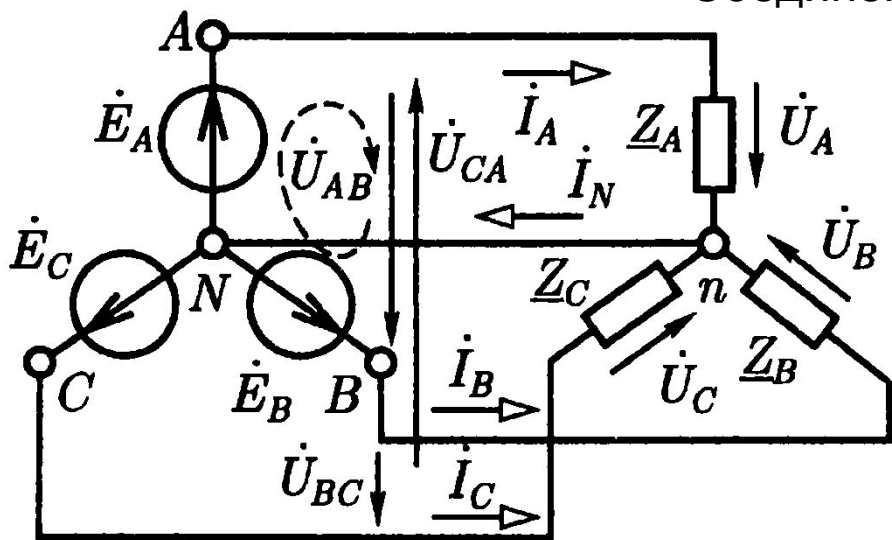


Трёхфазные цепи синусоидального тока



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда»



$$\dot{I}_A = \dot{E}_A / \underline{Z}_A$$

$$\dot{I}_B = \dot{E}_B / \underline{Z}_B$$

$$\dot{I}_C = \dot{E}_C / \underline{Z}_C$$

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

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{j\varphi}$$

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi$$

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A, \dot{E}_B = \dot{U}_B, \dot{E}_C = \dot{U}_C$$

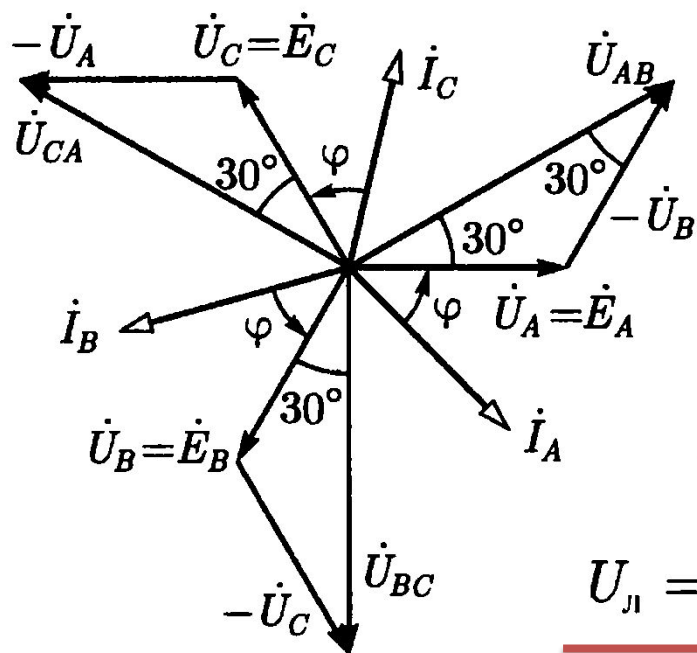
$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A$$

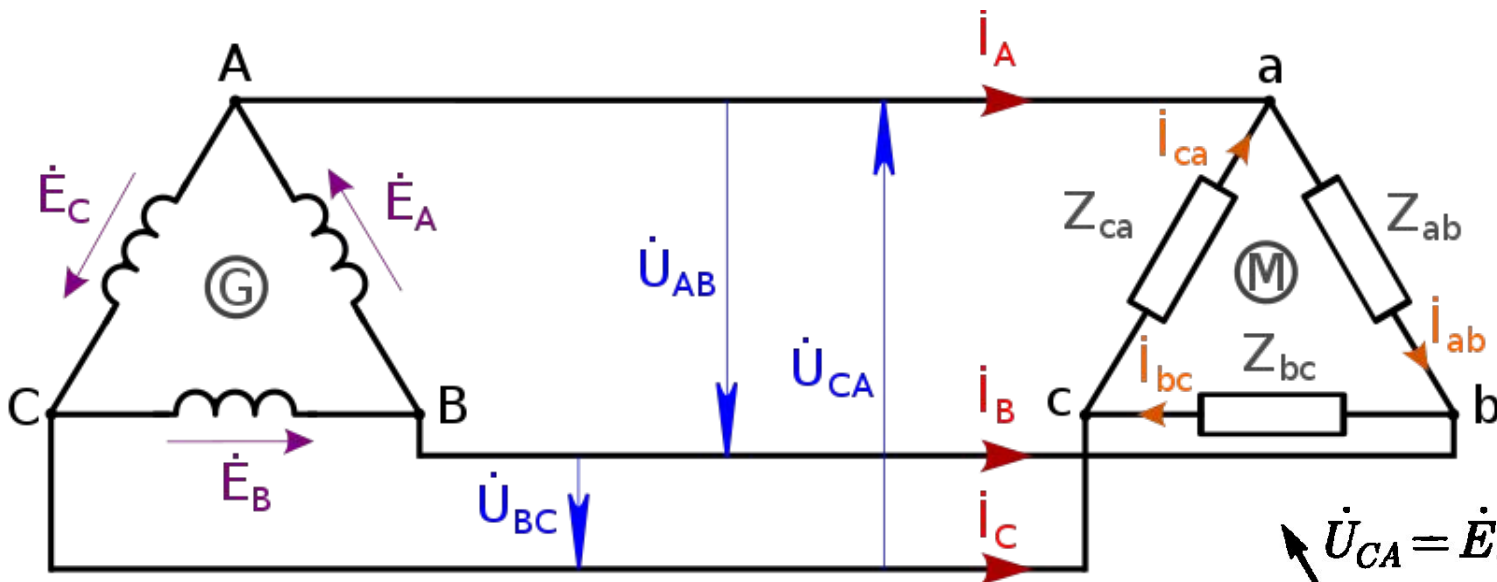
$$\underline{I}_L = I_\phi$$

$$\underline{U}_L = 2 U_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_\phi$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «треугольник»



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

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

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

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

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

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

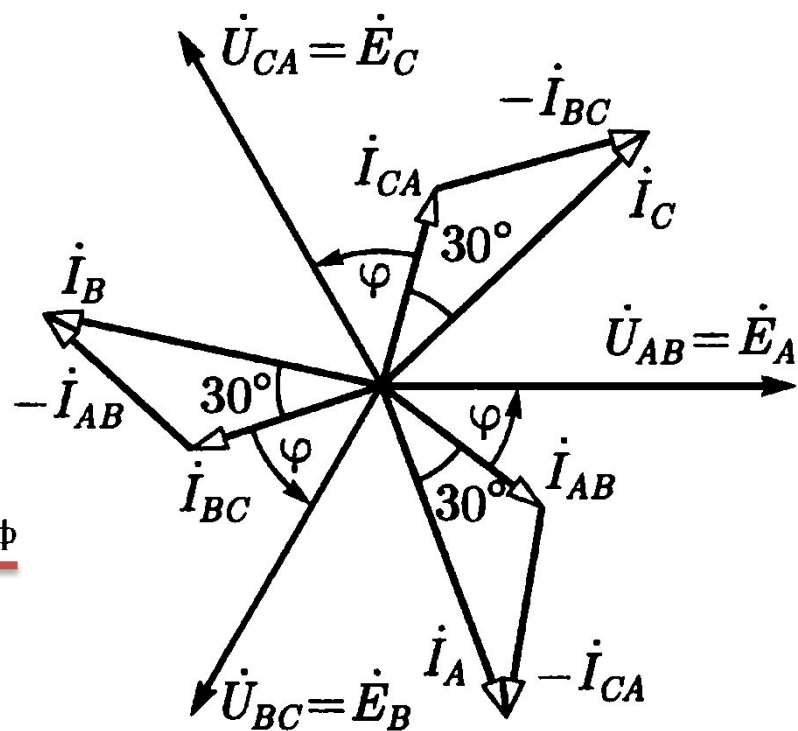
$$\dot{I}_{AB} = \dot{E}_A / \underline{Z}_{AB}$$

$$\underline{I}_n = 2I_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_\phi$$

$$\dot{I}_{BC} = \dot{E}_B / \underline{Z}_{BC}$$

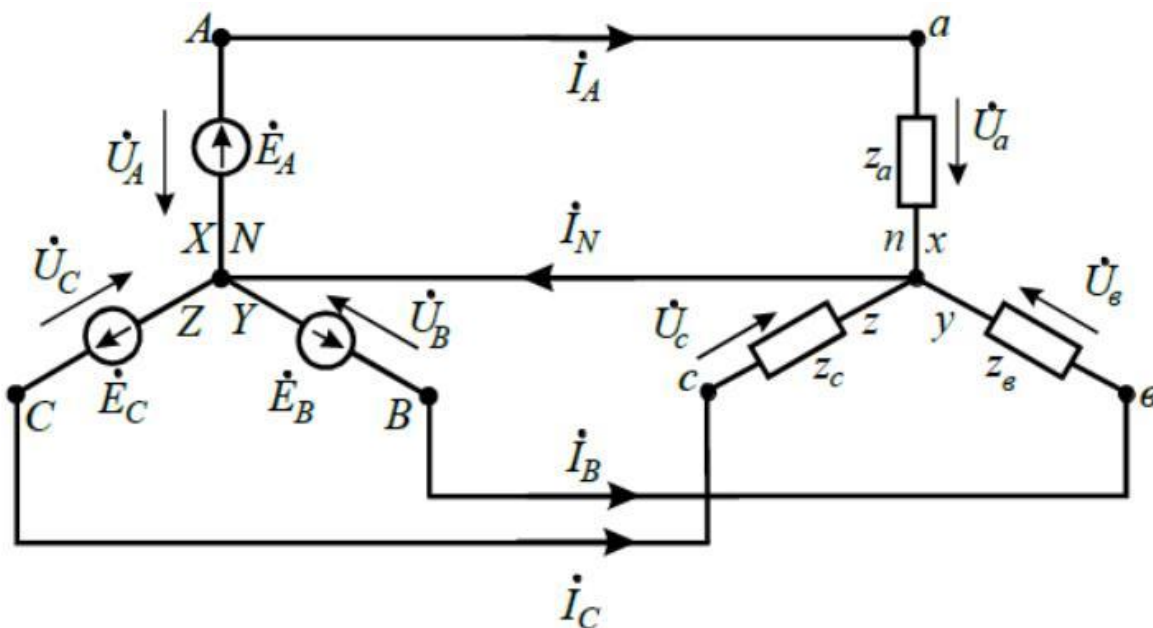
$$\underline{U}_n = U_\phi$$

$$\dot{I}_{CA} = \dot{E}_C / \underline{Z}_{CA}$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

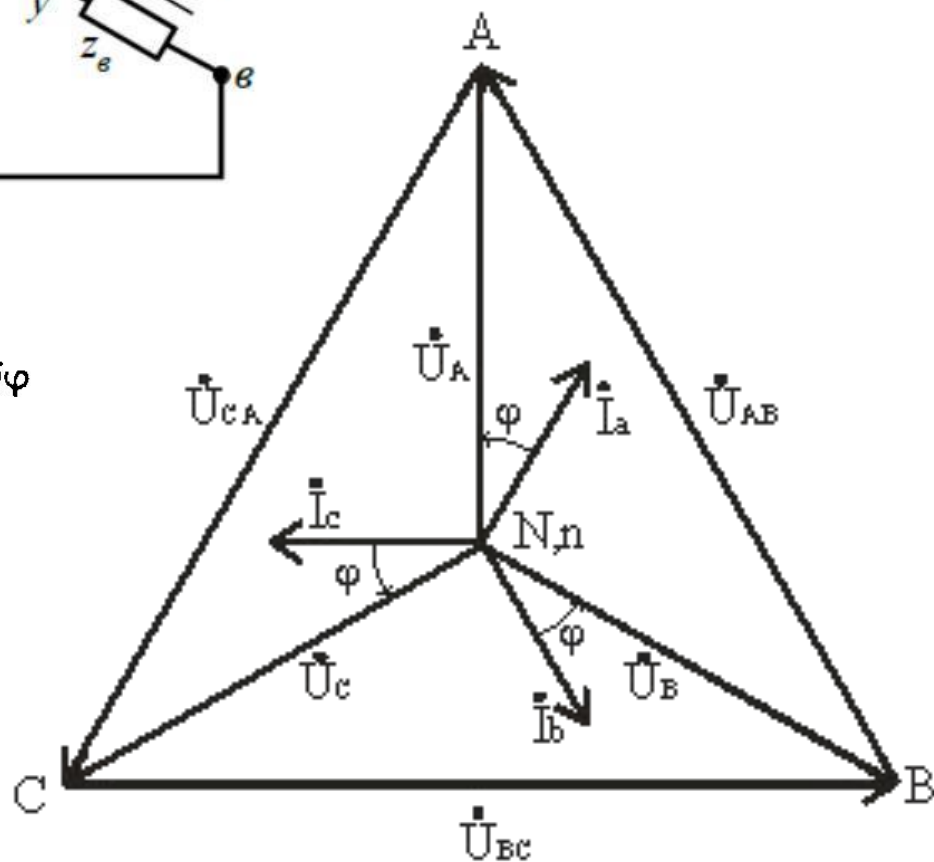
Соединение «звезда» с нейтральным проводом при симметричной нагрузке



$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{j\varphi}$$

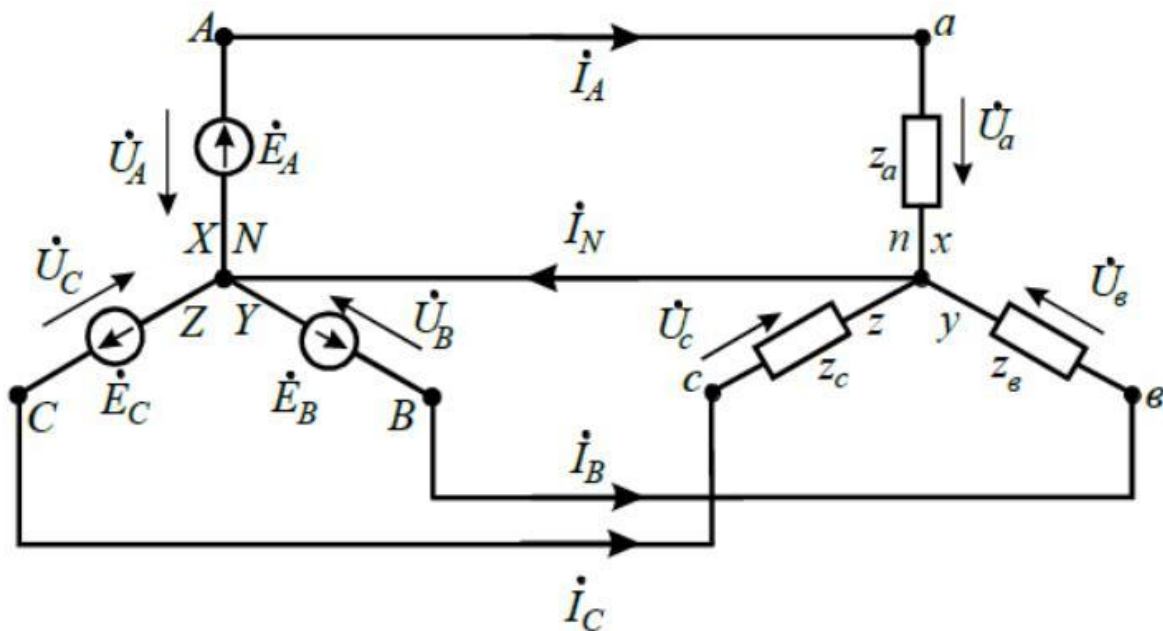
$$U_A = U_B = U_C = U_\phi$$

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A, \dot{E}_B = \dot{U}_B, \dot{E}_C = \dot{U}_C$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» с нейтральным проводом при несимметричной нагрузке

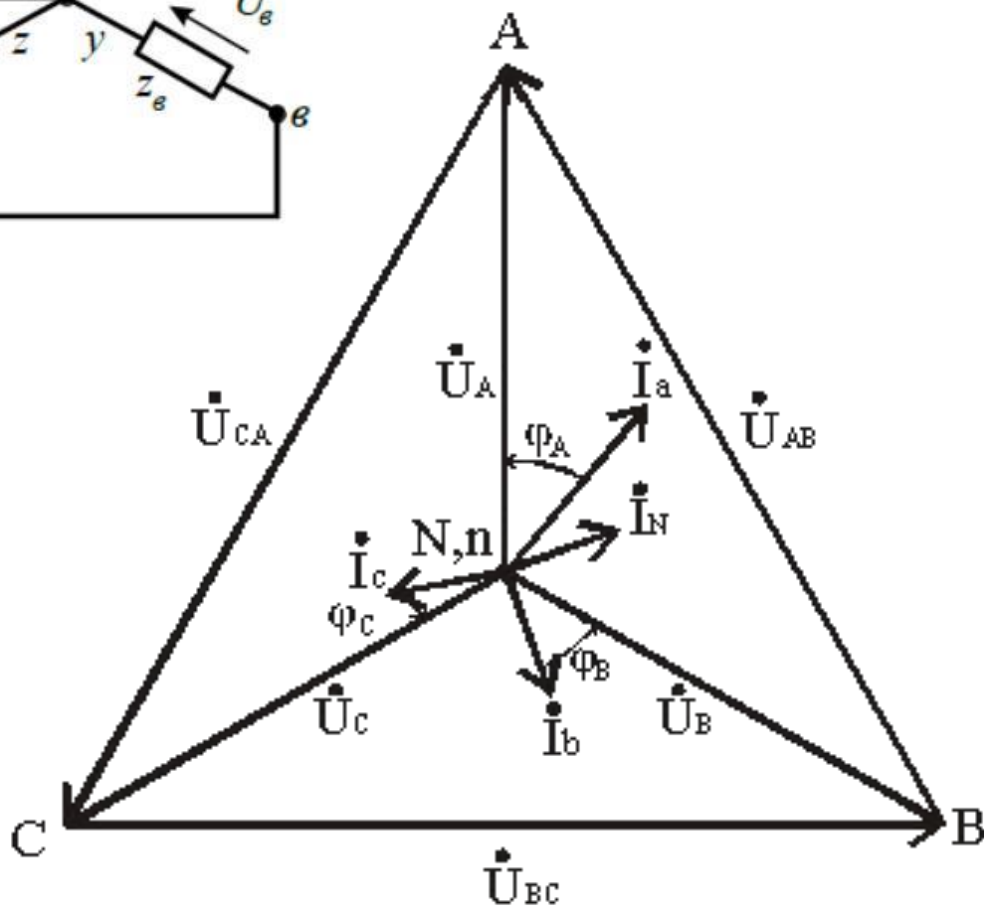


$$\dot{I}_A = \dot{E}_A / \underline{Z}_A$$

$$\dot{I}_B = \dot{E}_B / \underline{Z}_B$$

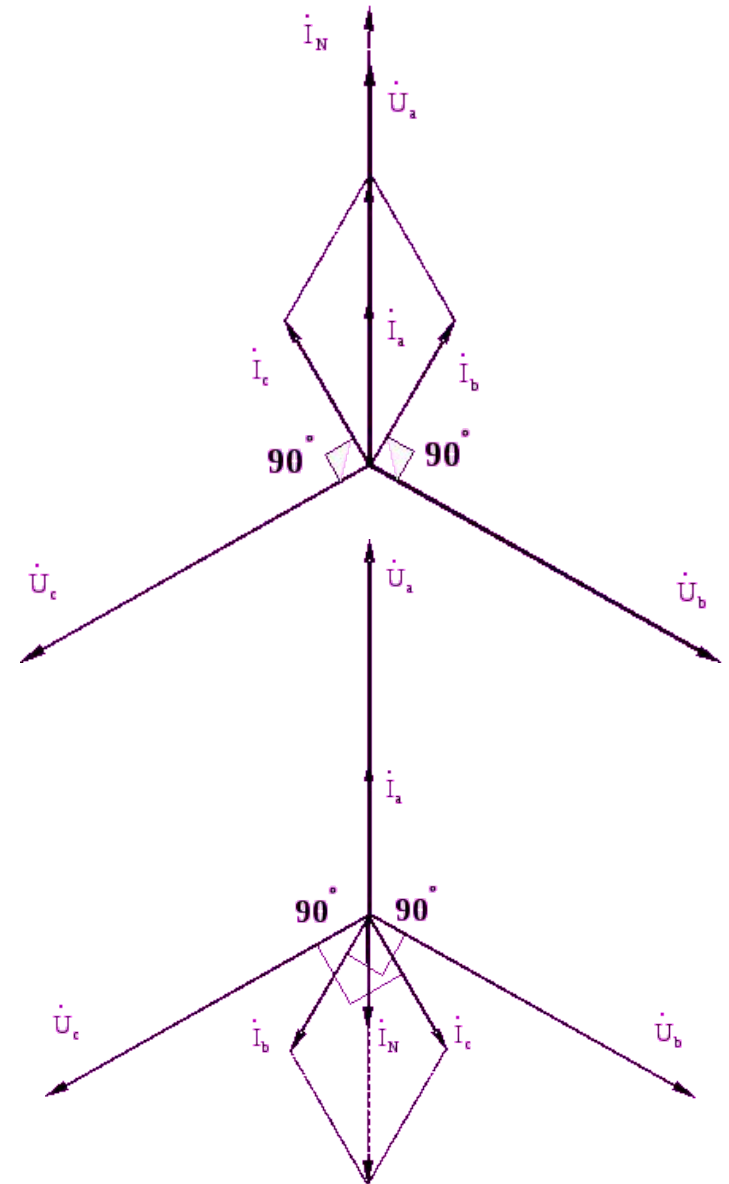
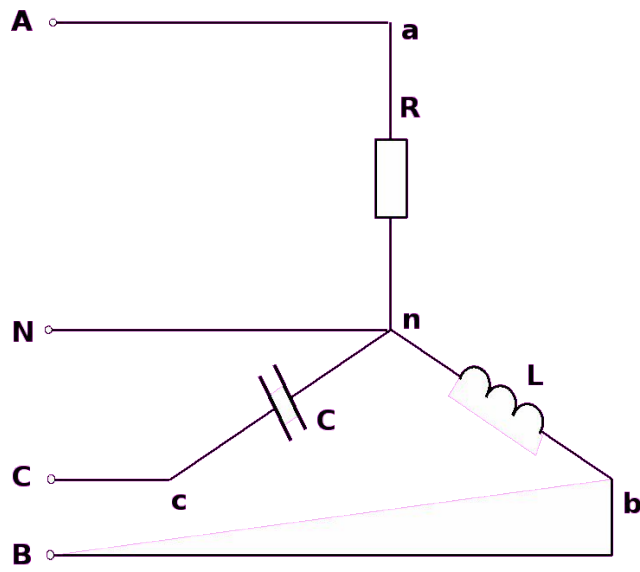
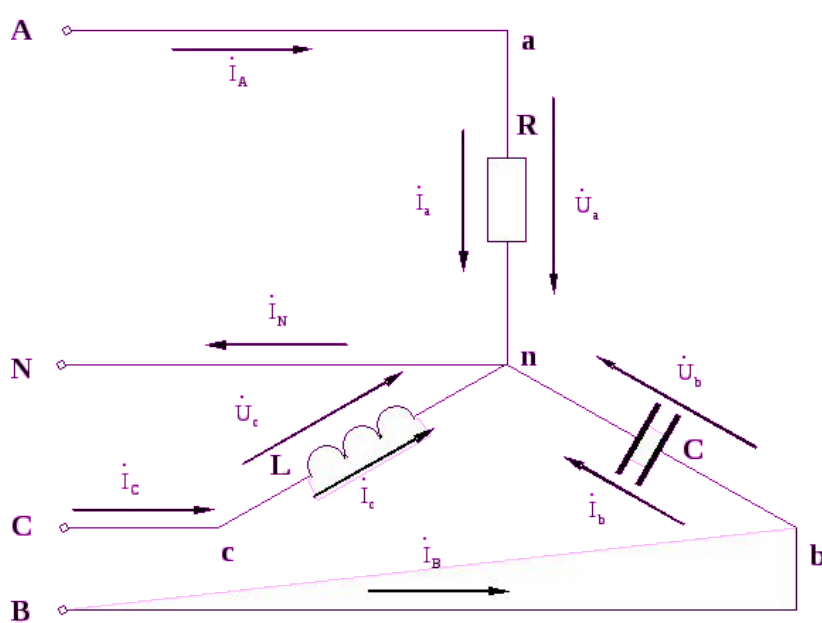
$$\dot{I}_C = \dot{E}_C / \underline{Z}_C$$

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



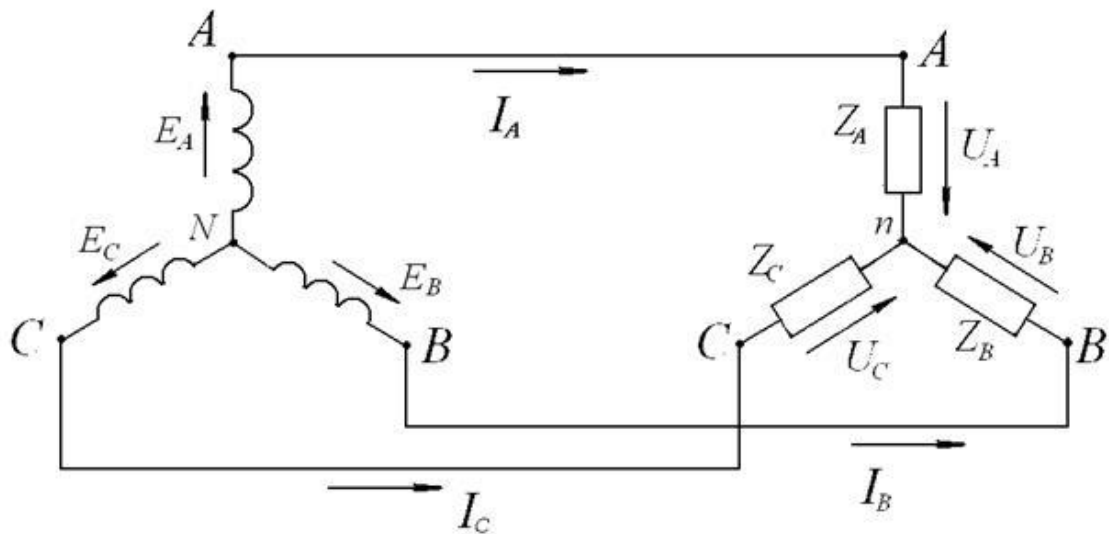
Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» с нейтральным проводом при несимметричной нагрузке



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» без нейтрального провода при симметричной нагрузке

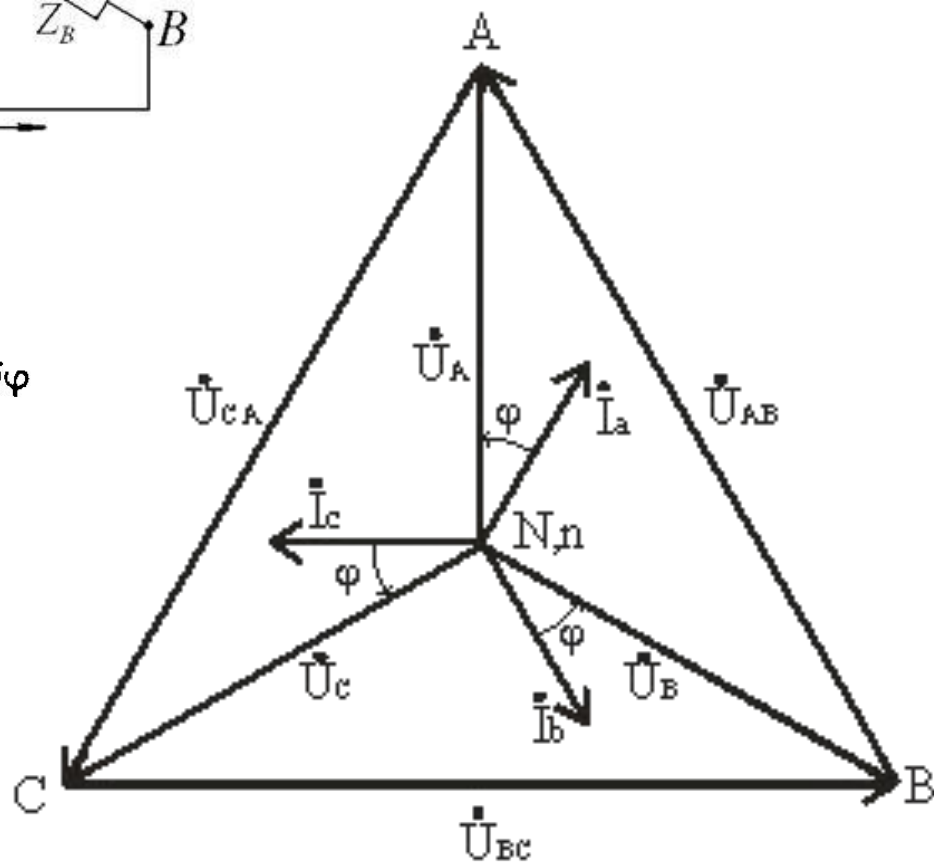


$$I_n = I_\phi = I_A = I_B = I_C$$

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{j\varphi}$$

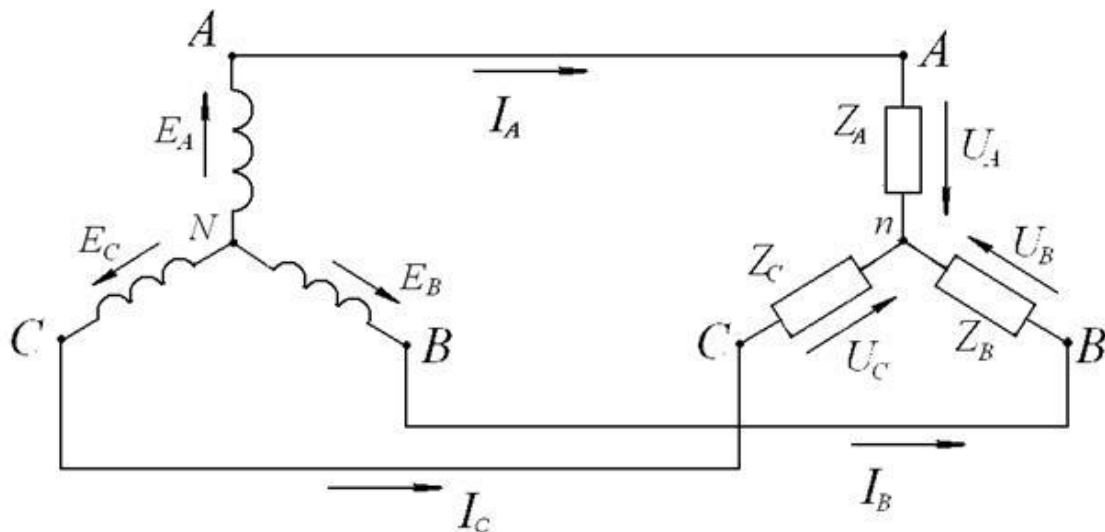
$$U_A = U_B = U_C = U_\phi$$

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A, \dot{E}_B = \dot{U}_B, \dot{E}_C = \dot{U}_C$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» без нейтрального провода при несимметричной нагрузке



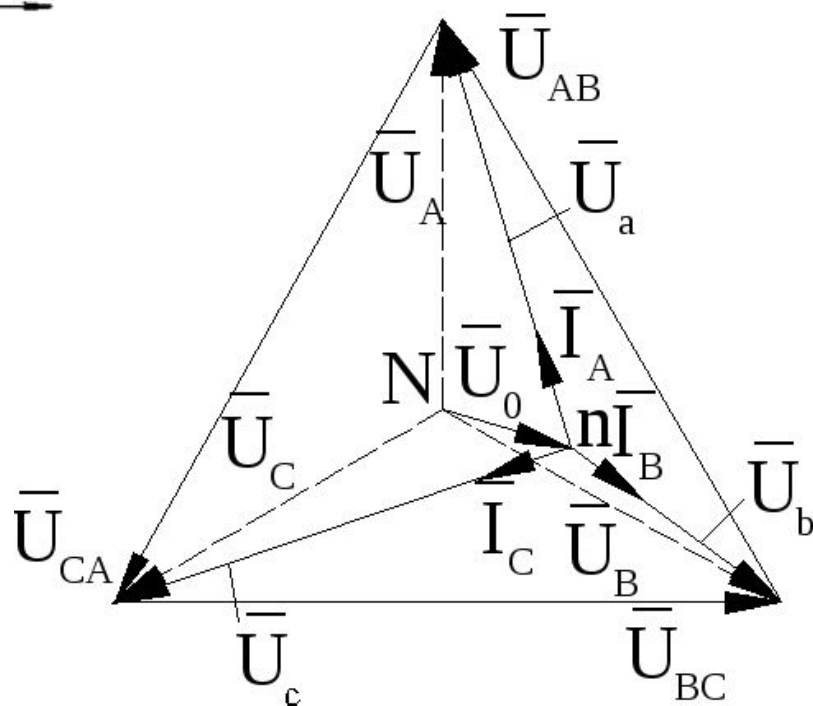
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}.$$

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_B + \underline{Y}_c \dot{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN}$$

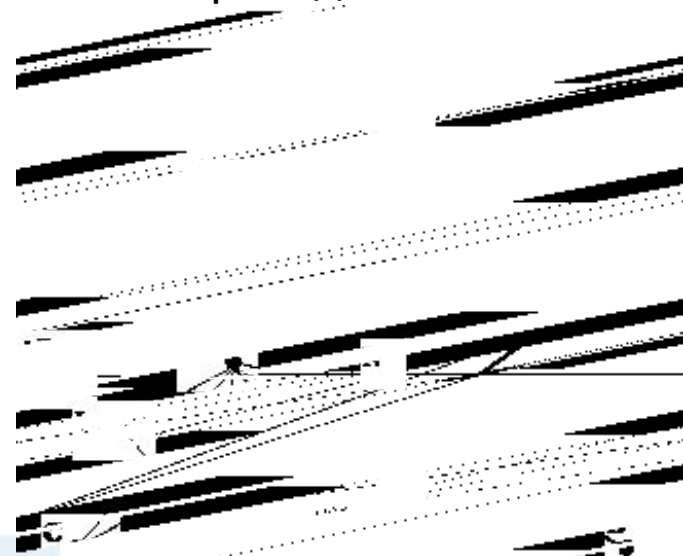
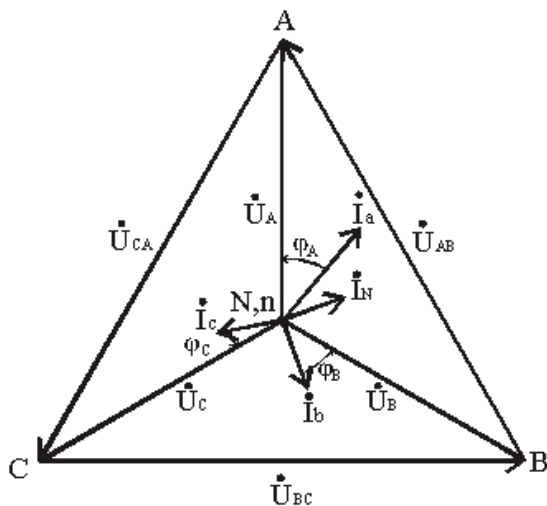
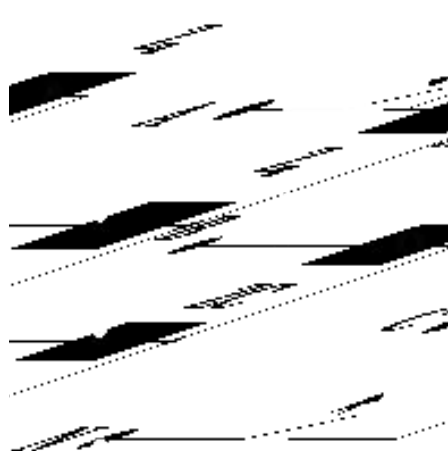
$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN}$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN}$$

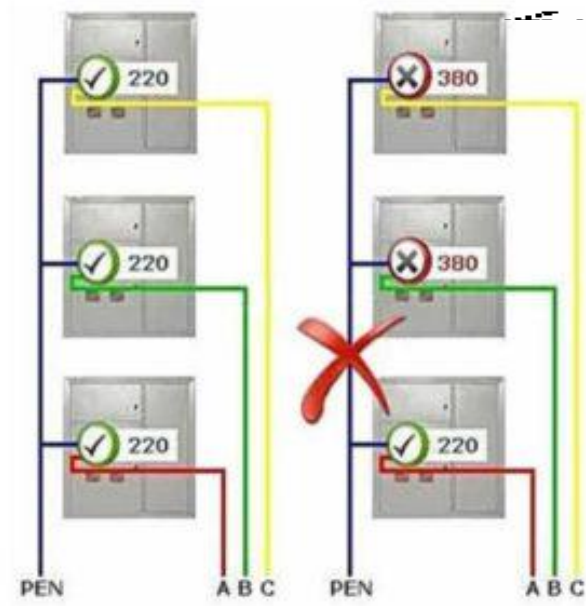
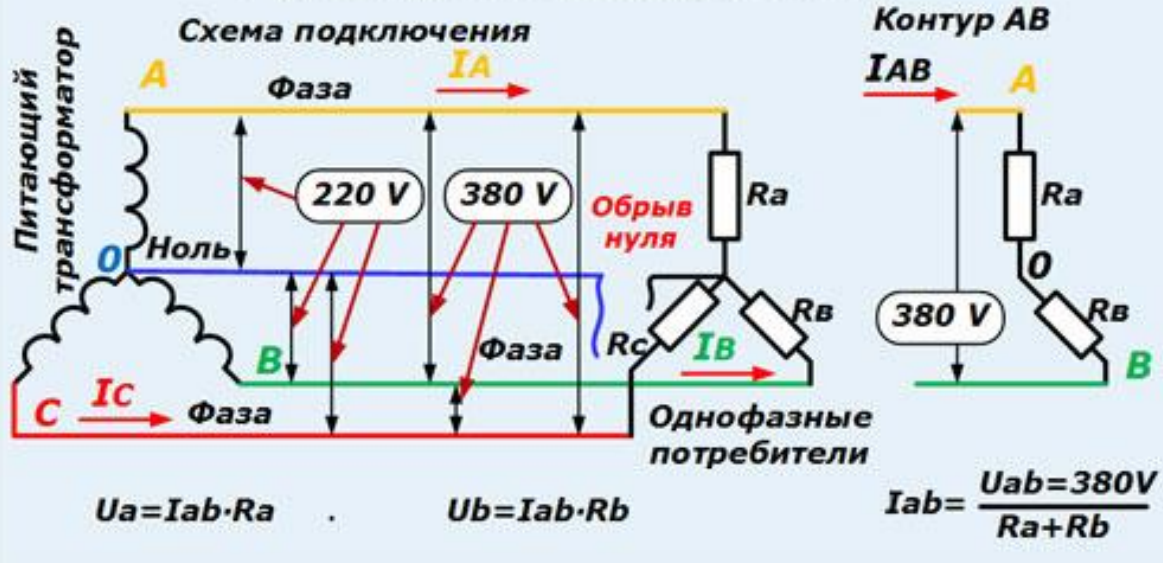


Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» обрыв нейтрального провода

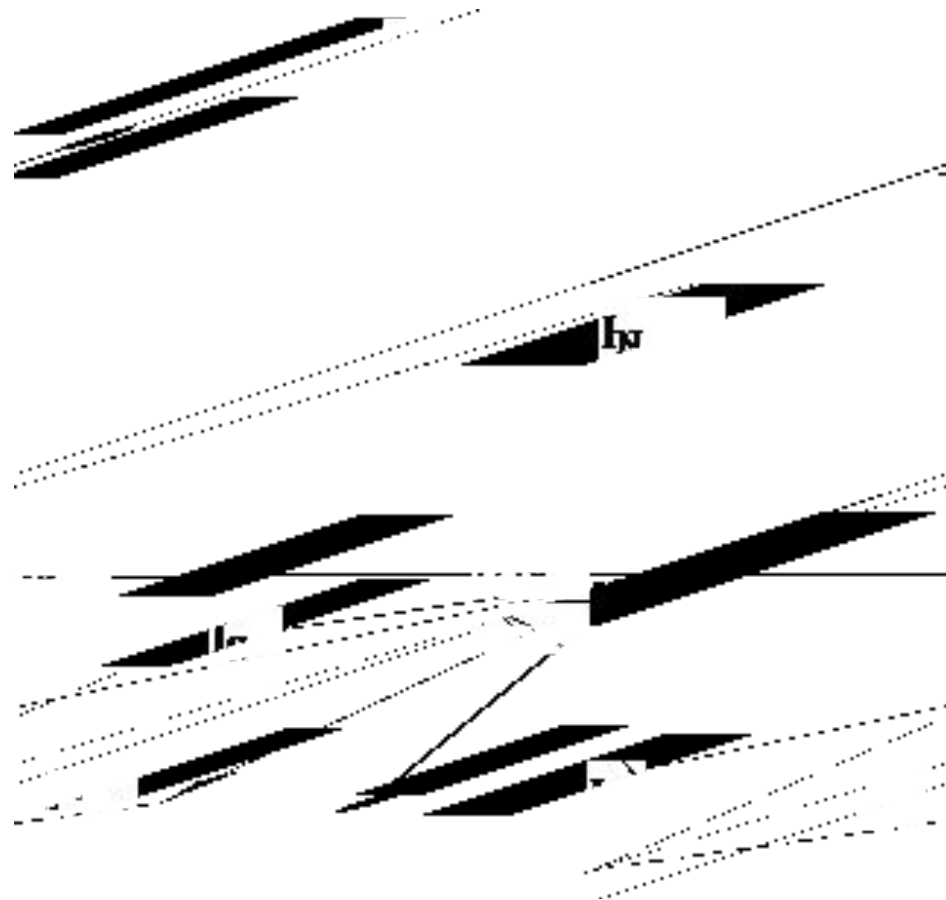
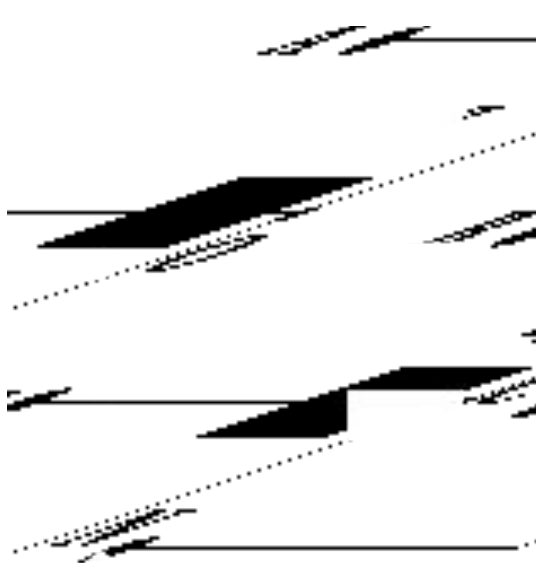


Обрыв нуля в трехфазной сети



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» обрыв линейного провода с нейтралью



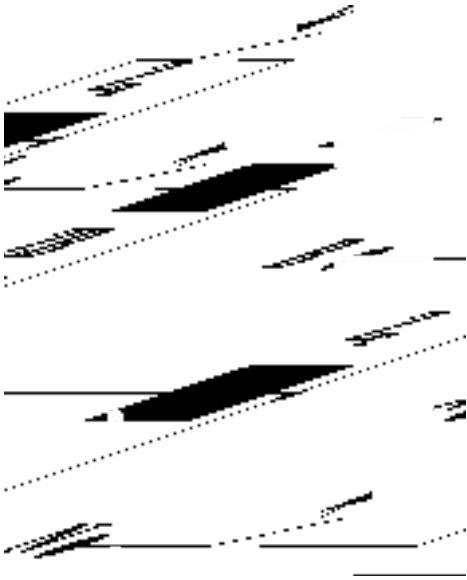
$$\underline{I}_A = 0$$

$$\underline{I}_B = G\underline{U}_b$$

$$\underline{I}_C = G\underline{U}_c \quad \underline{I}_N = \underline{I}_B + \underline{I}_C$$

Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» обрыв линейного провода без нейтрали



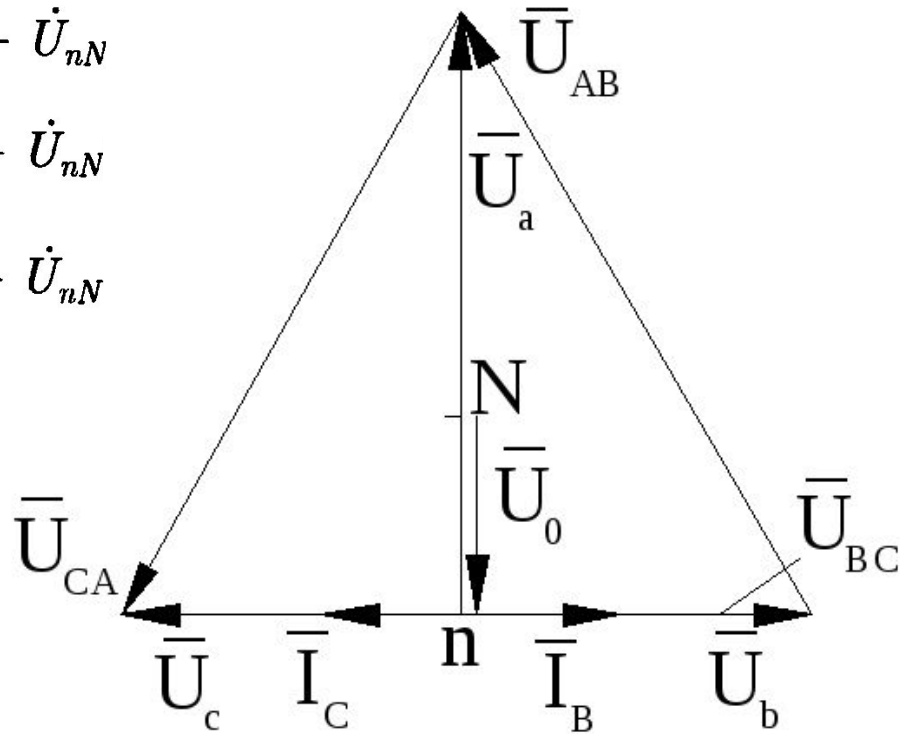
$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN}$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN}$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN}$$

$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\text{л}}$$

$$I_B = I_C = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\phi}} \quad I_A = 0$$



$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \frac{1}{Z_A} + \dot{E}_B \frac{1}{Z_B} + \dot{E}_C \frac{1}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} \quad \left. \begin{array}{l} Z_A \rightarrow \infty \\ Z_B = Z_C = r \end{array} \right\}$$

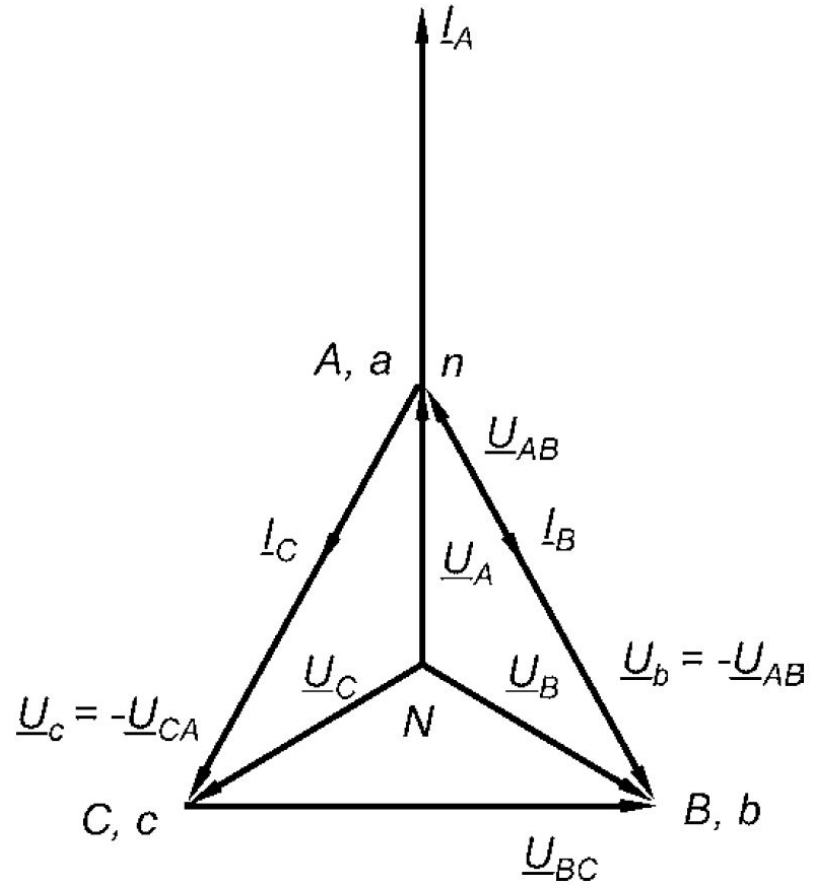
$$= \frac{\frac{1}{r} \cdot (\dot{E}_B + \dot{E}_C)}{2 \frac{1}{r}} = \frac{\dot{E}_B + \dot{E}_C}{2} = -\frac{\dot{E}_A}{2}$$

Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «звезда» КЗ в фазе без нейтрали

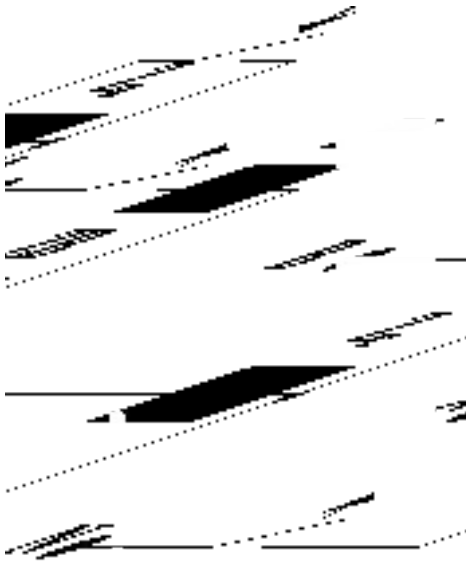
$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A + \dot{E}_B \frac{Z_A}{Z_B} + \dot{E}_C \frac{Z_A}{Z_C}}{1 + \frac{Z_A}{Z_B} + \frac{Z_A}{Z_C}} \Big|_{Z_A=0} = \dot{E}_A$$

$$\bar{I}_A = -(\bar{I}_B + \bar{I}_C) \quad U_b = U_c = U_{\text{Л}}$$



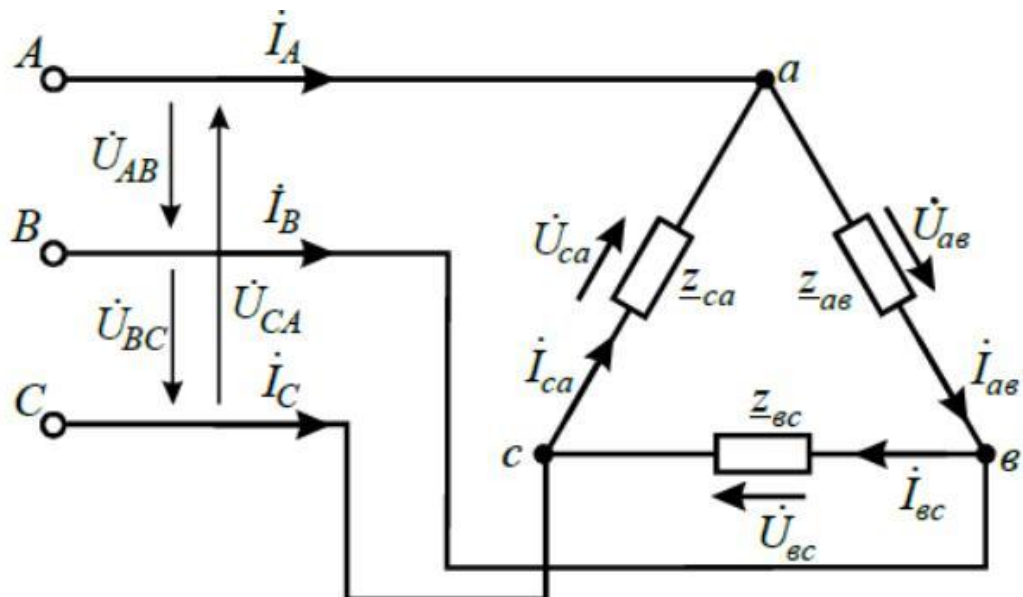
КЗ в фазе с нейтралью – авария

$$\dot{I}_a \approx \frac{\dot{E}_A}{r_a + k_N}; \dot{U}_a = 0$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «треугольник» при симметричной нагрузке



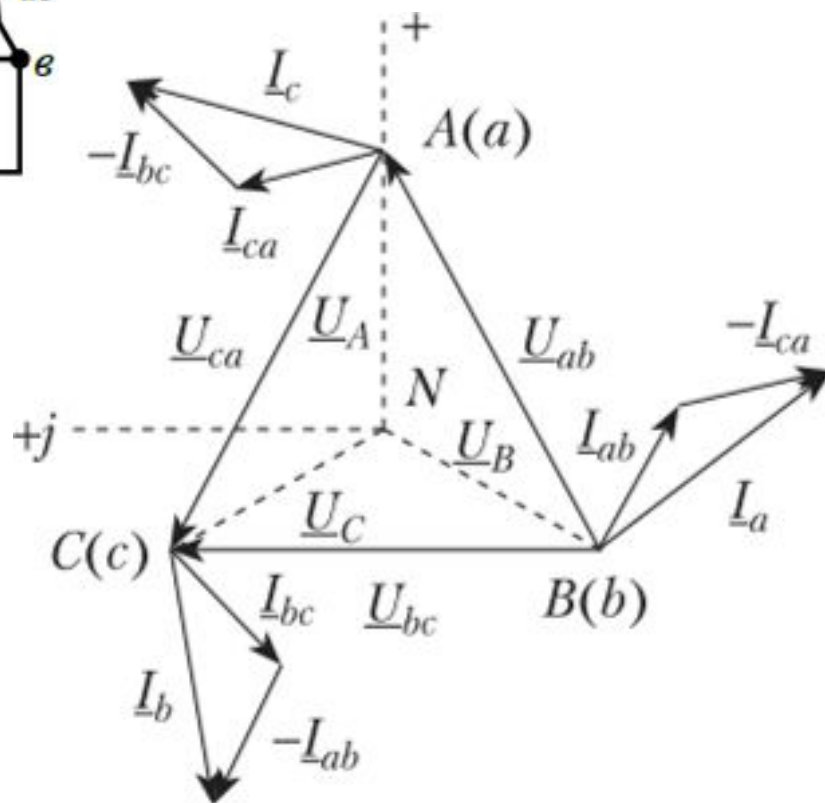
$$\dot{I}_{ae} = \frac{\dot{U}_{ae}}{Z_{ae}}; \quad \dot{I}_{ec} = \frac{\dot{U}_{ec}}{Z_{ec}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ae} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{ec} - \dot{I}_{ae} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ec} \end{aligned} \right\}$$

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

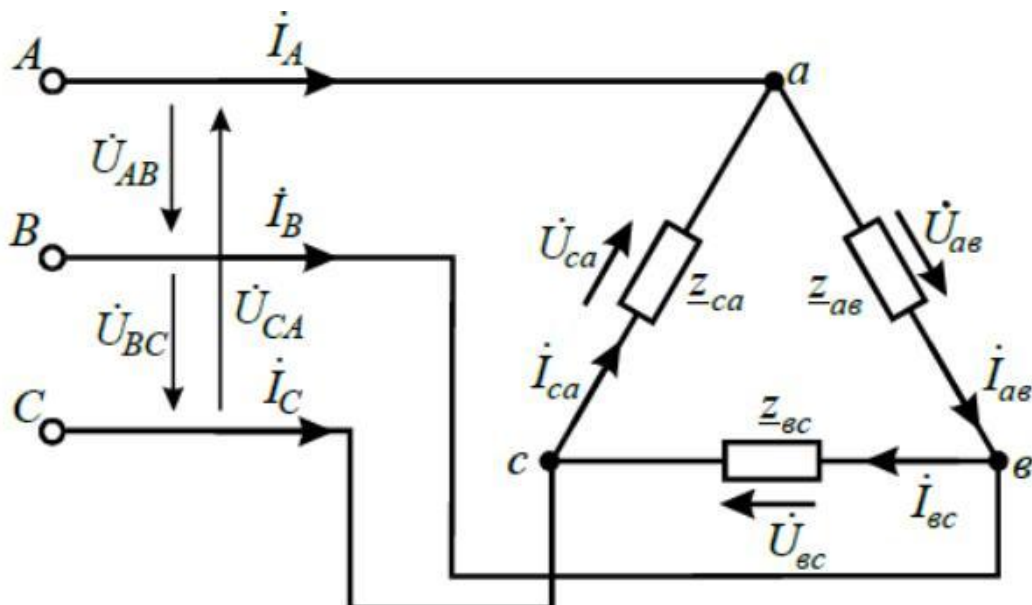
$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B$$

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



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «треугольник» при несимметричной нагрузке



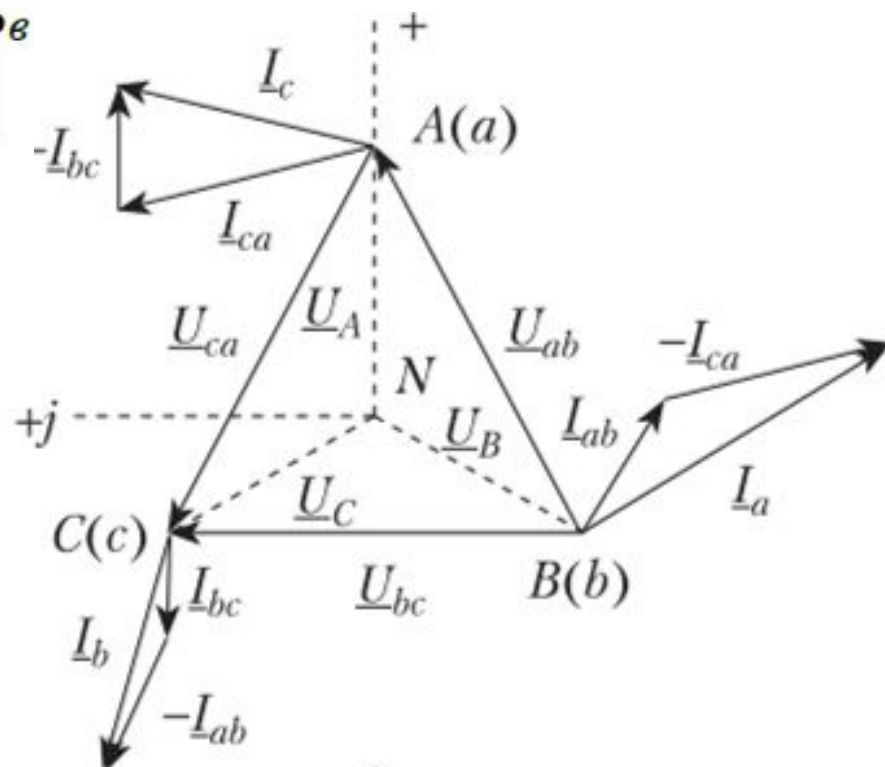
$$\dot{I}_{ae} = \frac{\dot{U}_{ae}}{Z_{ae}}; \quad \dot{I}_{sc} = \frac{\dot{U}_{sc}}{Z_{sc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ae} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{sc} - \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{cb} - \dot{I}_{bc} \end{aligned} \right\}$$

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

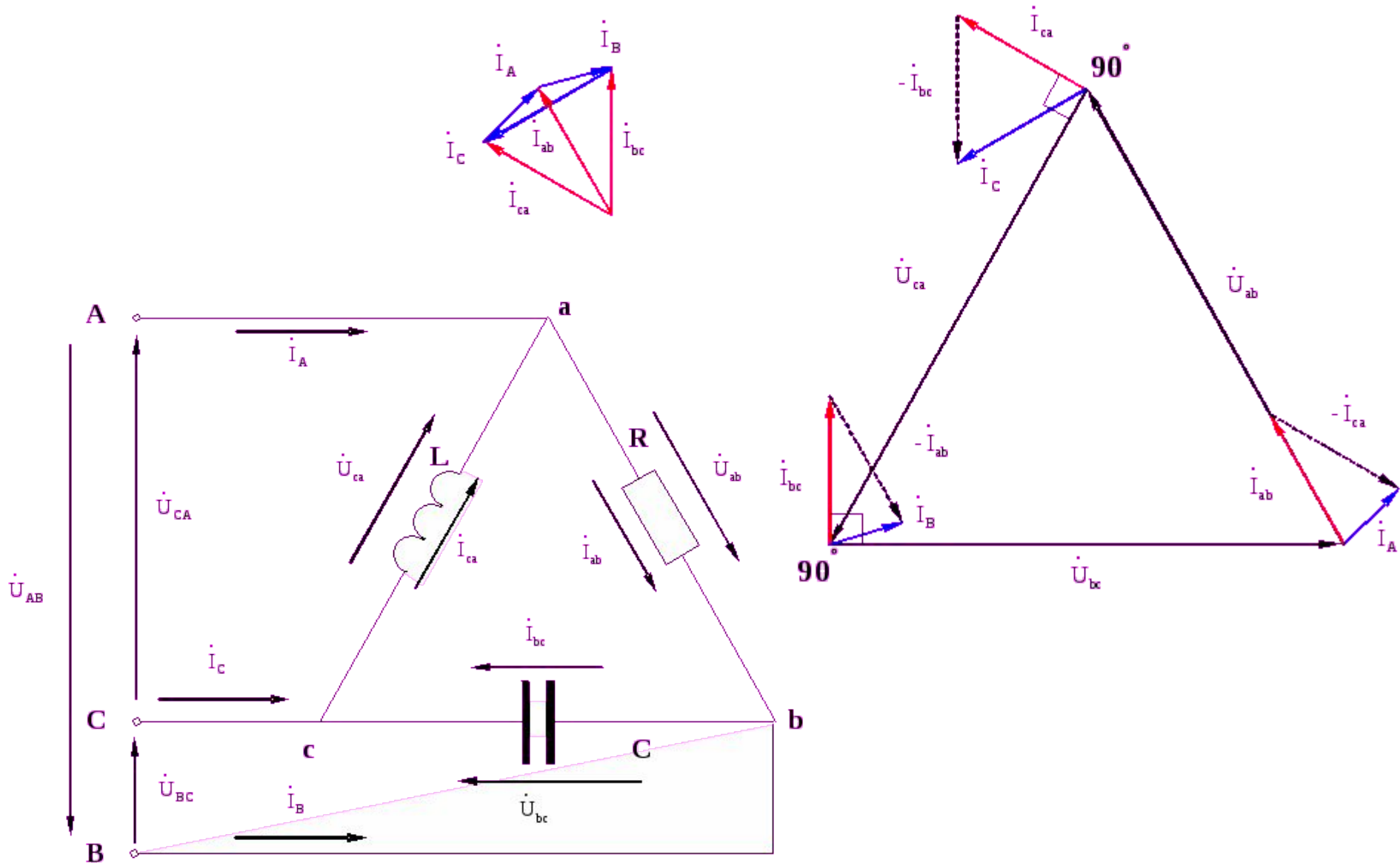
$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B$$

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



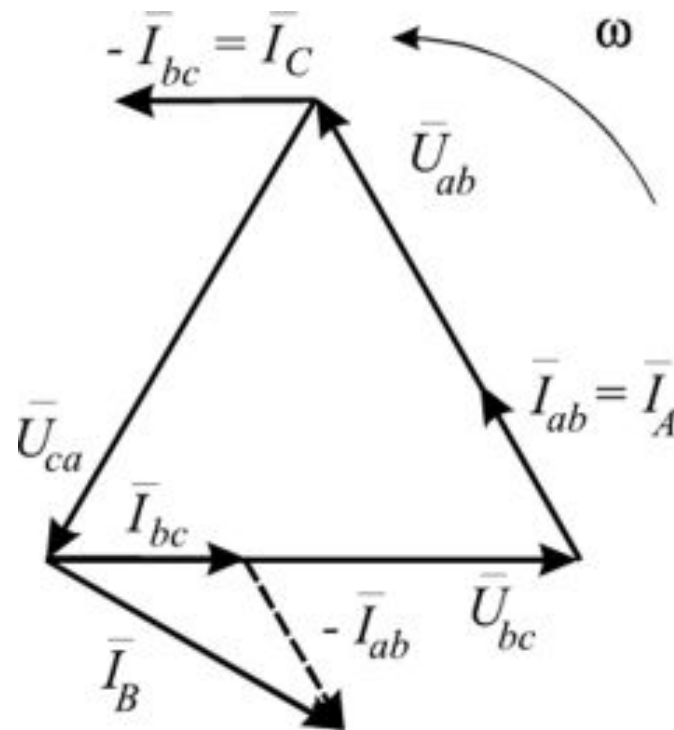
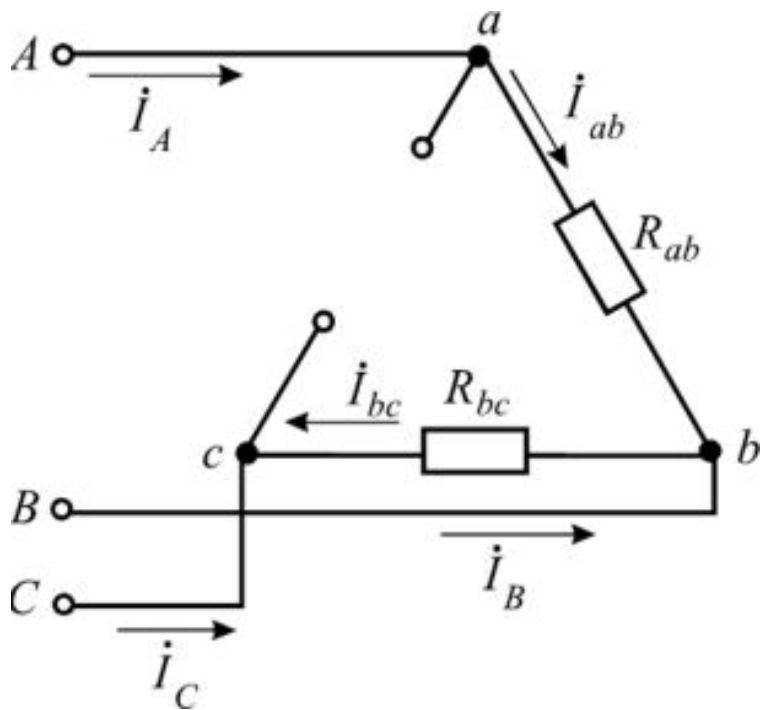
Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «треугольник» при несимметричной нагрузке



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «треугольник» при обрыве фазного провода



$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ae} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{ec} - \dot{I}_{ae} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ec} \end{aligned} \right\}$$

$$I_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_{ab}}; I_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{R_{bc}}$$

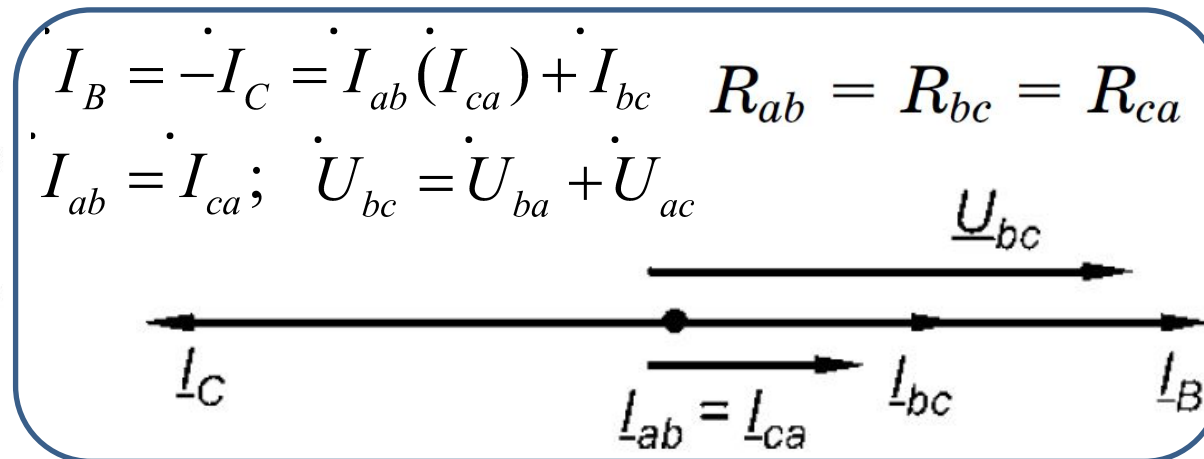
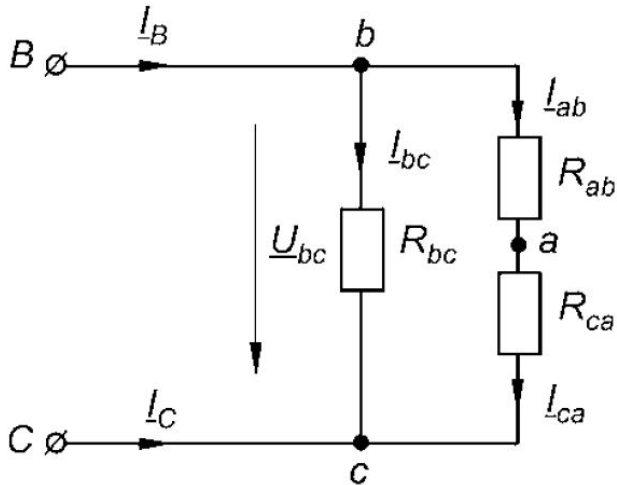
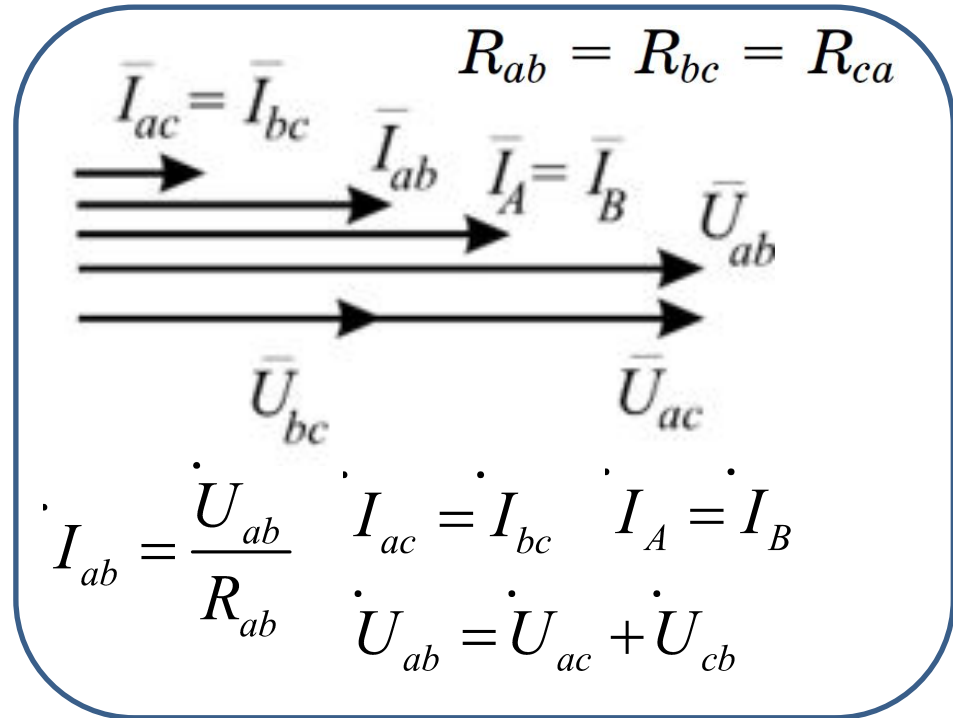
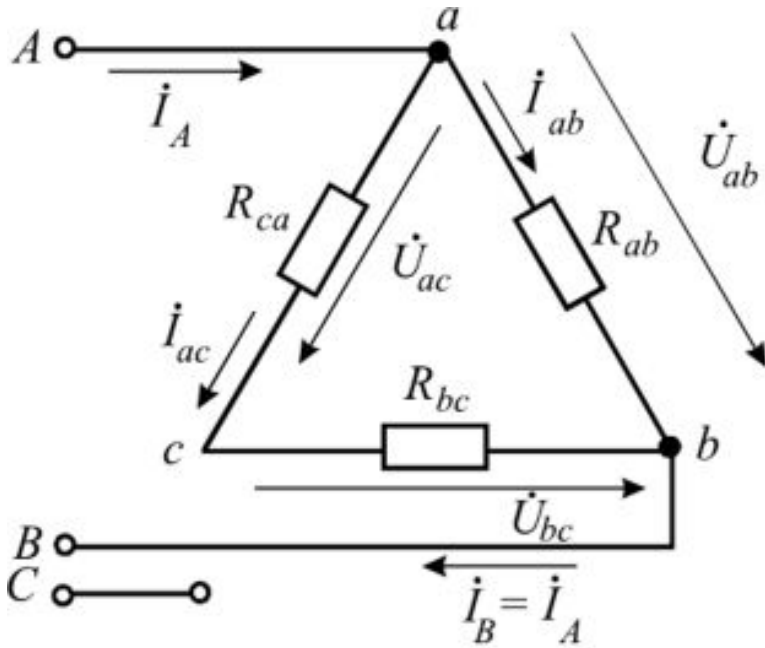
$$R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$$

$$I_{ca} = 0 \quad \underline{I}_C = -\underline{I}_{bc}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$$

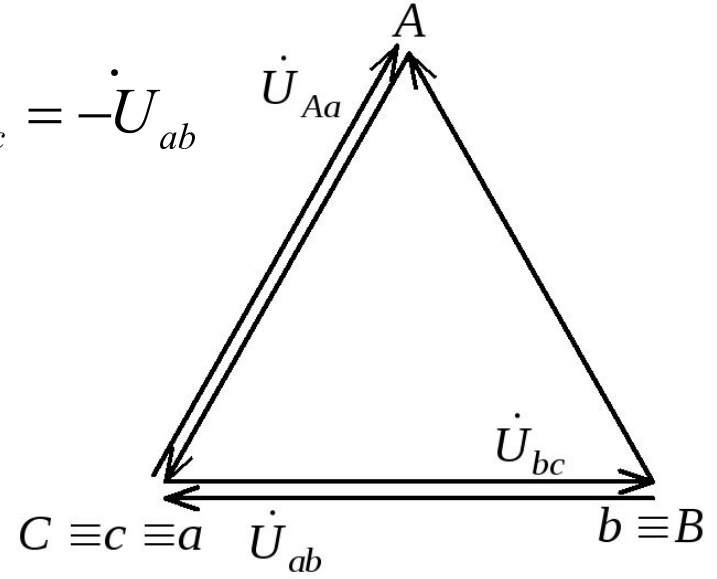
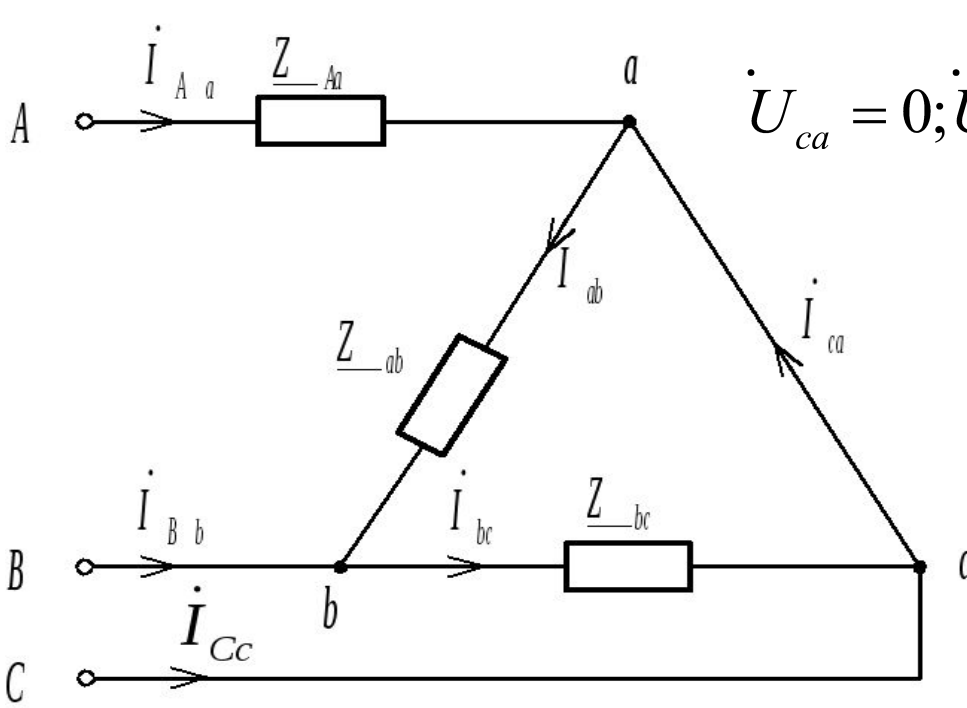
Трёхфазные цепи синусоидального тока

Соединение «треугольник» при обрыве линейного провода



Трёхфазные цепи синусоидального тока

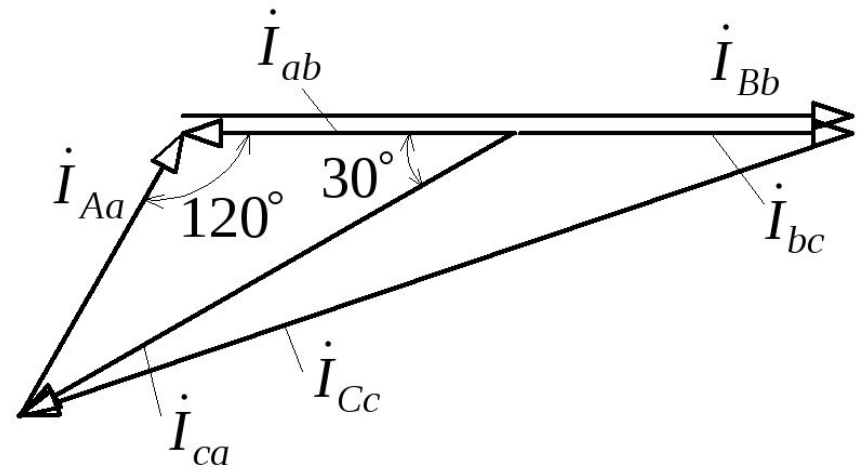
Соединение «треугольник» при КЗ в фазе



$$R_{ab} = R_{bc}$$

$$\dot{I}_{ab} = -\dot{I}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \sqrt{3}\dot{I}_{ab}$$

$$\dot{I}_{Bb} = 2\dot{I}_{bc}; \dot{I}_{Cc} = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$



Трёхфазные цепи синусоидального тока

Мощность трёхфазной цепи

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_\phi &= \underline{U}_\phi \underline{I}_\phi^* = S_\phi e^{j\varphi} = P_\phi + jQ_\phi, \\ S_\phi &= \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2}, \\ P_\phi &= U_\phi I_\phi \cos\varphi, \\ Q_\phi &= U_\phi I_\phi \sin\varphi, \end{aligned} \right\}$$

В общем случае

$$\left. \begin{aligned} \underline{S} &= \sum_{n=1}^3 \underline{S}_{\phi n} = \sum_{n=1}^3 P_{\phi n} + j \sum_{n=1}^3 Q_{\phi n} = P + jQ, \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \\ P &= \sum_{n=1}^3 P_{\phi n}, \quad Q = \sum_{n=1}^3 Q_{\phi n}. \end{aligned} \right\}$$

Симметричная нагрузка

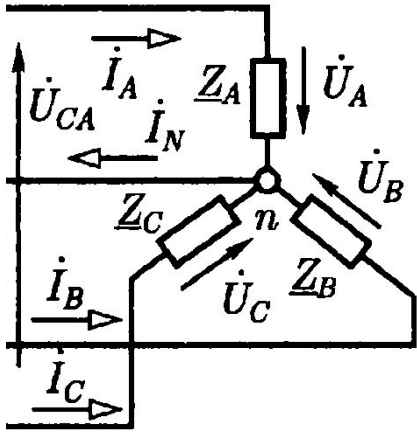
$$\left. \begin{aligned} \underline{S} &= 3\underline{S}_\phi, \quad S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}, \\ P &= 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos\varphi, \\ Q &= 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin\varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi. \end{aligned} \right\}$$

Поскольку:

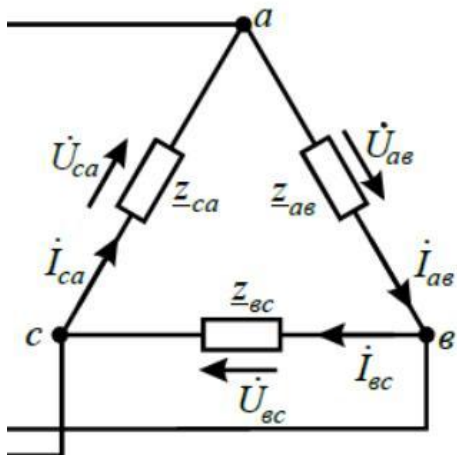
звезда $U_\phi = U_{\text{л}} / \sqrt{3}; I_\phi = I_{\text{л}}$
треугольник $U_\phi = U_{\text{л}}; I_\phi = I_{\text{л}} / \sqrt{3}$

Трёхфазные цепи синусоидального тока

Мощность звезды и треугольника



$$I_{\text{ЛY}} = I_{\text{ФY}} = \frac{U_{\text{ФY}}}{Z_{\text{Ф}}} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}Z_{\text{Ф}}}$$

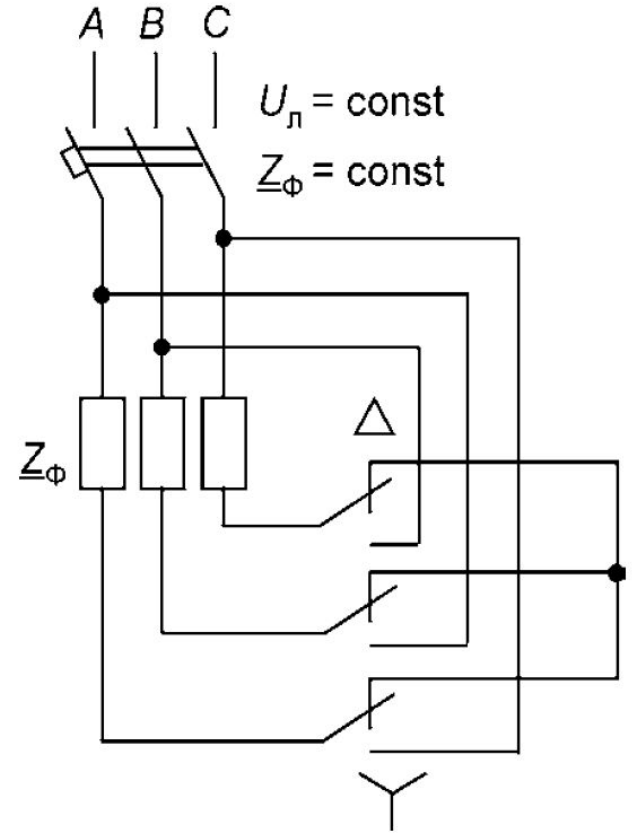


$$I_{\text{Л}\Delta} = \sqrt{3}I_{\text{Ф}\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{Ф}\Delta}}{Z_{\text{Ф}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{Л}}}{Z_{\text{Ф}}}$$

$$I_{\text{Л}\Delta} / I_{\text{ЛY}} = 3$$

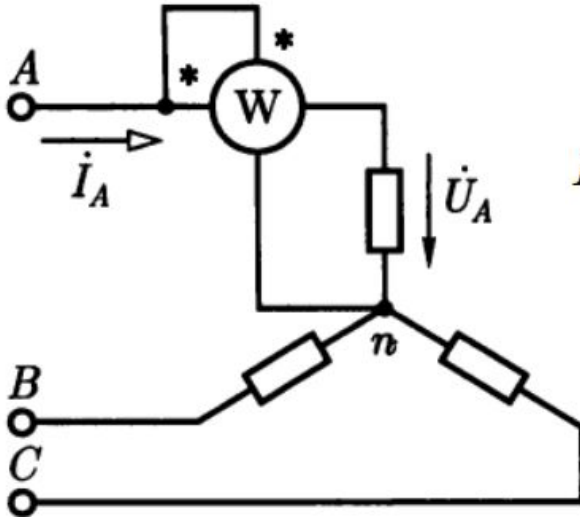
$$\frac{P_{\Delta}}{P_{Y}} = \frac{I_{\text{Л}\Delta}}{I_{\text{ЛY}}}$$

$$P_{\Delta} = 3P_{Y}$$

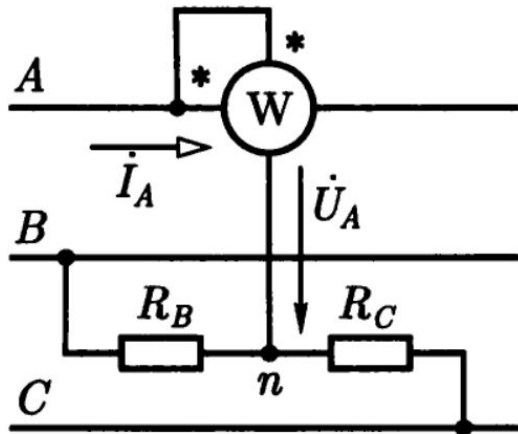
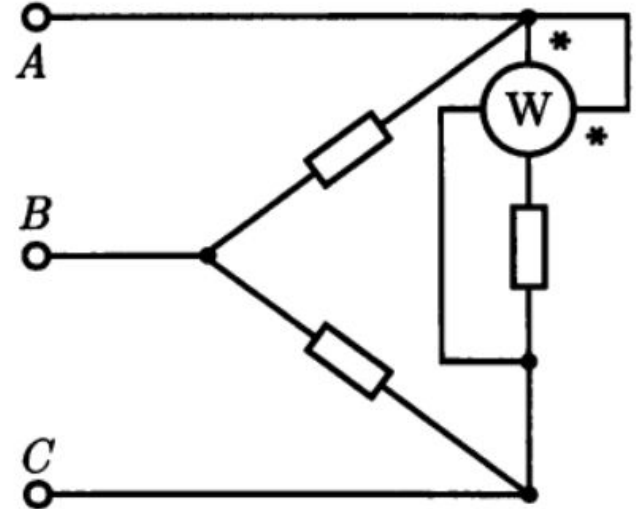


Трёхфазные цепи синусоидального тока

Способы измерения мощности одним ваттметром



$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi$$

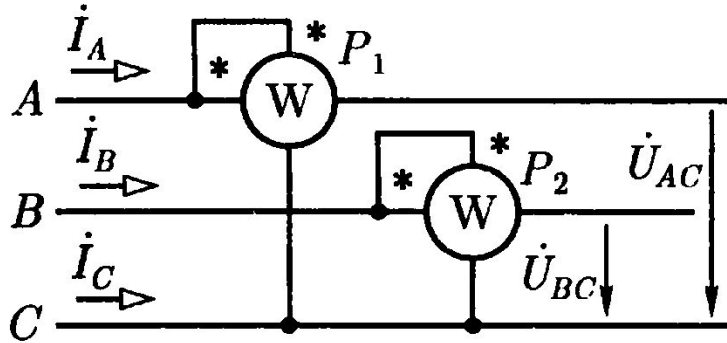


Искусственная нейтральная точка

$$R_B = R_C = R$$

Трёхфазные цепи синусоидального тока

Способы измерения мощности двумя, тремя ваттметрами



$$p = u_{AC}i_A + u_{BC}i_B$$

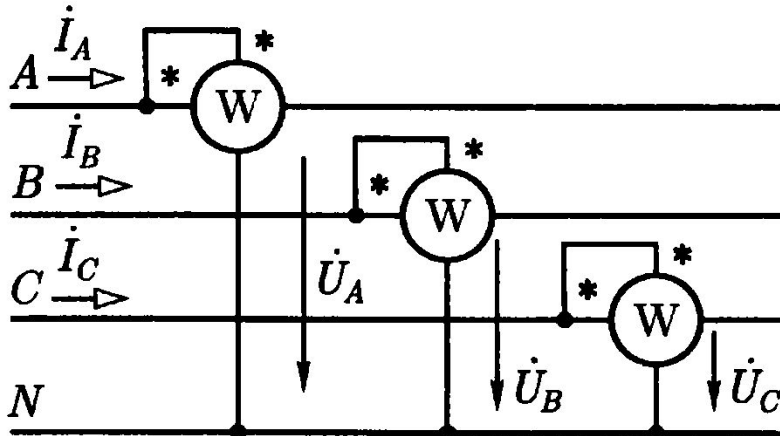
$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

$$i_C = -(i_A + i_B)$$

$$p = (u_A - u_C)i_A + (u_B - u_C)i_B$$

$$u_A - u_C = u_{AC}, \quad u_B - u_C = u_{BC}$$

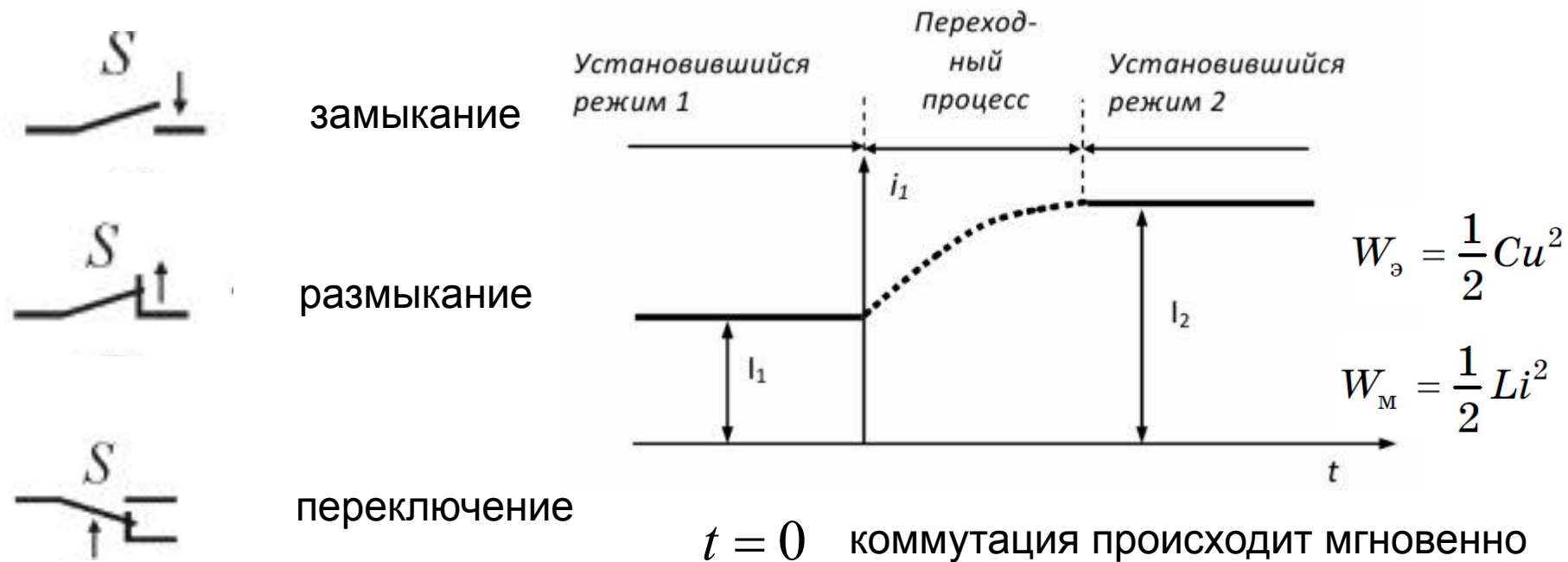
$$P = P_1 + P_2 = U_{CA}I_A \cos(\psi_u - \psi_i) + U_{BC}I_B \cos(\psi_u - \psi_i)$$



$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

Переходные процессы в электрических цепях

Понятие о ПП. 3-ны коммутации. Начальные условия. Методы расчета.



Процессы, возникающие в цепях при переходе от одного установившегося режима к другому, называются переходными.

Переходные процессы возникают при всяком внезапном изменении параметров цепи.

$t = 0_-$ время непосредственно до коммутации

$t = 0_+$ время непосредственно после коммутации

Переходные процессы в электрических цепях

Понятие о ПП. З-ны коммутации. Начальные условия. Методы расчета.

Первый закон:

Значения тока на индуктивности до и сразу после коммутации равны

$$i_L(t_-) = i_L(t_+)$$

или

Ток на индуктивности при коммутации не может измениться скачком

$$\frac{\Delta W_L}{\Delta t} = \frac{L}{2} \frac{i_L^2(t_2) - i_L^2(t_1)}{t_2 - t_1} \left[\begin{array}{l} i_L^2(t_2) \neq i_L^2(t_1) \\ t_2 - t_1 = 0 \end{array} \right] \boxtimes \Delta W \rightarrow \infty \quad u_L = L \frac{di}{dt} [dt = 0] \rightarrow \infty$$

Второй закон:

Значения напряжения на емкости до и сразу после коммутации равны

$$u_C(t_-) = u_C(t_+)$$

или

Напряжение на емкости при коммутации не может измениться скачком

$$\frac{\Delta W_C}{\Delta t} = \frac{C}{2} \frac{u_C^2(t_2) - u_C^2(t_1)}{t_2 - t_1} \left[\begin{array}{l} u_C^2(t_2) \neq u_C^2(t_1) \\ t_2 - t_1 = 0 \end{array} \right] \boxtimes \Delta W \rightarrow \infty \quad i_C = C \frac{du}{dt} [dt = 0] \rightarrow \infty$$

Переходные процессы в электрических цепях

Понятие о ПП. З-ны коммутации. Начальные условия. Методы расчета.

Начальные условия – значения токов и напряжений на элементах цепи при $t = 0$

при $t = 0_-$ - докоммутационные начальные условия

$t = 0_+$ - послекоммутационные начальные условия

Независимые начальные условия :

$$i_L(t_-) \quad u_C(t_-)$$

Зависимые начальные условия : остальные токи и напряжения при $t = 0_+$

Ненулевые начальные условия :

$$i_L(t_-) \neq 0 \quad u_C(t_-) \neq 0$$

Нулевые начальные условия : $i_L(t_-) = 0 \quad u_C(t_-) = 0$

Переходные процессы в электрических цепях

Понятие о ПП. З-ны коммутации. Начальные условия. Методы расчета.

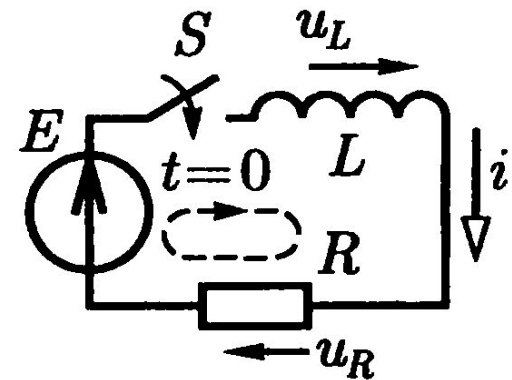
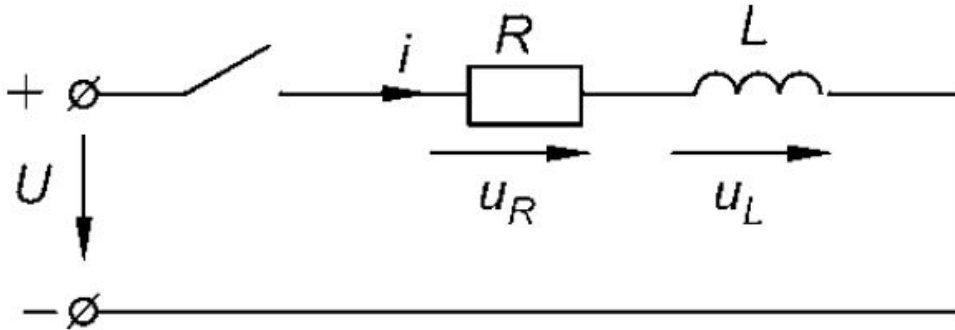
Классический метод расчета

- Найти независимые начальные условия: напряжения на ёмкостях и токи на индуктивностях в момент начала переходного процесса.
- Составить систему уравнений на основе законов Кирхгофа, Ома, электромагнитной индукции и т.д., описывающих состояние цепи после коммутации, и исключением переменных получить одно дифференциальное уравнение, в котором в качестве искомой величины выбирают либо ток в индуктивном элементе, либо напряжение на емкостном
- Составить общее решение полученного уравнения в виде суммы частного решения и общего решения
$$i = i_Y + i_{CB}; u = u_Y + u_{CB} \quad i = i' + i''; u = u' + u''$$
$$i = i_{ПП} + i_{CB}; u = u_{ПП} + u_{CB}$$
- В общем решении найти постоянные интегрирования из начальных условий, т. е. условий в цепи в начальный момент времени после коммутации.

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и L при включении на источник



1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U$$

$$u_L + u_R = E; \quad u_L = L di/dt; \quad u_R = Ri$$

$$L di/dt + Ri = E.$$

2. Находим решение неоднородного диф. ур-я

$$i' = I = U/R$$

частное решение

$$L \frac{di''}{dt} + Ri'' = 0$$

общее решение
однородного

$$i_y = E/R$$

частное решение

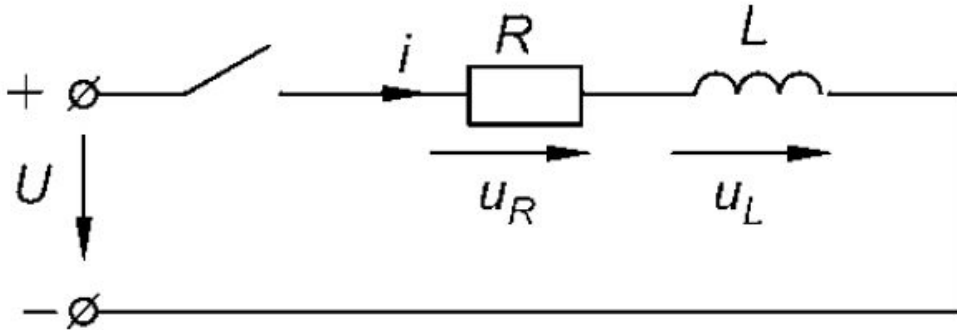
$$L di/dt + Ri = 0$$

общее решение
однородного

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и L при включении на источник



общее решение
однородного

$$L \frac{di''}{dt} + Ri'' = 0$$

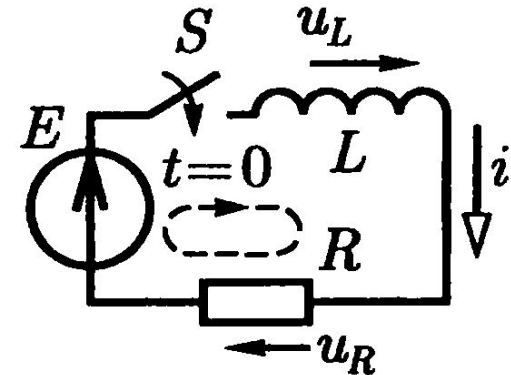
$$i'' = Ae^{pt}$$

$$Lp + R = 0$$

$$p = -R/L$$

общее решение неоднородного

$$i = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}$$



общее решение
однородного

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0$$

$$i_{св} = Ae^{pt}$$

$p = -R/L$ корень характер. ур-я

$$Lp + R = 0$$

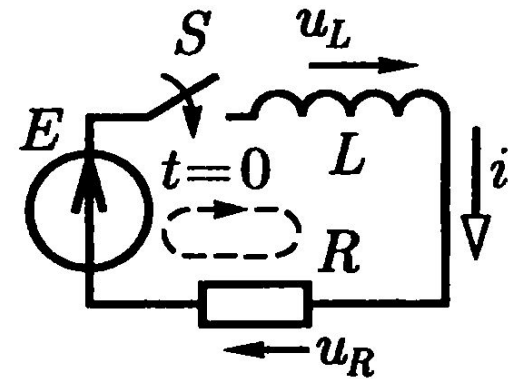
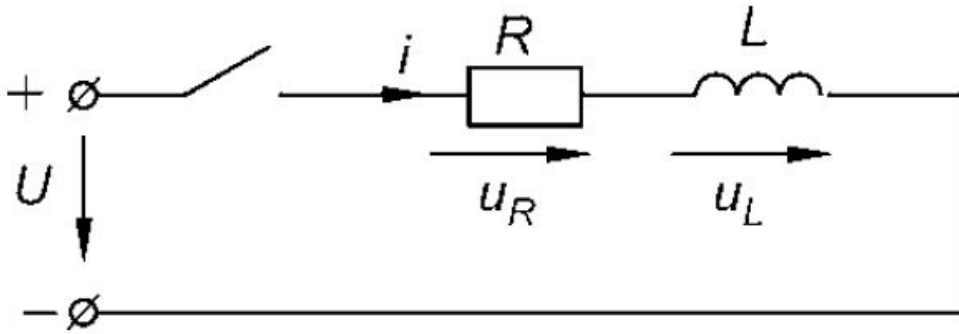
общее решение неоднородного

$$i = i_y + i_{св} = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и L при включении на источник



3. Определяется постоянная интегрирования A, согласно законам коммутации

$$A = -U/R$$

$$i = I(1 - e^{-t/\tau}) = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = L/R \quad \text{постоянная времени цепи}$$

$$t = 0$$

$$i(0_-) = 0 = i(0_+) = E/R + A$$

$$A = -E/R$$

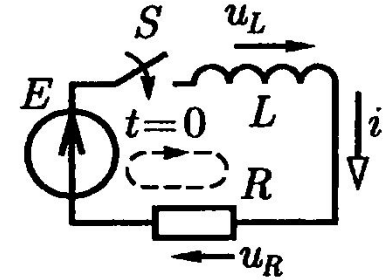
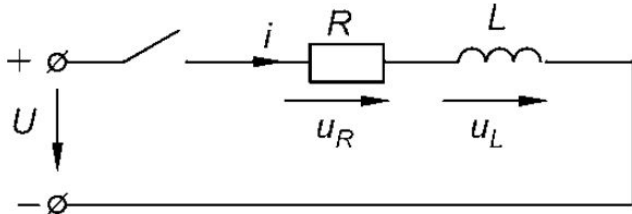
$$i = i_y + i_{св} = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i = \frac{E}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad \tau = L/R$$

Переходные процессы в электрических цепях

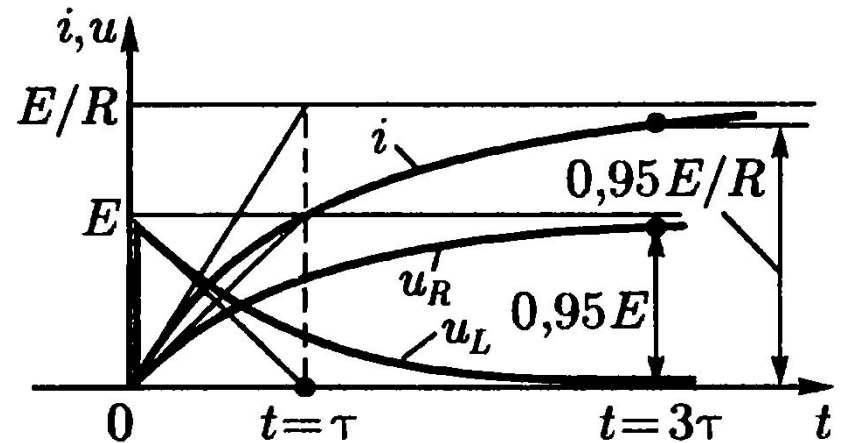
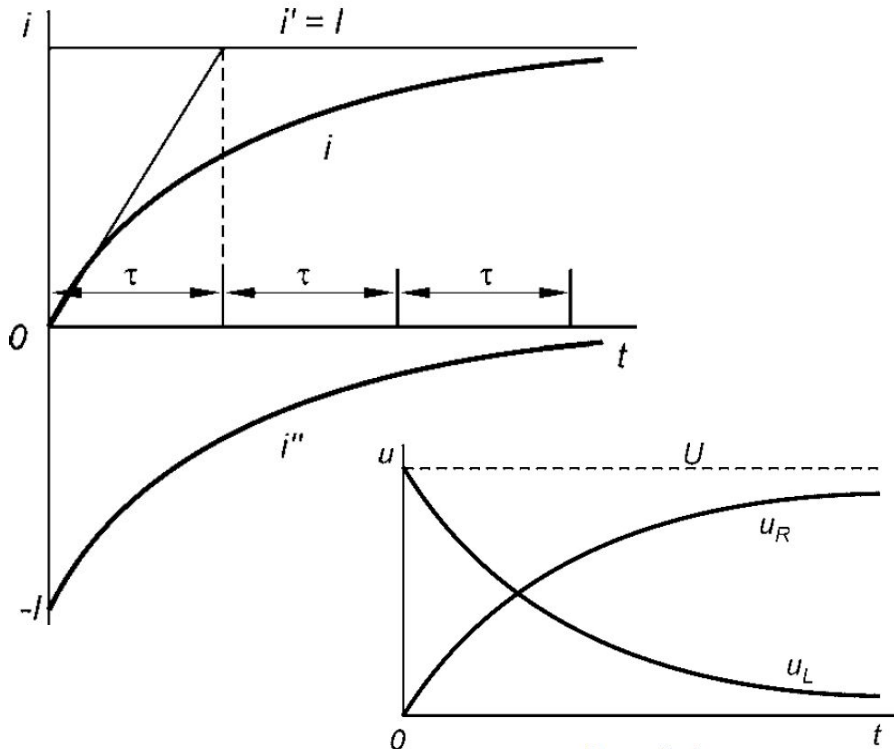
Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и L при включении на источник



$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{I}{\tau} e^{-t/\tau} = L \frac{IR}{L} e^{-t/\tau} = U e^{-t/\tau}$$

$$u_R = Ri = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad u_L = L \frac{di}{dt} = E e^{-t/\tau}$$

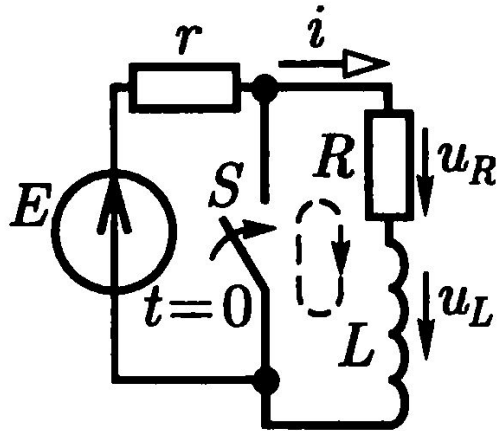


$i(3\tau) = 0,95 E/R$ переходный процесс практически завершен

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и L при закорачивании катушки



1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи

$$u_L + u_R = L di/dt + Ri = 0$$

2. Находим только общее решение однородного диф. ур-я

$$i = i_{CB} = Ae^{-t/\tau}$$

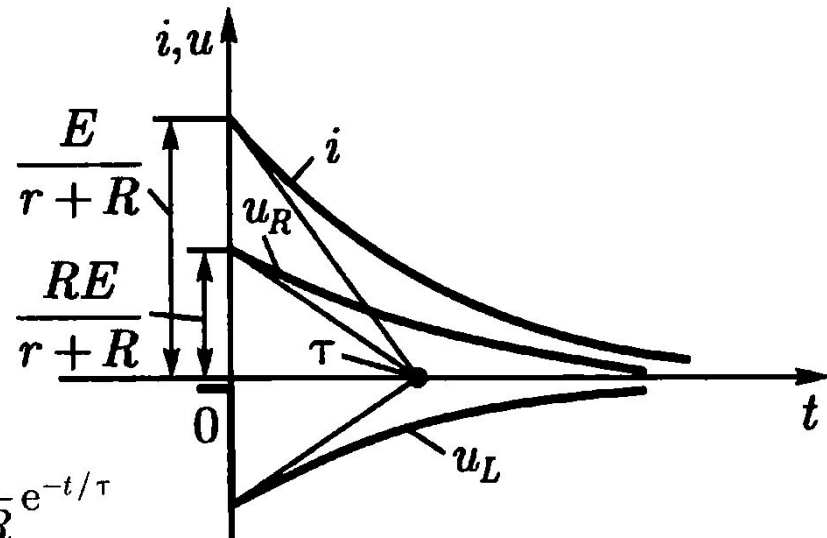
3. Определяется постоянная интегрирования A поскольку до комм. в цепи был постоянный ток

$$i(0_-) = E/(r + R) = i(0_+) = A$$

$$i = \frac{E}{r + R} e^{-t/\tau}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -\frac{RE}{r + R} e^{-t/\tau}$$

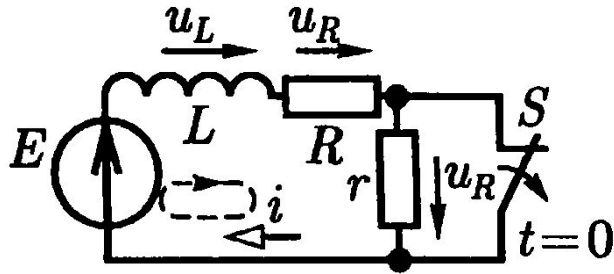
$$u_R = Ri = \frac{RE}{r + R} e^{-t/\tau}$$



Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и L при размыкании



1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи

$$u_L + u_R + u_r = L di/dt + (r + R)i = E$$

2. Находим решение неоднородного диф. ур-я

$$i = i_y + i_{св} = \frac{E}{r + R} + A e^{-\frac{r+R}{L}t}$$

$i_y = E/(r + R)$ установившийся ток цепи

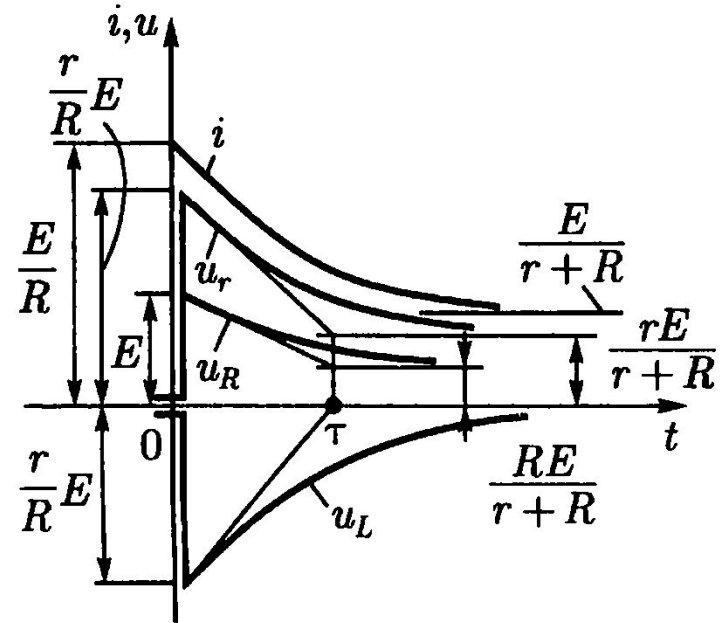
3. Находим постоянную интегрирования A

поскольку до комм. в катушке был постоянный ток

$$i(0_-) = E/R = i(0_+) = E/(r + R) + A$$

$$A = E/R - E/(r + R) = rE/R(r + R)$$

$$i = \frac{E}{r + R} \left(1 + \frac{r}{R} e^{-t/\tau} \right) \quad \tau = L/(r + R)$$



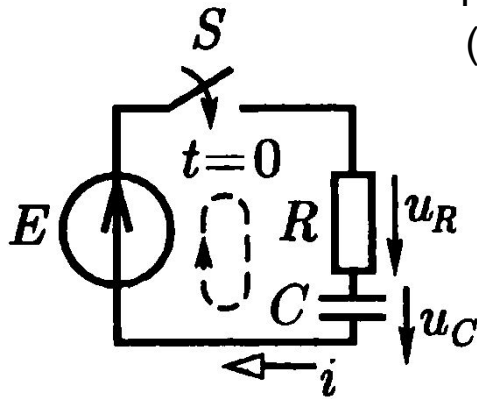
$$u_r = ri = \frac{rE}{r + R} \left(1 + \frac{r}{R} e^{-t/\tau} \right) \quad u_R = Ri = \frac{RE}{r + R} \left(1 + \frac{r}{R} e^{-t/\tau} \right) \quad u_L = -\frac{r}{R} E e^{-t/\tau}$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и C при включении на источник

1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи (выражаем через напряжение на емкости)

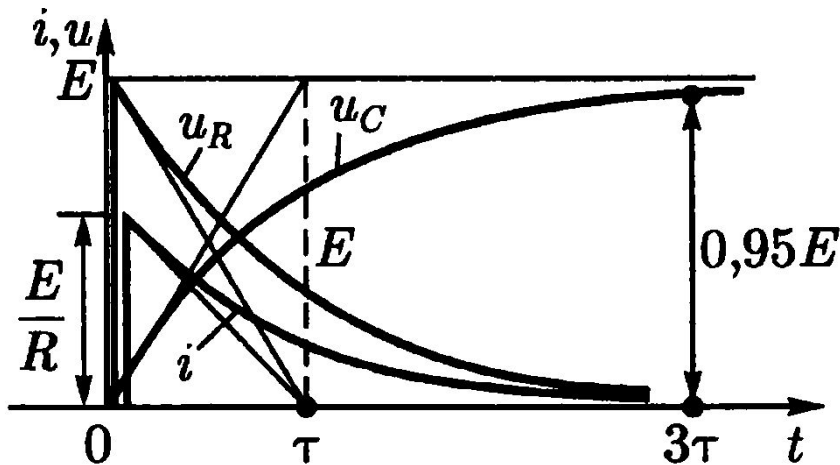


$$u_R + u_C = Ri + u_C = RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E$$

2. Находим решение неоднородного диф. ур-я

$$u_C = u_{Cy} + u_{Cсв} \quad u_{Cy} = E \quad u_{Cсв} = Ae^{pt}$$

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad RCp + 1 = 0 \quad p = -1/RC$$



$$u_C = u_{Cy} + u_{Cсв} = E + Ae^{-t/RC}$$

3. Находим постоянную интегрирования A

$$u_C(0_-) = 0 = u_C(0_+) = E + A \quad A = -E$$

$$u_C = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad \tau = RC$$

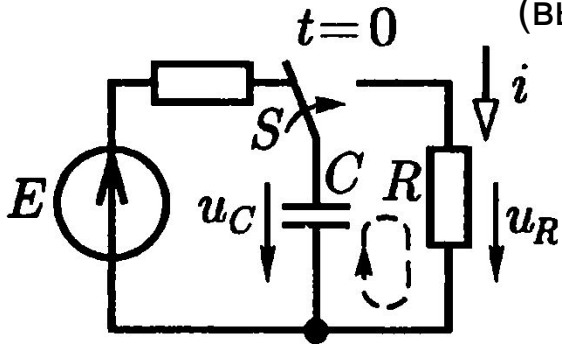
$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}; \quad u_R = Ri = Ee^{-t/\tau}$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R и C при шунтировании C

1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи (выражаем через напряжение на емкости)



$$u_R - u_C = Ri - u_C = RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

2. Находим решение однородного диф. ур-я

$$u_C = u_{C_{св}} = Ae^{-t/(RC)}$$

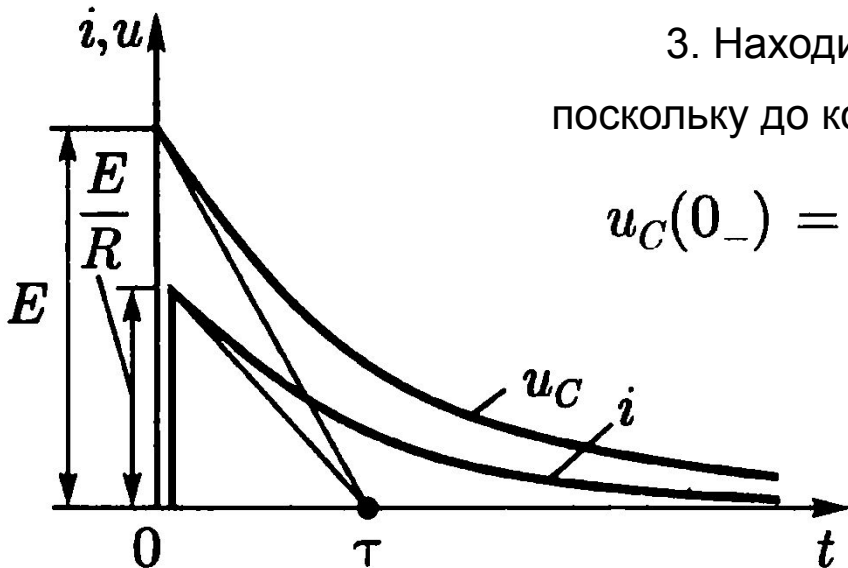
3. Находим постоянную интегрирования A

поскольку до комм. на конденсаторе действовало E

$$u_C(0_-) = E = u_C(0_+) = A \quad u_C = Ee^{-t/\tau}$$

$$i = -C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau} \quad \tau = RC$$

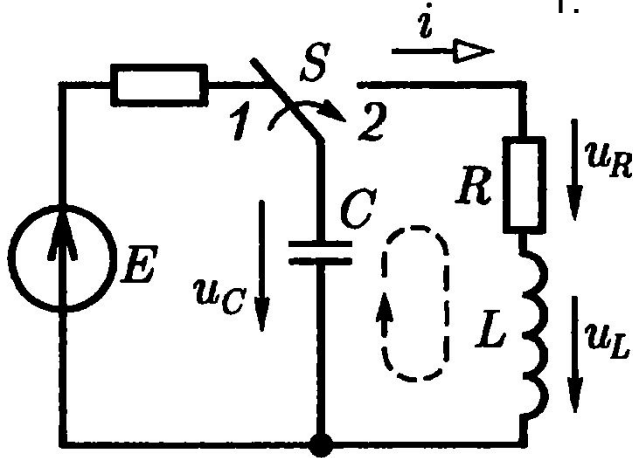
«-», поскольку конд. разряжается и изменение заряда отрицательное



Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R, L, C при разрядке C на L



1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи

$$-u_C + u_R + u_L = -u_C + Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

2. Находим решение однородного диф. ур-я

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad \text{при} \quad i = -C \frac{du_C}{dt}$$

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0$$

$$u_C = u_{C\text{св}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

$$\text{при } \frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC} \quad p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{2L^2} - \frac{1}{LC}} \quad \text{при } \frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$$

оба корня «-» и процесс аperiodический

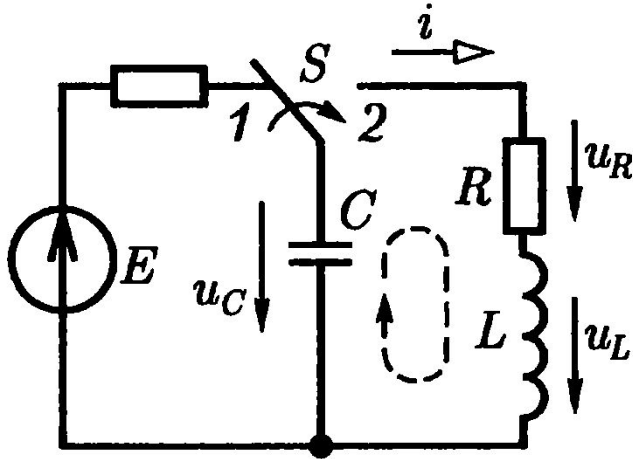
корни комплексные и сопряженные
процесс колебательный

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R, L, C при разрядке C на L

Колебательный процесс



$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$$

коэфф. затухания

$$\delta = R/2L$$

собств. угловая частота
процесса

$$\omega_0 = \sqrt{1/(LC - \delta^2)}$$

$$u_C = e^{-\delta t}(A_1 e^{j\omega_0 t} + A_2 e^{-j\omega_0 t})$$

$$i = -C \frac{du_C}{dt} = -C e^{-\delta t} [(-\delta A_1 e^{j\omega_0 t} + A_2 e^{-j\omega_0 t}) + j\omega_0 t (A_1 e^{j\omega_0 t} - A_2 e^{-j\omega_0 t})]$$

3. Находим постоянные интегрирования

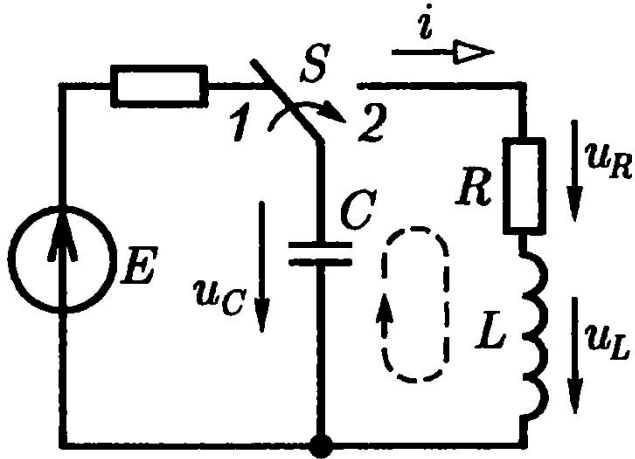
$$u_C(0_-) = E = u_C(0_+) = A_1 + A_2$$

$$i(0_-) = 0 = i(0_+) = C[\delta(A_1 + A_2) - j\omega_0(A_1 - A_2)]$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R, L, C при разрядке C на L



$$A_1 = E(\delta + j\omega_0)/2j\omega_0; \quad A_2 = E(j\omega_0 - \delta)/2j\omega_0.$$

$$u_C = \frac{E}{\omega_0} e^{-\delta t} (\omega_0 \cos \omega_0 t + \delta \sin \omega_0 t).$$

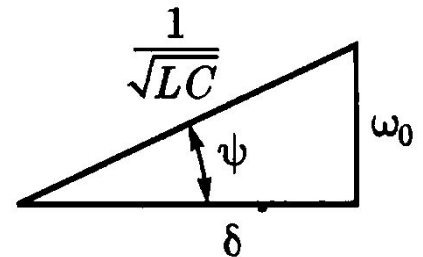
при $e^{\pm j\omega_0 t} = \cos \omega_0 t \pm j \sin \omega_0 t.$

$$u_C = \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi)$$

при $\sqrt{\omega_0^2 + \delta^2} = \sqrt{1/(LC) - \delta^2 + \delta^2} = 1/\sqrt{LC}.$

$$i = -C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t.$$

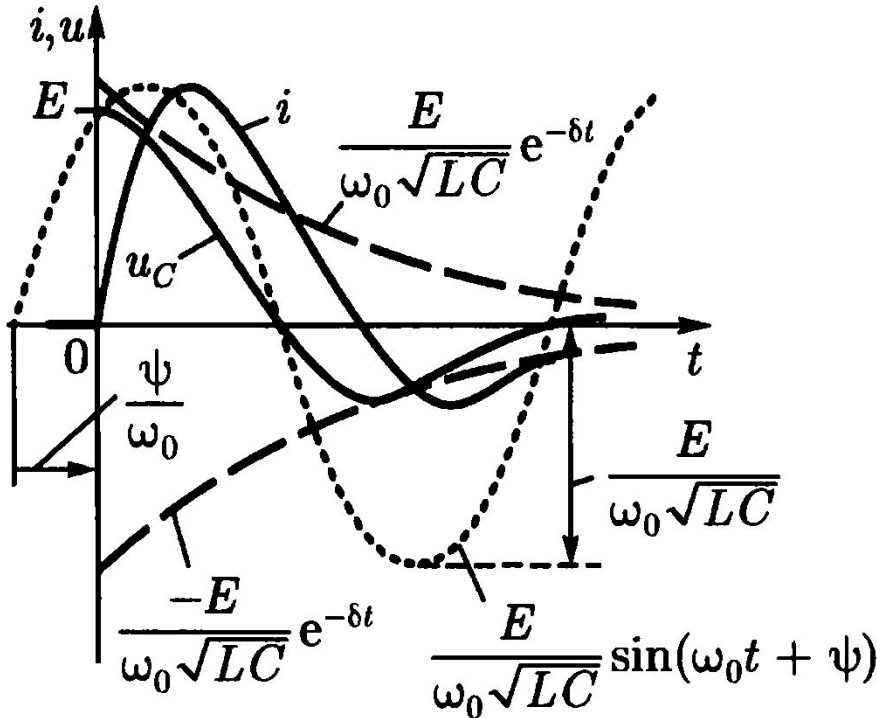
$$\tau = 1/\delta = 2L/R$$



Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R, L, C при разрядке C на L



$$\pm \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \quad \text{вспомогательные кривые напряжения (границы)}$$

Апериодический процесс

$$p_2 < p_1 < 0$$

$$u_C = u_{C\text{св}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

3. Находим постоянные интегрирования

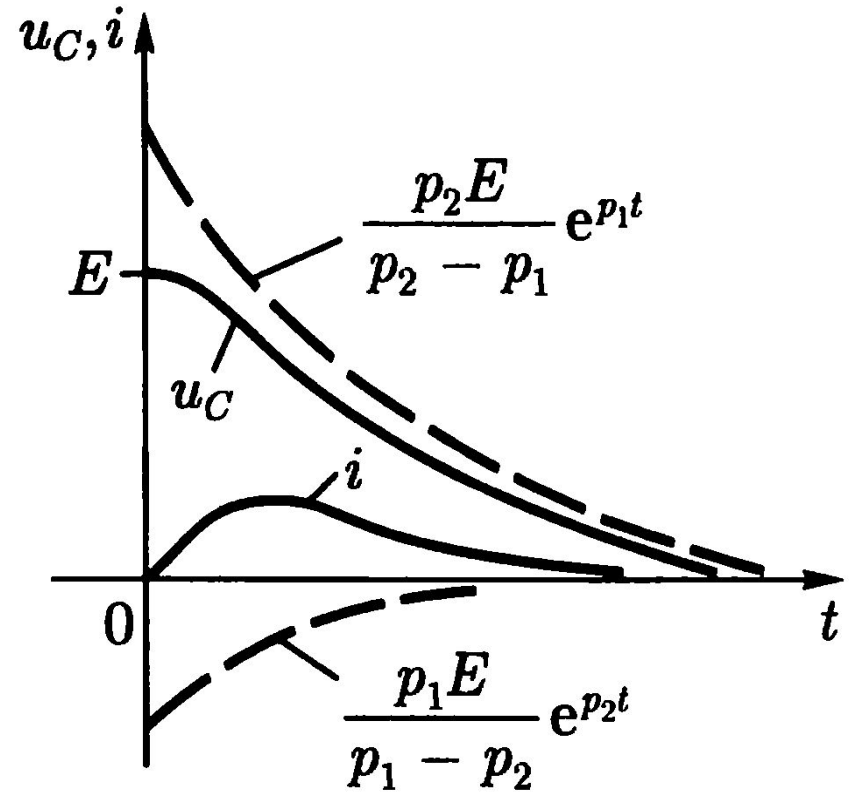
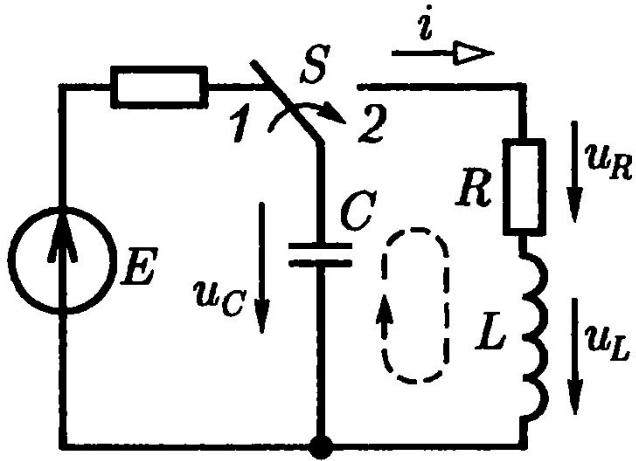
$$u_C(0_-) = E = u_C(0_+) = A_1 + A_2 \quad i(0_-) = 0 = i(0_+) = -C \frac{du_C}{dt} \Big|_{t=0_+} = -C(p_1 A_1 + p_2 A_2)$$

$$A_1 = \frac{p_2 E}{p_2 - p_1} > 0, \quad A_2 = \frac{p_1 E}{p_1 - p_2} < 0$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с R, L, C при разрядке C на L



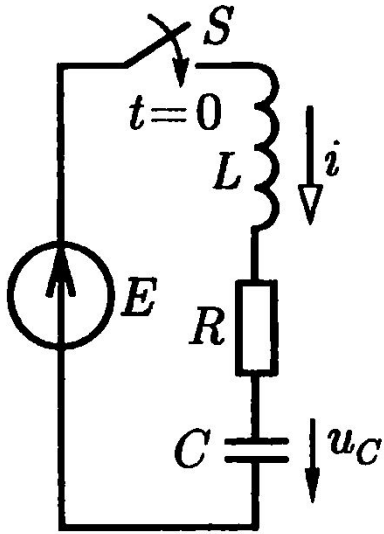
$$u_C = \frac{p_2 E}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} + \frac{p_1 E}{p_1 - p_2} e^{p_2 t}$$

$$i = -C \frac{du_C}{dt} = -\frac{p_1 p_2 E C}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с включением R, L, C



1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E$$

2. Находим решение неоднородного диф. ур-я

$$u_{Cy} = E \quad u_C = u_{Cсв} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

$$u_C = E + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$$

3. Находим постоянные интегрирования

$$i = C \frac{du_C}{dt} = p_1 C A_1 e^{p_1 t} + p_2 C A_2 e^{p_2 t}$$

$$u_C(0_-) = 0 = u_C(0_+) = E + A_1 + A_2;$$

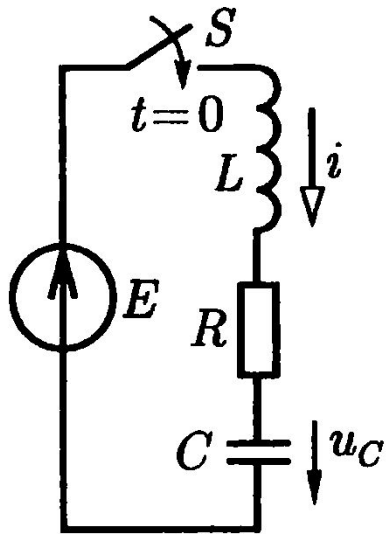
$$i(0_-) = 0 = i(0_+) = p_1 A_1 + p_2 A_2,$$

$$A_1 = p_2 E / (p_1 - p_2), \quad A_2 = p_1 E / (p_2 - p_1)$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи постоянного тока с включением R, L, C

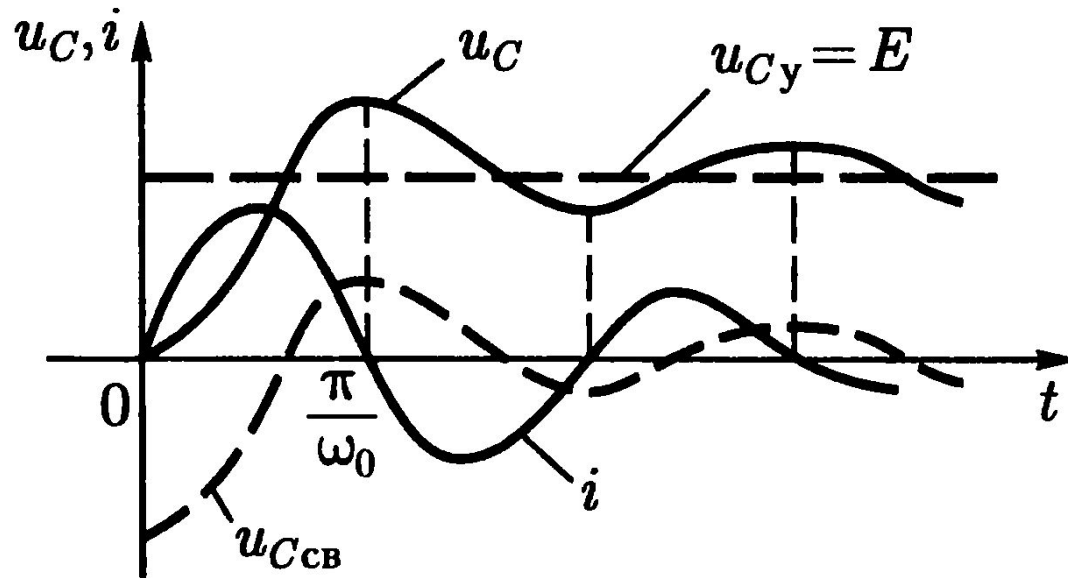


$$u_C = u_{C_y} + u_{C_{св}} = E - \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi)$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t.$$

$$\tau = 1/\delta$$

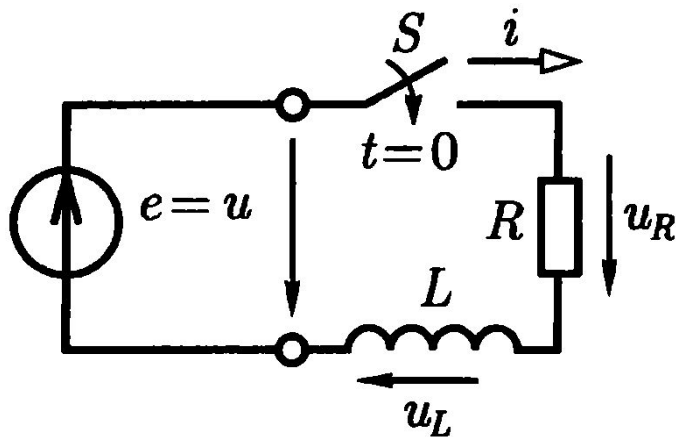
$$\delta = R/2L$$



Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета

ПП в цепи синусоидального тока с включением R, L



$$e = u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

$$i_y = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$$

$$I_m = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\varphi = \text{arctg}(\omega L / R)$$

1. Составляем уравнения по Кирхгофу для состояния цепи

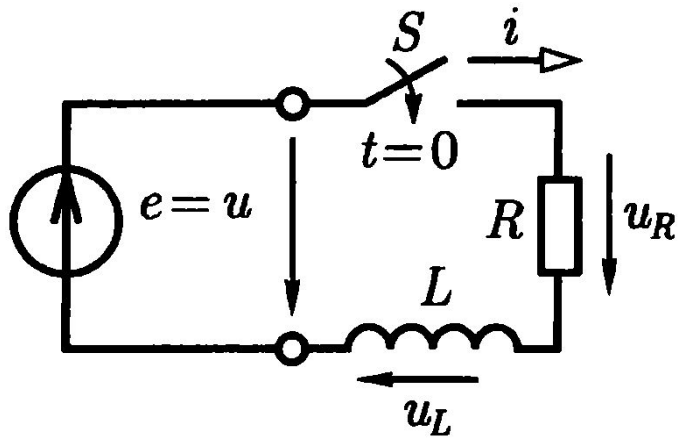
$$u_L + u_R = L di/dt + Ri = e.$$

2. Находим решение неоднородного диф. ур-я

$$i = i_y + i_{св} = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + Ae^{-\frac{R}{L}t}$$

Переходные процессы в электрических цепях

Классический метод расчета ПП в цепи синусоидального тока с включением R, L

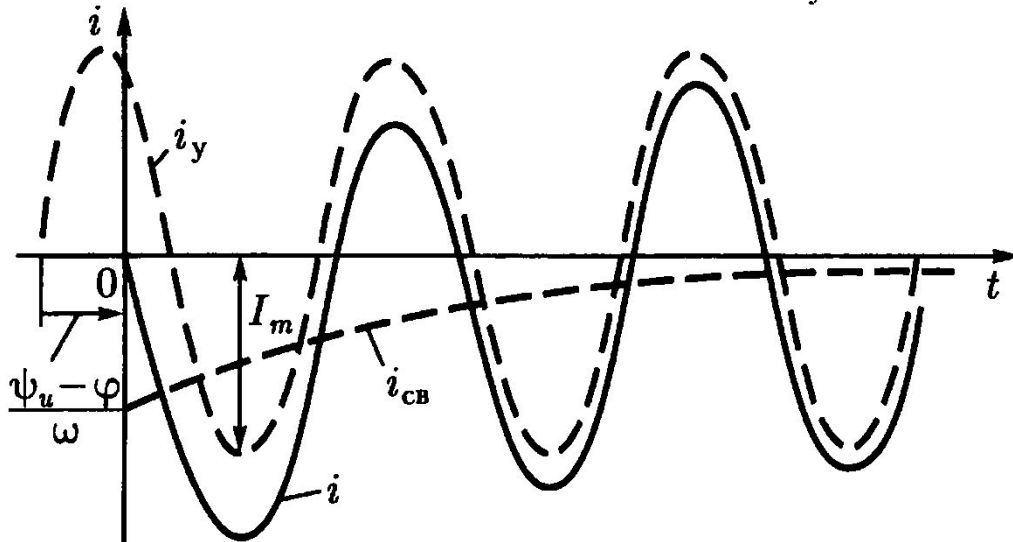


3. Находим постоянную интегрирования

$$i(0_-) = 0 = i(0_+) = I_m \sin(\psi_u - \varphi) + A$$

$$A = -I_m \sin(\psi_u - \varphi) \quad \tau = L/R$$

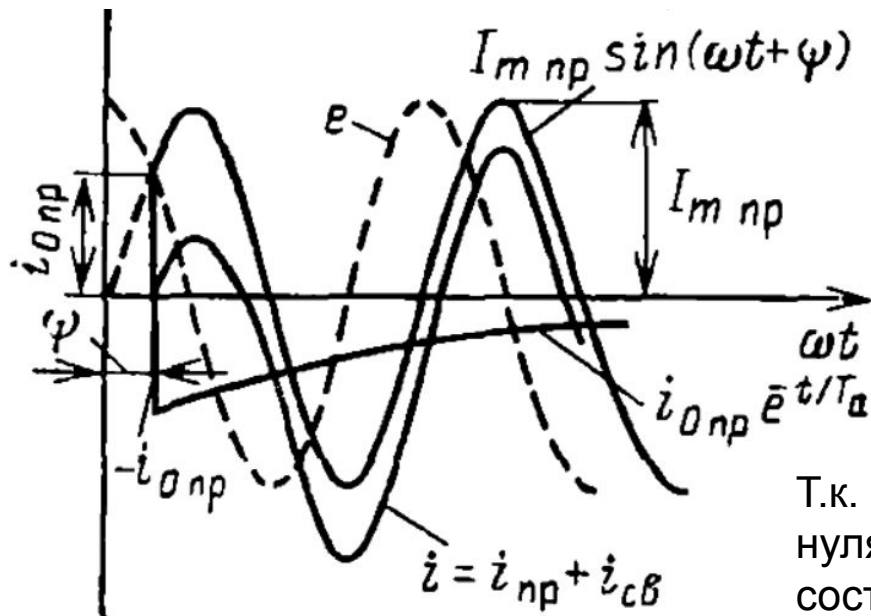
$$i = i_y + i_{св} = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) - I_m \sin(\psi_u - \varphi) e^{-t/\tau}$$



при $\psi_u = \varphi$ $i_{св} = 0$ ПП нет

при $\psi_u = \varphi + \pi/2$ ток наибольший
 $t \approx T/2 = \pi/\omega$

Как правило в цепях высокого напряжения: $\omega L \gg R, \varphi \approx \pi / 2$

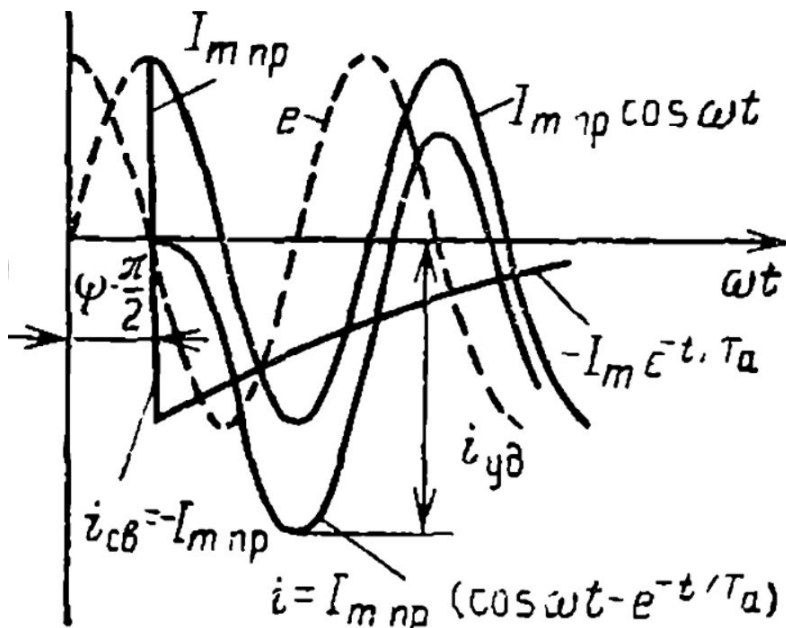


$t = 0, \varphi \neq 0 : i = i_{np} + i_{св}$
 $i_{св} = i_{св0} \cdot e^{-t/T_a}$ - свободная составляющая тока

$$i_{св0}(t = 0) = -i_{0np}$$

$T_a = L / R$ - постоянная времени апериодической сост.

Т.к. присутствует L , то ток должен нарастать с нуля, что объясняет наличие апериодической составляющей.



$t = 0, \varphi = 90^0 :$

$$i_{св}(t = 0) = -i_{0np} = -I_{m np}$$

$$i = I_{m np} (\cos \omega t - e^{-t/T_a})$$

При $t = \pi / \omega :$

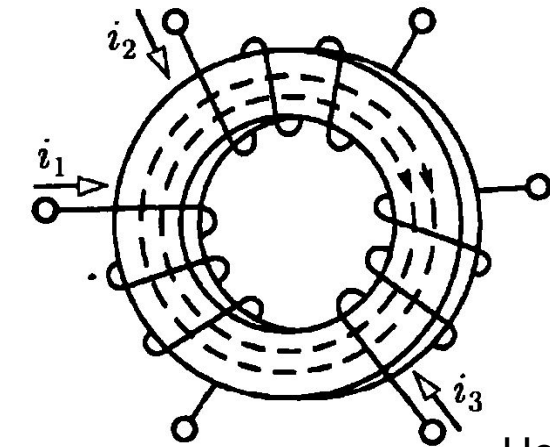
$$i = i_{yd} = I_{m np} (1 + e^{-\pi/(\omega T_a)}) = k_{yd} \cdot I_{m np}$$

k_{yd} - ударный коэффициент

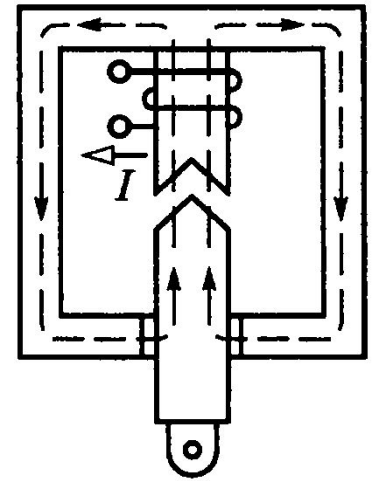
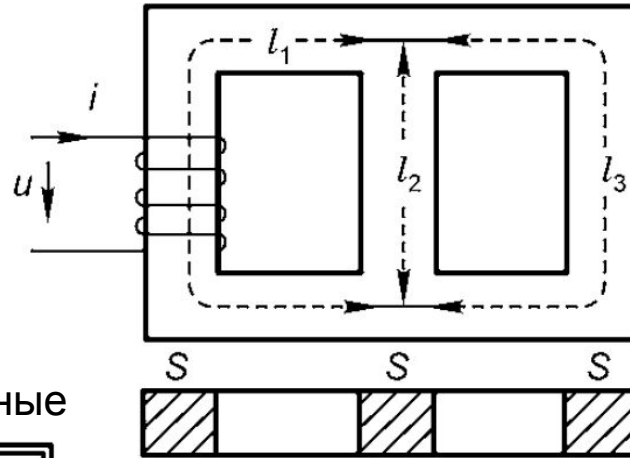
Магнитные цепи

Понятие о магнитной цепи

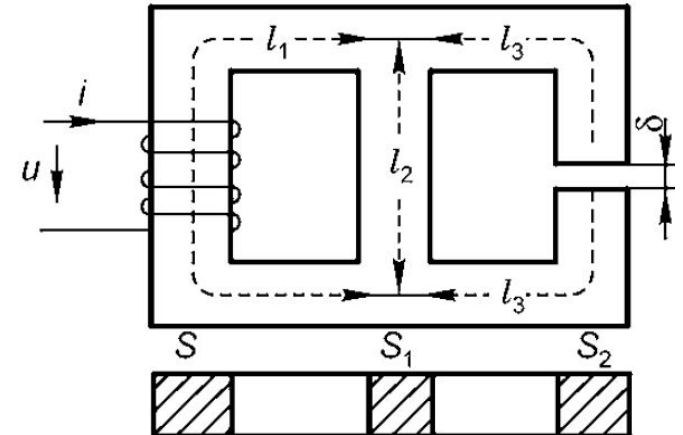
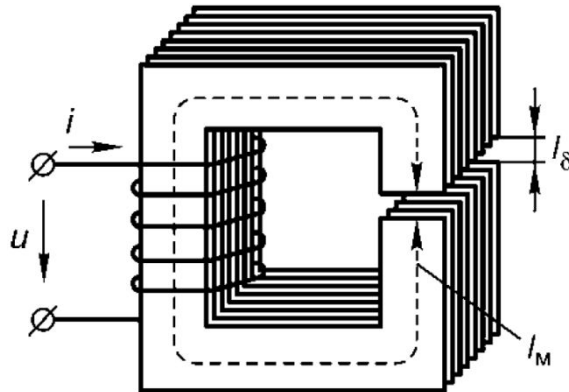
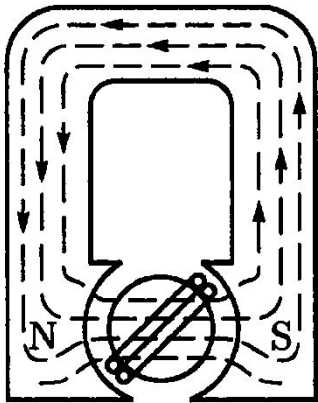
Совокупность ферромагнитных и неферромагнитных частей электрооборудования, предназначенных для создания магнитных полей определенных конфигураций и интенсивностей



Разветвленные

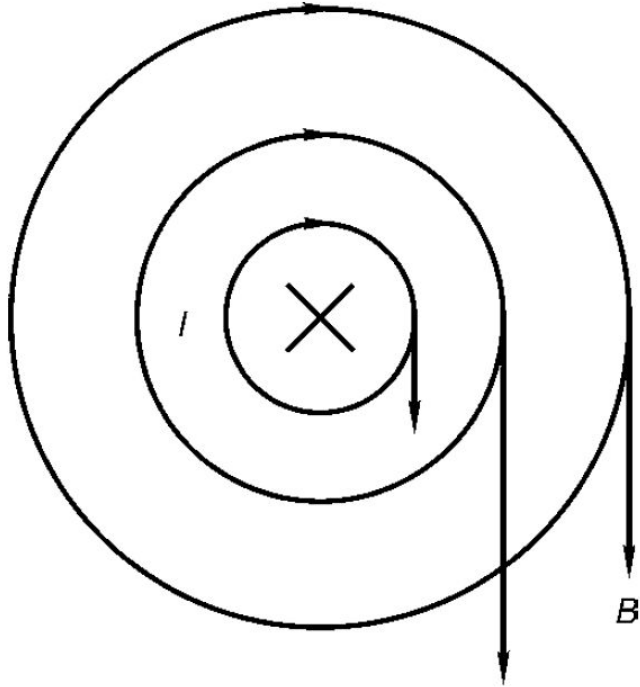


Неразветвленные



Магнитные цепи

Основные характеристики магнитного поля



B магнитная индукция – хар-ка силового воздействия поля на заряженные частицы и на тела, обладающие магнитным моментом

M (J) намагниченность – хар-ка магнитного состояния вещ-ва, определяемая магнитным моментом единицы объема и связывающая индукцию и напряженность

$$\mathbf{m}_0 = i_0 \mathbf{s}_0 \quad \text{магн. момент}$$

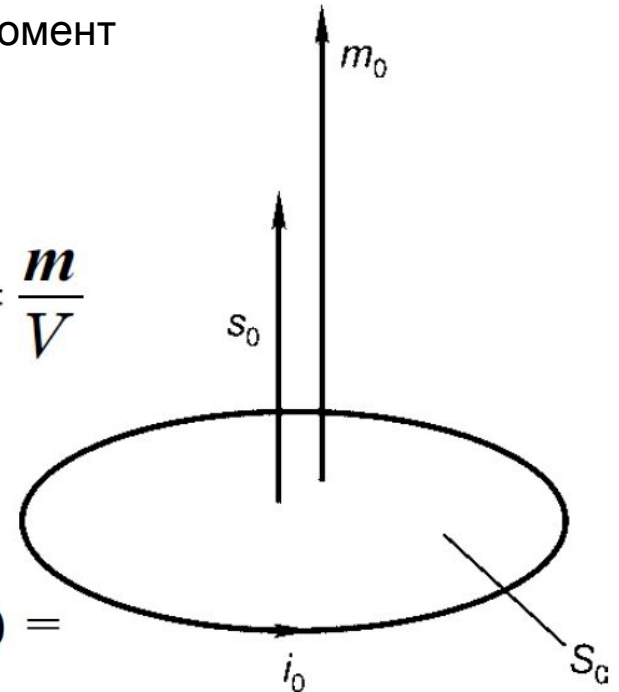
$$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{m}}{dV}$$

в однородно намагниченной среде $\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V}$

H напряженность – определяется магнитной индукцией и намагниченностью

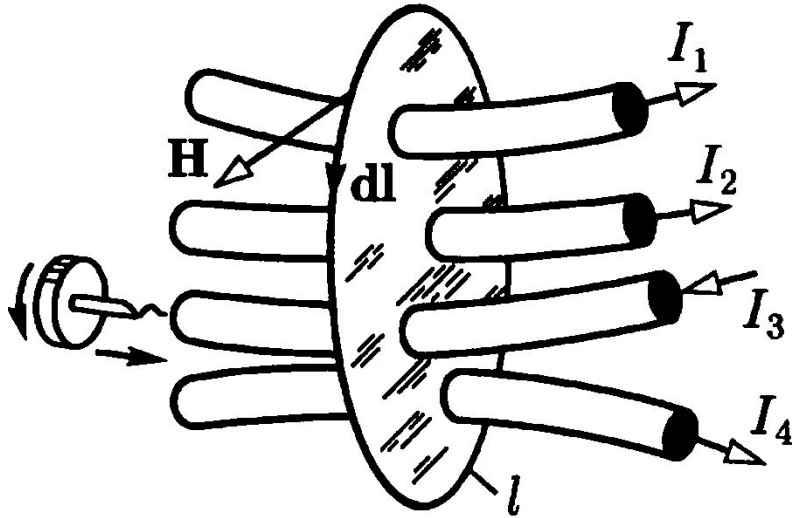
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} (1 + \mathbf{M}/\mathbf{H}) = \\ &= \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \end{aligned}$$



Магнитные цепи

Закон полного тока



$$\oint_l H dl = \sum_{k=1}^n I_k$$

$$\oint_l H dl = I_1 + I_2 - I_3 + I_4$$

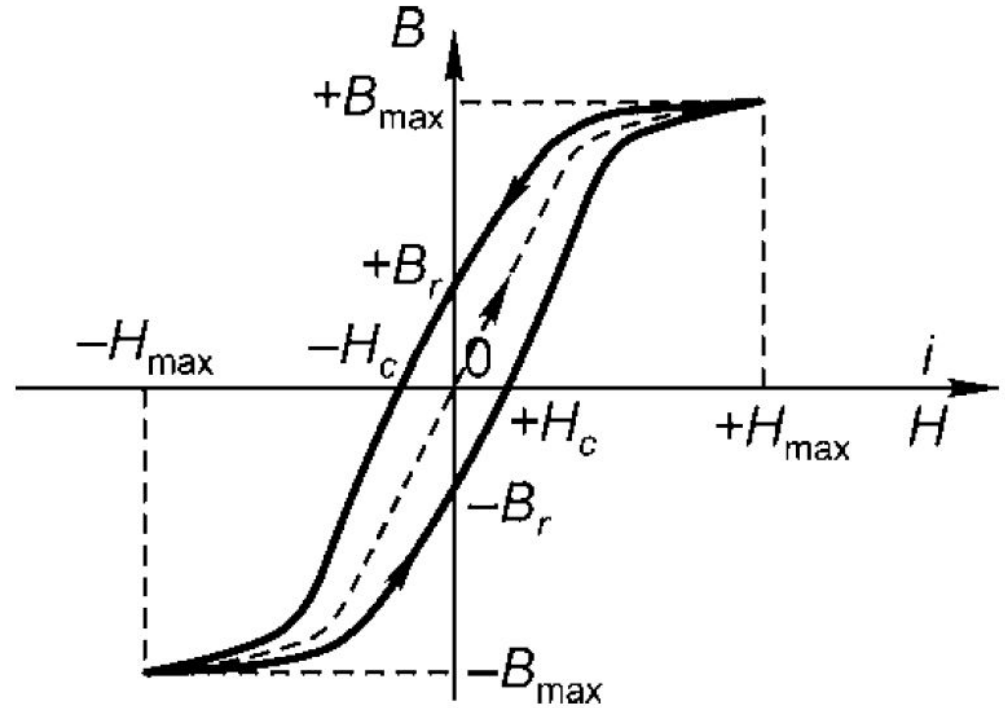
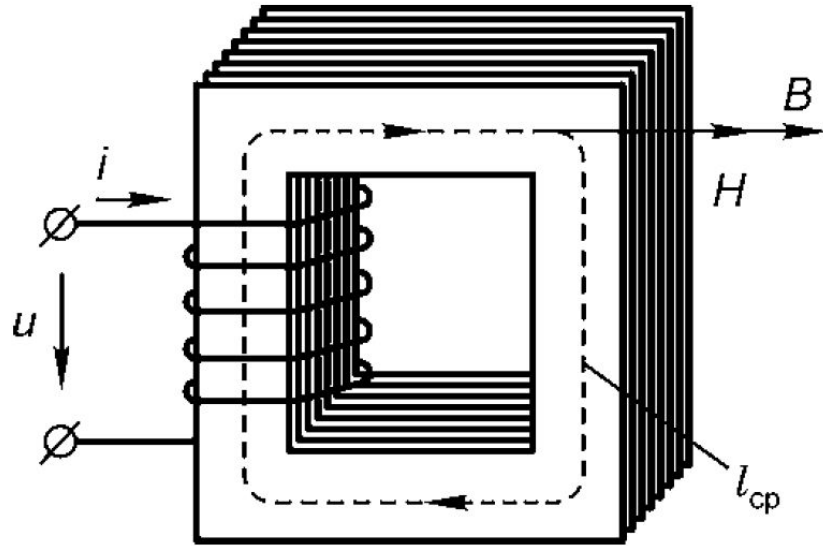
$$\oint_l H dl = wI \quad \text{при многовитковом контуре}$$

$$\oint_l H dl \quad - \text{ величина МДС, т. о.} \quad F = \sum_{k=1}^n I_k \quad \text{магнитодвижущая сила}$$

$$F_{ab} = U_{Mab} = \int_a^b H dl = H_{ab} l_{ab} \quad \text{магнитное напряжение на участке а - b}$$

Магнитные цепи

Свойства ферромагнитных материалов, гистерезис



Изначально, при $i = 0$

$$B = H = 0$$

При нарастании МДС, в области малых H

$\mu = B/H \gg \mu_0$ характеристика намагничивания линейная

$\pm B_r$ остаточная индукция

При $+H_{\max}$ наступает насыщение

При обратном намагничивании

$$i = 0 \quad B_r \neq 0$$

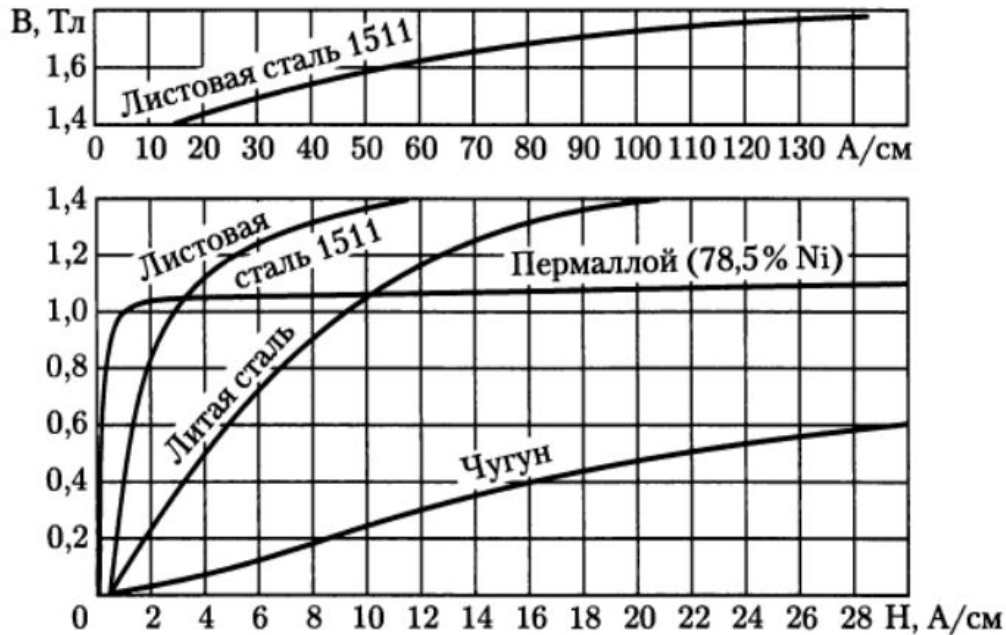
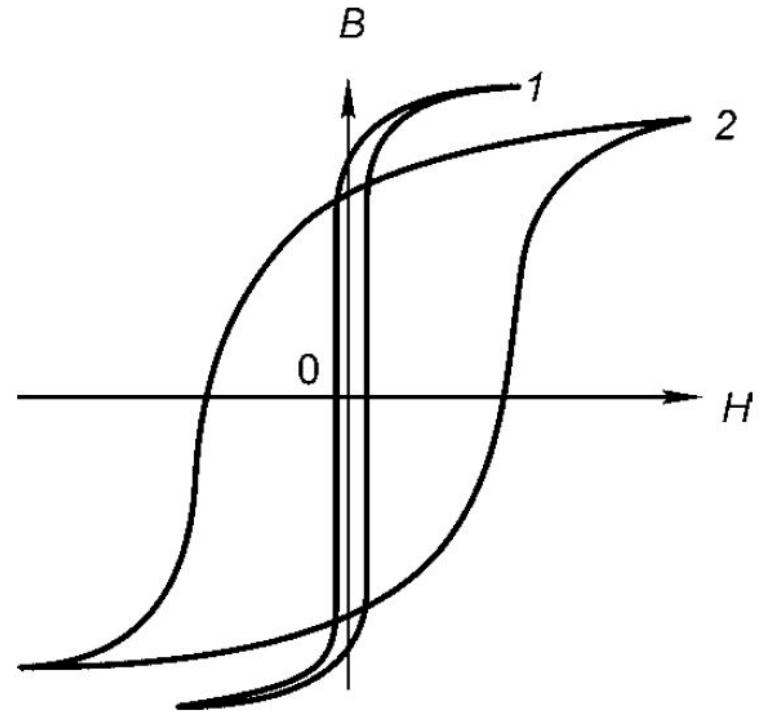
$\pm H_c$ коэрцитивная сила

Магнитные цепи

Свойства ферромагнитных материалов

$H_c < 4 \text{ кА/м}$ магнитно-мягкие

$H_c > 4 \text{ кА/м}$ магнитно-твердые



Магнитные цепи

Магнитное сопротивление. 3-ны Ома, Кирхгофа для магнитной цепи

Напряженность на участке, при ($\Phi = BS$):
$$H = \frac{B}{\mu_0\mu_r} = \frac{\Phi}{\mu_0\mu_r S}$$

Магнитное напряжение
$$U_M = Hl = \Phi \frac{l}{\mu_0\mu_r S} = R_M \Phi$$

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи

$$R_M = \frac{l}{\mu_0\mu_r S}$$

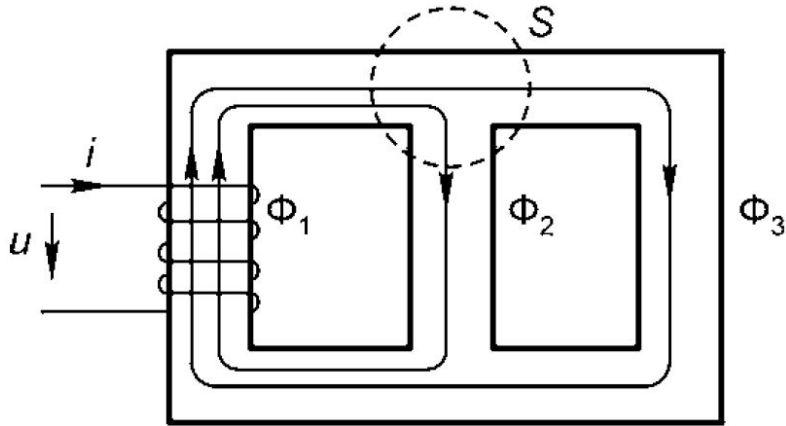
По закону полного тока $F = Hl = R_M \Phi$

отсюда, **закон Ома** для участка магнитной цепи

$$\Phi = \frac{F}{R_M}$$

Магнитные цепи

Магнитное сопротивление. 3-ны Ома, Кирхгофа для магнитной цепи



Из условия непрерывности силовых линий поля

$$\oint_S \mathbf{B} ds = \sum \Phi_k = 0$$

Т. о. первый закон Кирхгофа $\sum \Phi_k = 0$

Из закона полного тока $\oint_l \mathbf{H} dl = \sum F$

Т. о. второй закон Кирхгофа $\sum U_{mk} = \sum F_k$

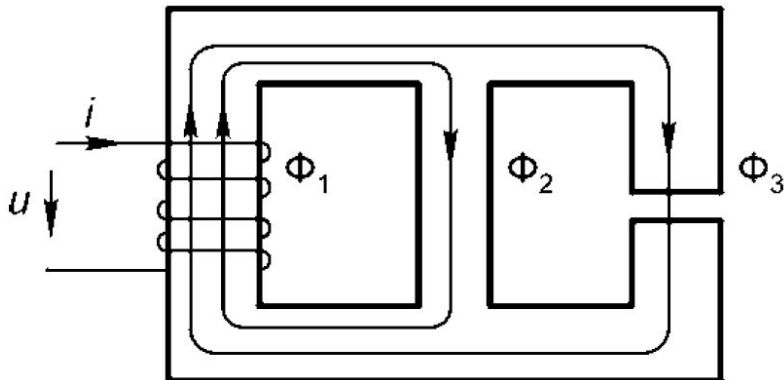
$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m F_k = \sum_{k=1}^m I_k w_k$$

Для 1 схемы

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2$$

$$0 = H_3 l_3 - H_2 l_2$$



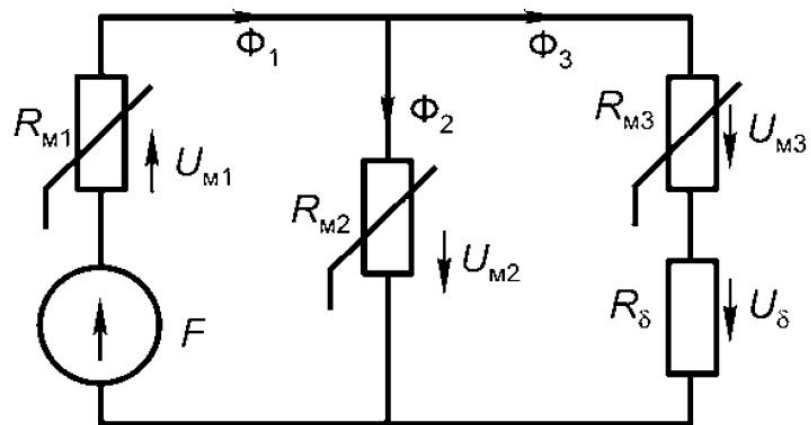
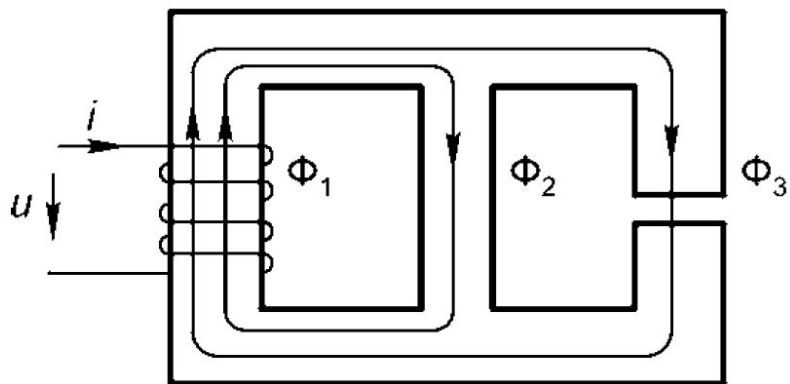
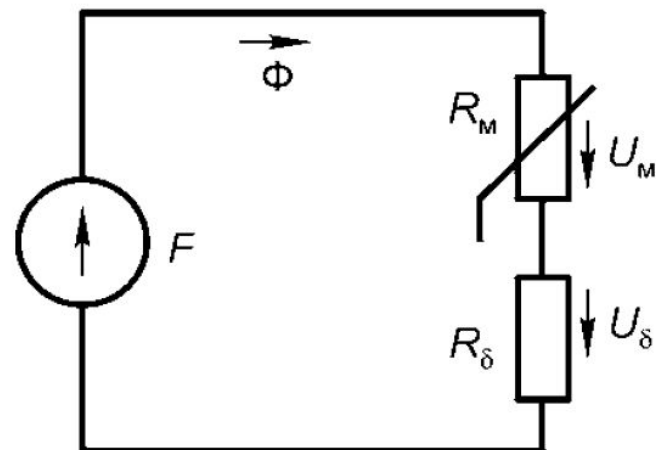
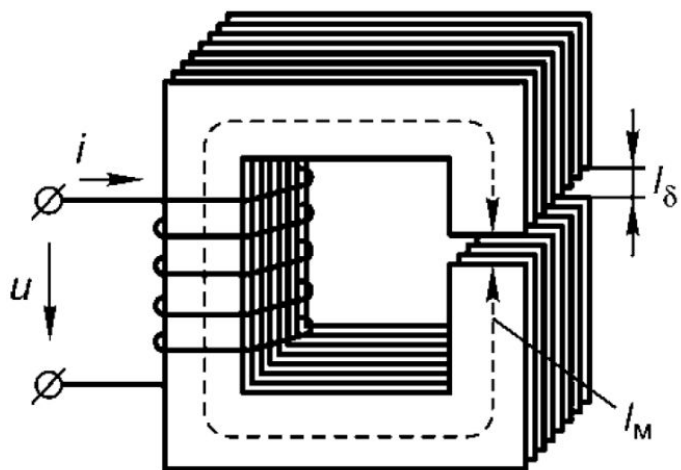
Для 2 схемы $\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = Iw$$

$$H_1 l_1 + H_3 l_3 + H_\delta \delta = Iw$$

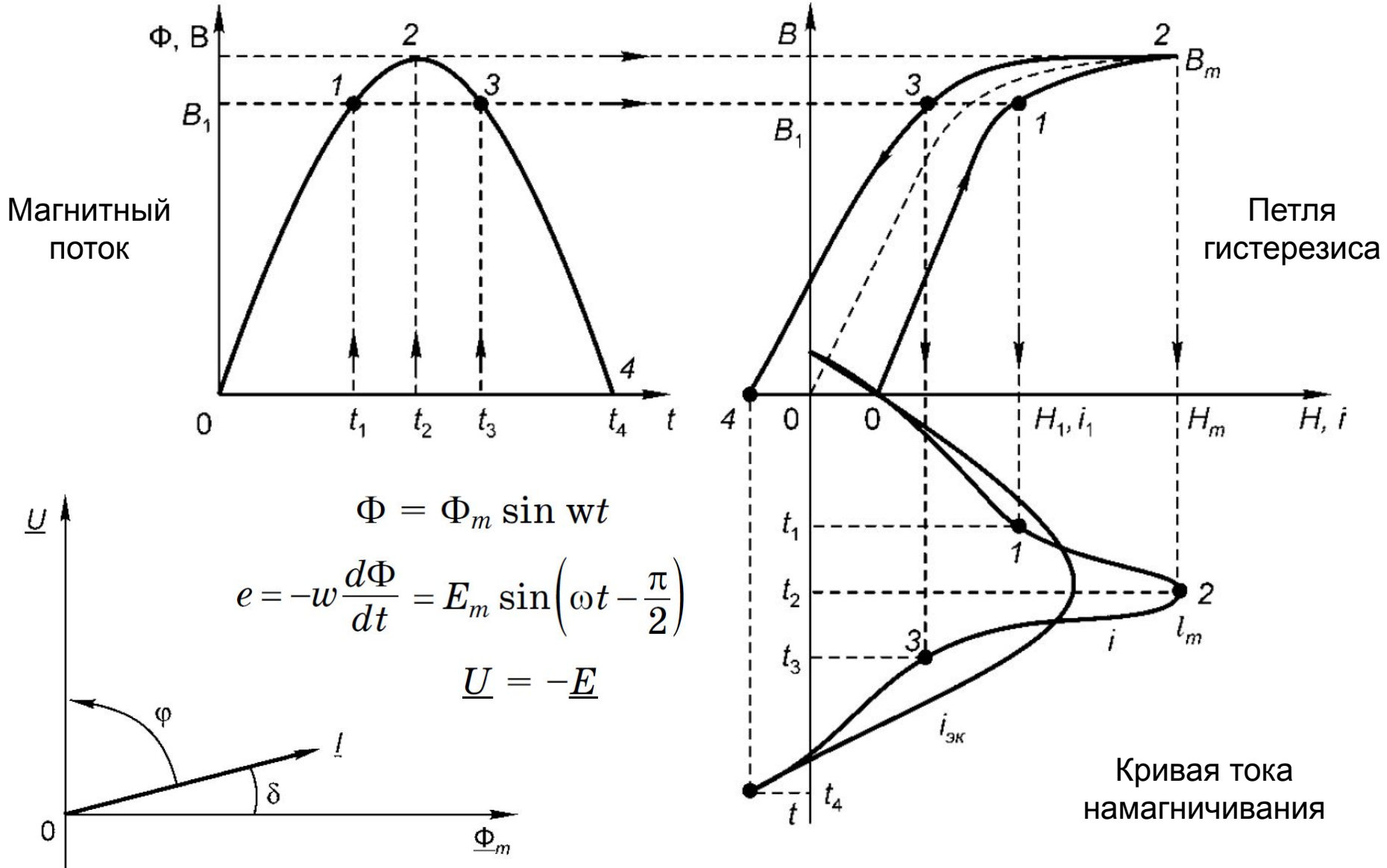
Магнитные цепи

Схемы замещения магнитных цепей



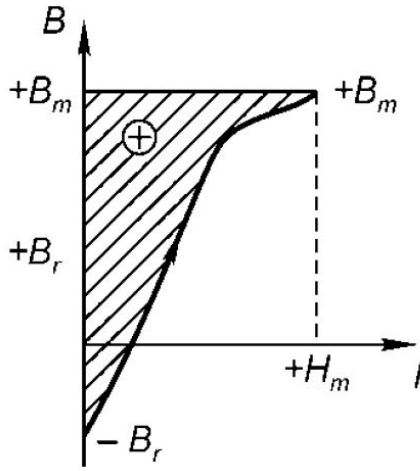
Магнитные цепи

Ферромагнитные участки в цепях переменного тока

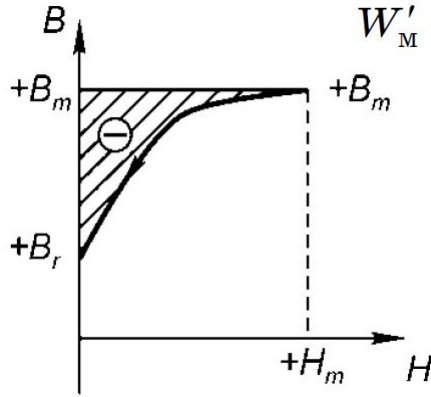


Магнитные цепи

Мощности потерь

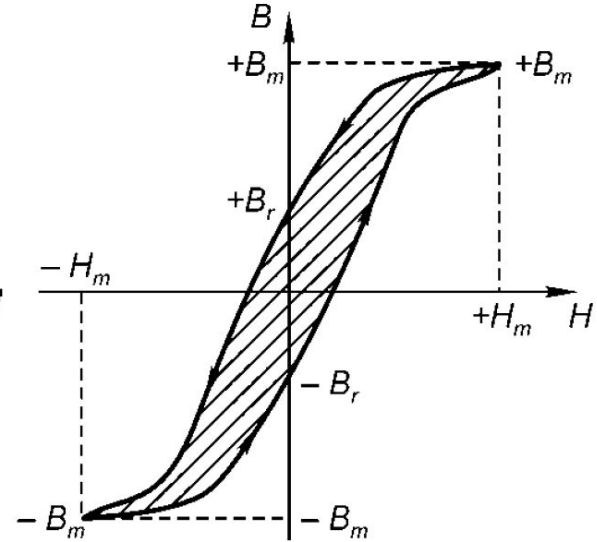
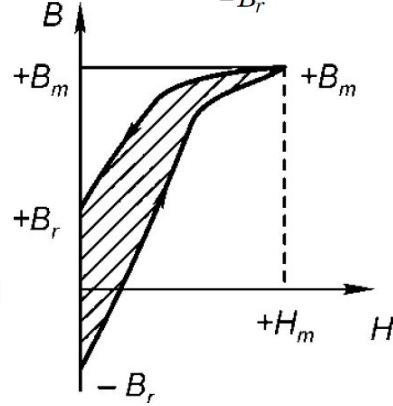


$-B_r$ до $+B_m$
энергия накапливается



$+B_m$ до $+B_r$
энергия возвращается

$$W'_M = \oint H dB = \int_{-B_r}^{+B_m} H dB + \int_{+B_m}^{+B_r} H dB + \int_{+B_r}^{-B_m} H dB + \int_{-B_m}^{-B_r} H dB$$



Для практических расчетов потерь от гистерезиса $p_{ПГ} = \sigma_{Г} f B_m^n$
при $B_m < 1$ Тл $n = 1,6$; при $B_m > 1$ Тл $n = 2$

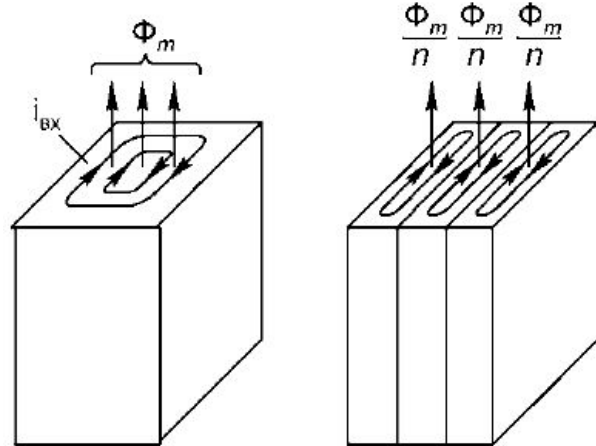
Мощность потерь от вихревых токов

$$P_{ПВ} = C \frac{E^2}{R_{ЭК}} \quad \text{для снижения – шихтуют (R-растет)}$$

Для практических расчетов $p_{ПВ} = \sigma \gamma f^2 B_m^2 \Delta^2$

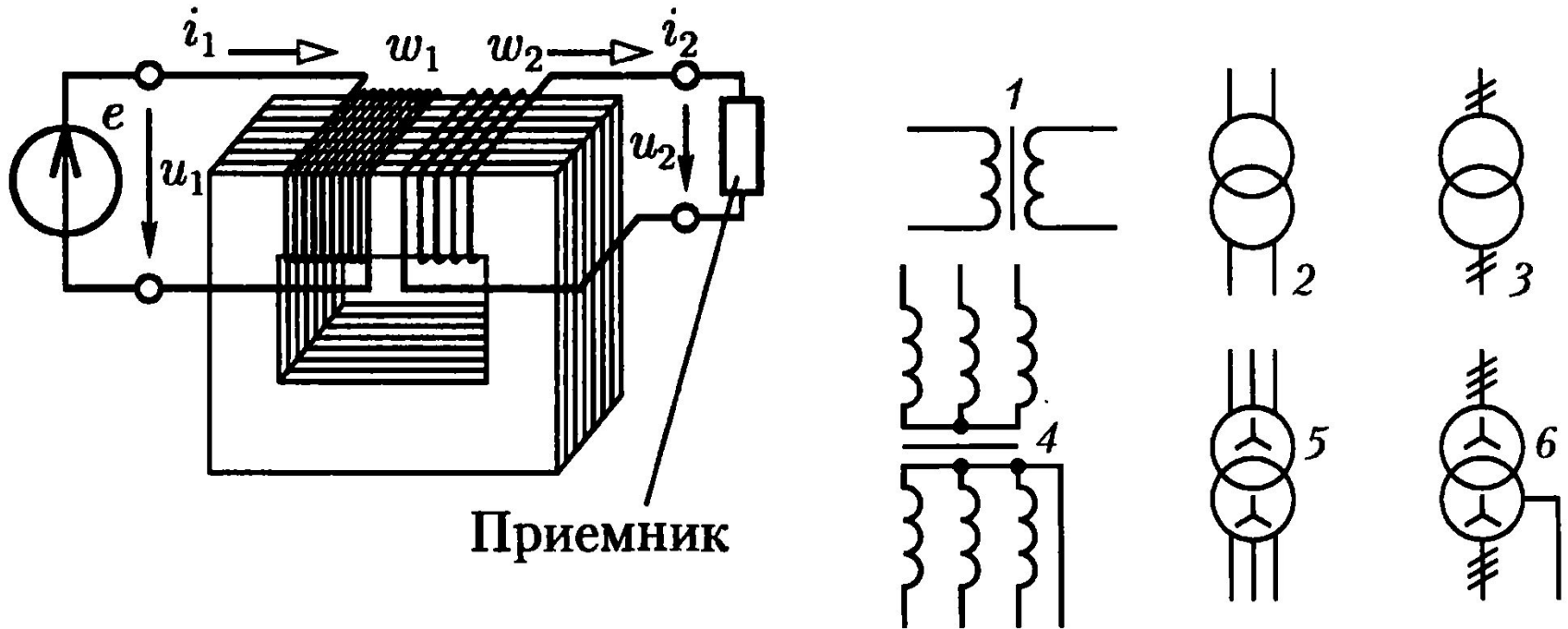
Суммарные, Вт/кг

$$p_{ПС} = p_{ПГ} + p_{ПВ}$$



Трансформаторы

Статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока



Трансформаторы

Классификация

- По числу фаз
однофазные, двухфазные, трехфазные, многофазные

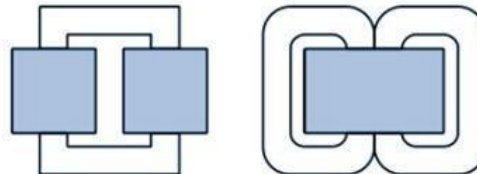
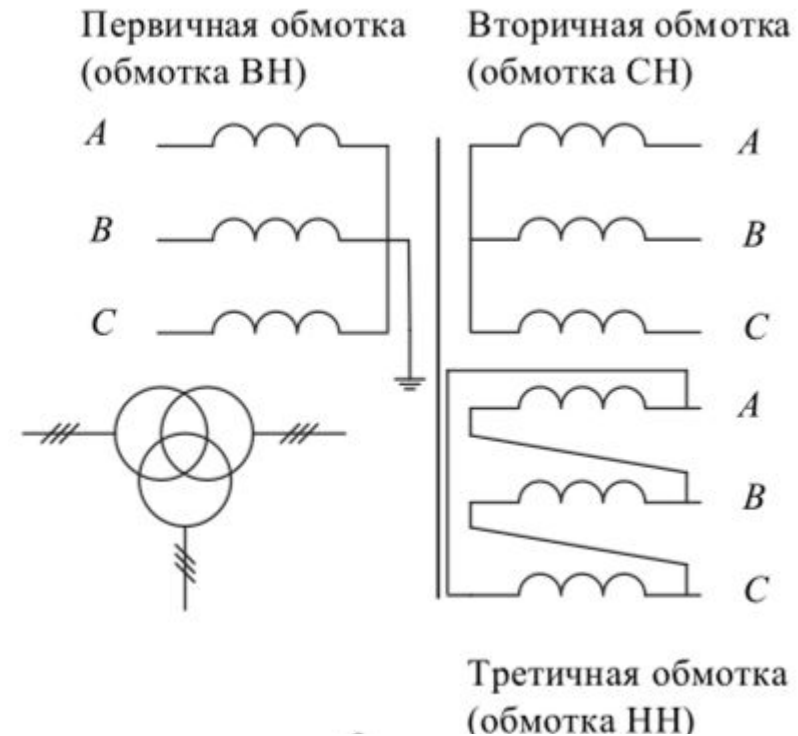
- По соотношению напряжений обмоток
повышающие, понижающие

$$n_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad \frac{I_2}{I_1} = n_{12}$$

- По количеству обмоток
двухобмоточные, трехобмоточные

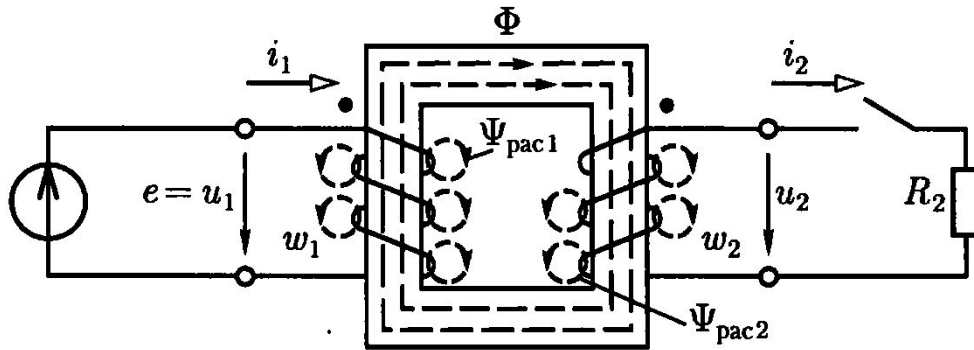
- По конструкции изоляции
масляные, сухие

- По конструкции остова
броневого, стержневого



Трансформаторы

Принцип действия



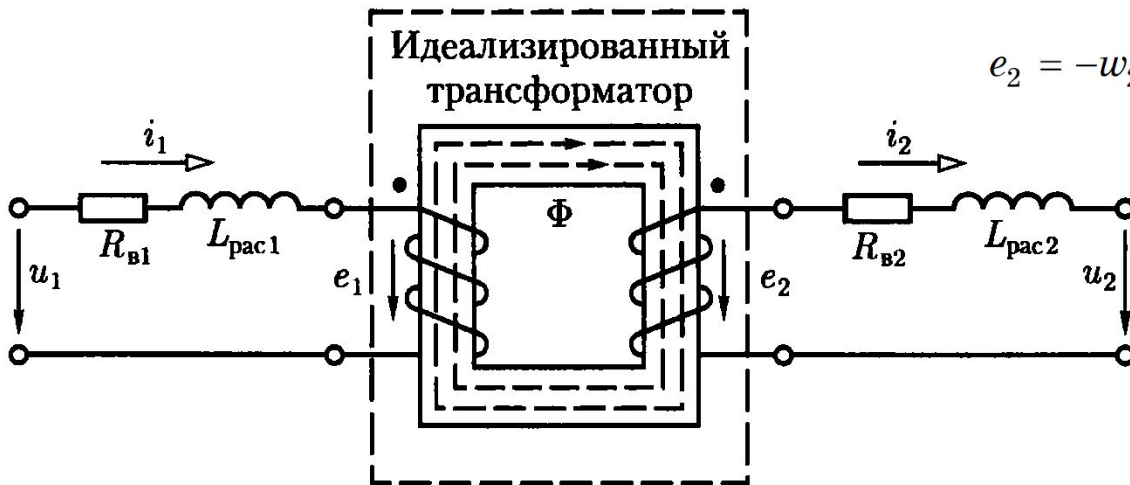
$$u_1 \rightarrow i_1 \rightarrow i_1 w_1 \rightarrow \Phi \begin{matrix} \nearrow e_1 \\ \searrow e_2 \end{matrix} \rightarrow i_2$$

$$c = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \sigma = 1 - c^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

$c = 1$ - идеализир. $c = 0,93 \div 0,999$ - реальные
 $\sigma = 0,07 \div 0,001$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

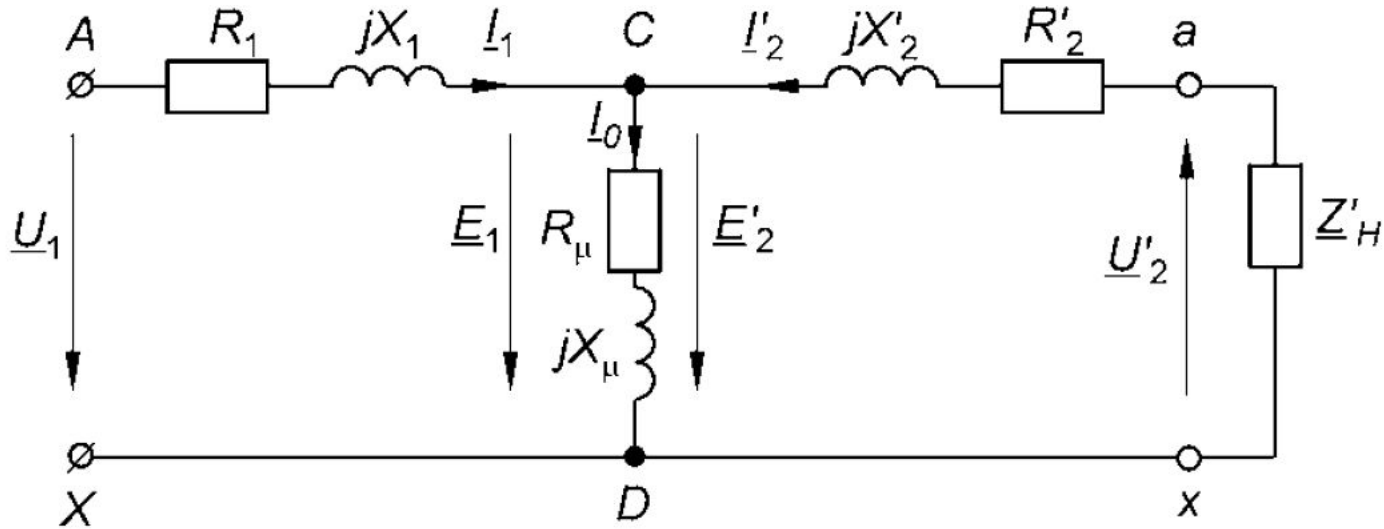


$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m$$

Трансформаторы

Схема замещения, приведение, уравнения установившегося режима



$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + jX_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2(R'_2 + jX'_2) = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2)$$

$$\underline{Z}_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad \underline{Z}'_2 = \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}$$

$$\underline{E}'_2 = E_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = kE_2 = E_1$$

$$U'_2 = kU_2 \quad I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{I_2}{k}$$

$$R'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 R_2 = k^2 R_2 \quad X'_2 = k^2 X_2$$

$$\underline{Z}'_H = k^2 \underline{Z}_H$$

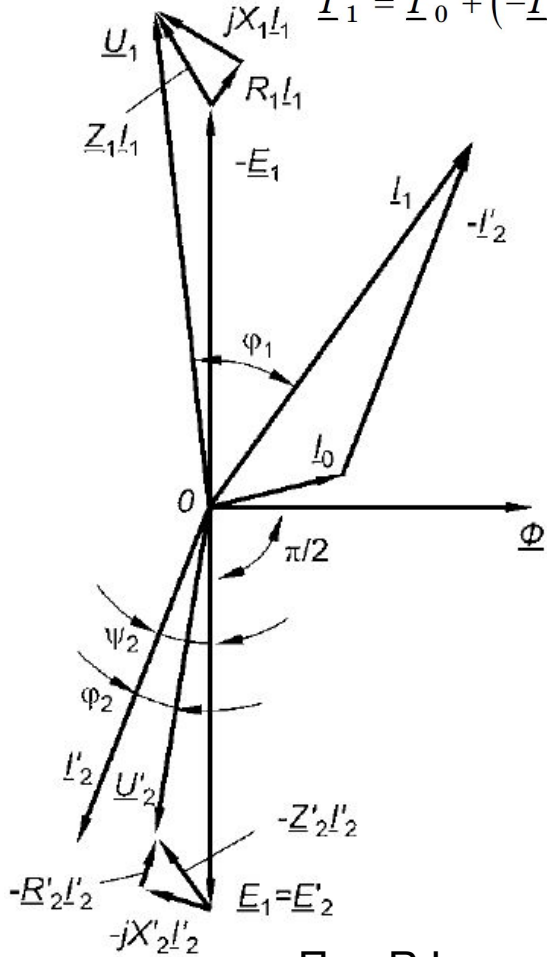
Трансформаторы

Режимы работы, векторные диаграммы

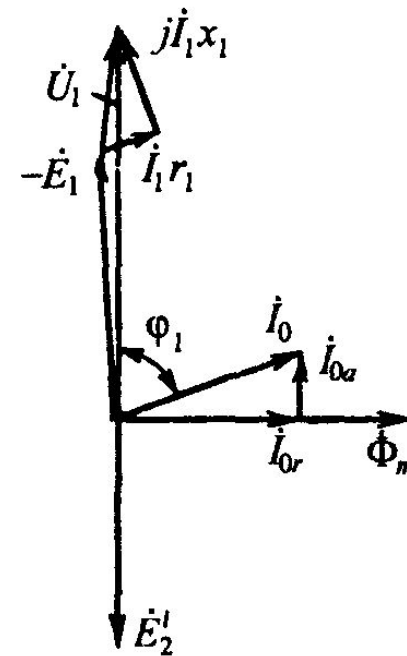
$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + jX_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2(R'_2 + jX'_2) = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \underline{Z}'_2$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2)$$



При R,L нагрузке



Опыт ХХ

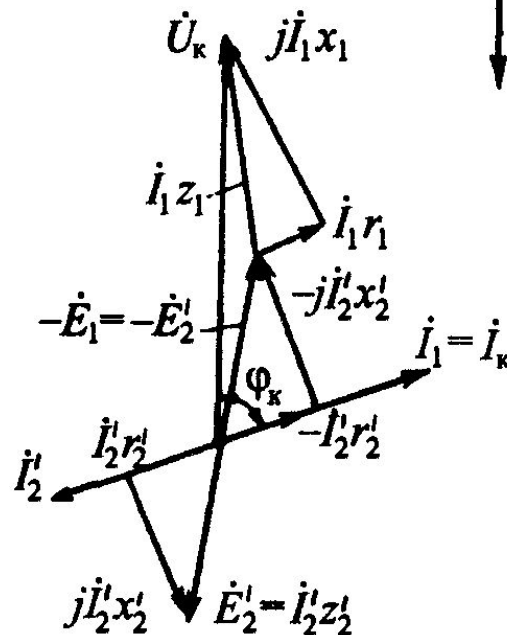
$$= 0 \quad z_n = \infty$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2;$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1.$$

$$n_{12} = \frac{U_1}{U_2}$$



Опыт КЗ

$$\dot{I}_0 = 0 \quad \dot{U}'_2 = 0$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1$$

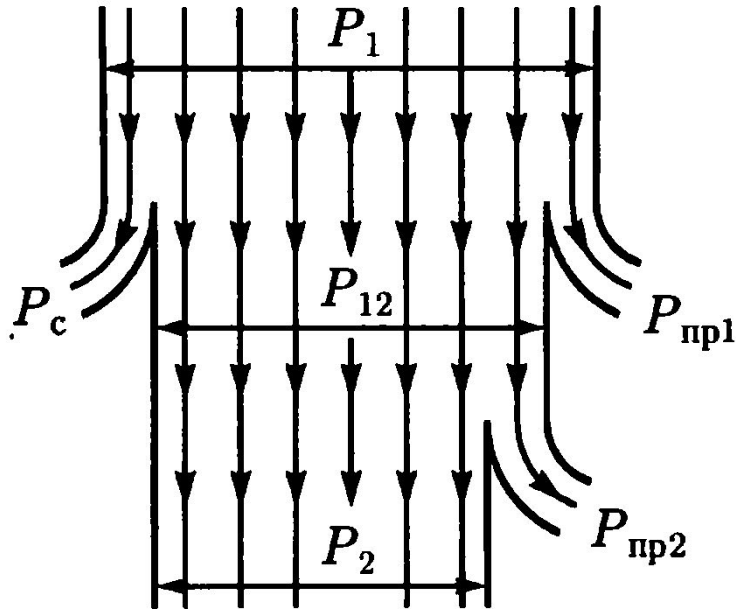
$$0 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2;$$

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2.$$

$$u_k = \frac{U_{к.ном}}{U_{1ном}} 100\%$$

Трансформаторы

Энергетическая диаграмма. КПД



$$P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c = P_{12}$$

$$P_2 = P_{12} - P_{\text{пр2}} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}}$$

$$\eta = P_2 / P_1$$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \right) \cdot 100 \%$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = k_3 U_2 I_{2\text{НОМ}} \cos \varphi_2$$

$$k_3 = I_2 / I_{2\text{НОМ}} \quad k_3 = 0,7 - 0,5$$

