

Лекция

№7

Тема

Трехфазные ЭЦ

Разработал Никаноров В.Б.



1. Общие понятия

- **Трёхфазная ЭЦ** – совокупность:
 - трёхфазной системы ЭДС генератора,
 - трёхфазной нагрузки
 - и соединительных проводов.
- Под **фазой** понимают участок ЭЦ, по которому протекает одинаковый ток.
- **Трёхфазная система ЭДС** - три (однофазных) ЭЦ, в которых действуют три синусоидальные ЭДС
 - ✓ одной и той же частоты,
 - ✓ равные по амплитуде и
 - ✓ сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол $2\pi/3$ рад (120°).

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

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

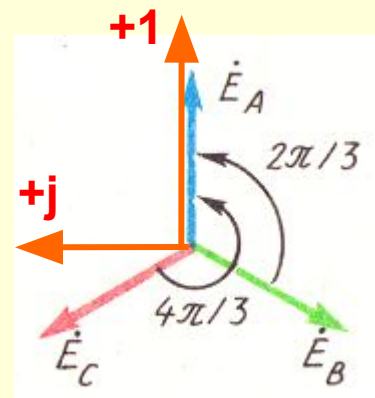
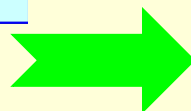
– симметричная система ЭДС

- ЭДС фаз в комплексной форме

$$\dot{E}_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j0} = E$$

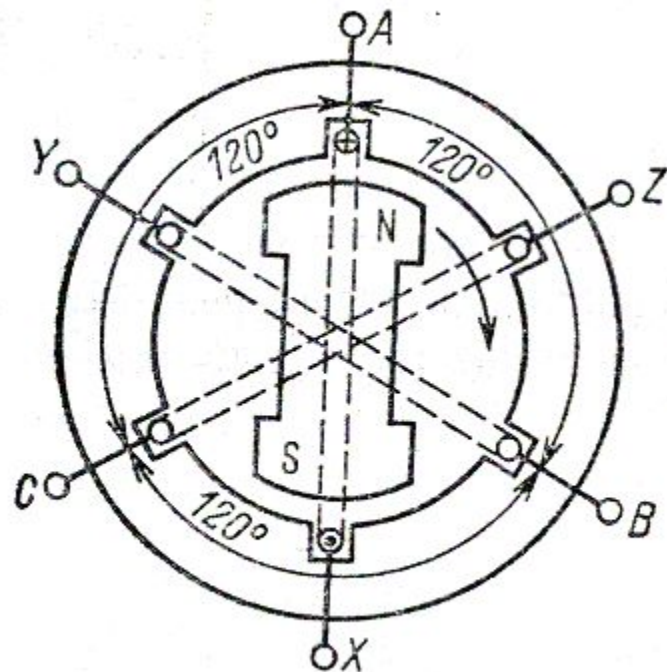
$$\dot{E}_B = E \cdot e^{j(-120^\circ)}$$

$$\dot{E}_C = E \cdot e^{j(-240^\circ)}$$



2.Получение и преимущества

- **Получение**
- Три ЭДС индуктируются в трех неподвижных обмотках (А-Х;В-У;С-З),
- размещённых в пазах статора трёхфазного генератора
- под углом 120° относительно друг друга,
- при вращении ротора, например, в виде постоянного магнита.



Широкое применение в промышленности.

Преимущества

- ❖ **меньший расход материала соединительных проводов при одинаковой мощности с однофазной системой;**
- ❖ **простота, надежность и экономичность трёхфазных генераторов, двигателей и трансформаторов;**
- ❖ **возможность иметь у потребителей два уровня напряжения, например, 220 и 380 В.**

3. Схемы соединений

- -основные: «звезда» -Y и «треугольник» - Δ

❖ При «Y» - концы обмоток X,Y,Z объединяют в одну точку – нулевую N (нейтральную)

- – основная схема для генераторов.

•Различают

□ фазные ЭДС (напряжения) $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$

□ линейные $\dot{E}_{AB}, \dot{E}_{BC}, \dot{E}_{CA}$

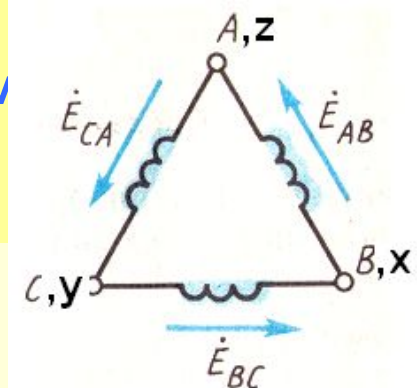
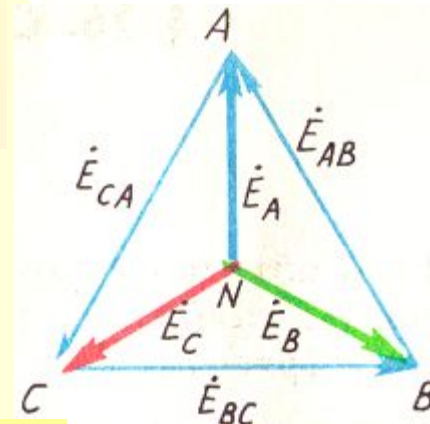
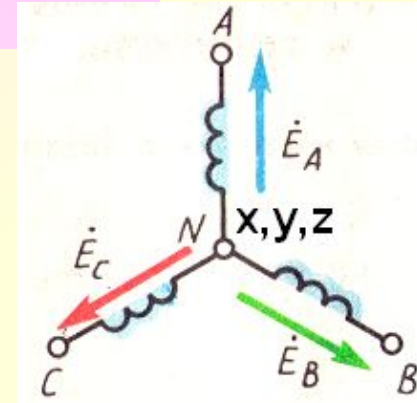
- Соотношения между фазными и линейными ЭДС (из равнобедренного треугольника, например ANB)

$$E_l = 2E_\phi \cos 30^\circ = 2E_\phi \cdot \sqrt{3} / 2 = \sqrt{3}E_\phi$$

Стандартом предусмотрена шкала линейных напряжений 127, 220, 380, 660 В и т.д.

❖ При «Δ» - конец первой обмотки X соединяют с началом B другой обмотки, конец второй Y – с началом C третьей, конец Z третьей обмотки с началом A первой обмотки.

$$E_l = E_\phi$$



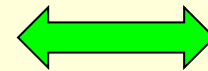
4. Характер нагрузки

Симметричная – комплексы равны



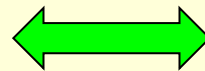
$$\bar{Z}_A = \bar{Z}_B = \bar{Z}_C$$

Равномерная – модули равны



$$Z_A = Z_B = Z_C$$

Однородная

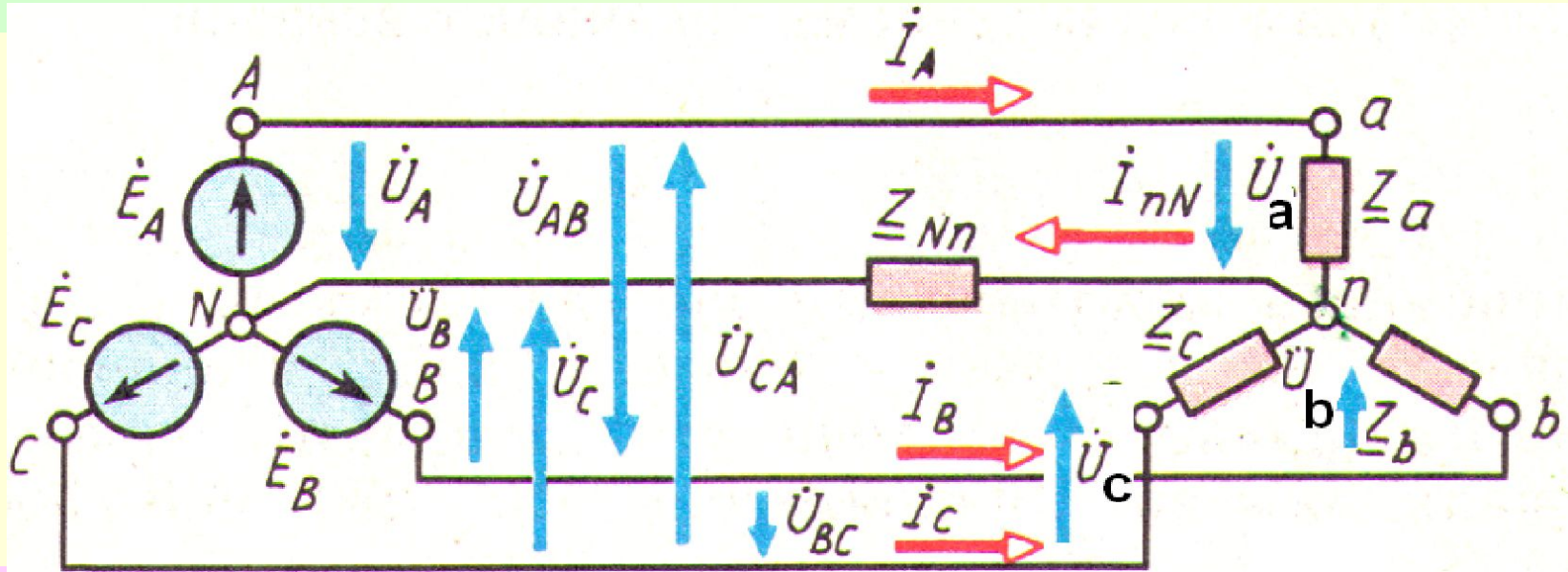


Во всех фазах нагрузка одного рода R,L или C

5. Режим работы трехфазной ЭЦ

- Симметричный - симметричен источник (почти всегда) и симметрична нагрузка.
- Рассчитывается только одна фаза (как в однофазных ЭЦ)!
- Несимметричный - несимметричная нагрузка
- Необходимо рассчитывать три фазы.

6.Соединение Y/Y с нулевым проводом



- Четырехпроводная система.
- Нейтральные точки приемника n и генератора N соединены **нейтральным проводом**.
- **Линейные провода** – А-а, В-в, С-с.
- **Фазные напряжения** генератора и нагрузки равны $\dot{U}_A = \dot{U}_a$; $\dot{U}_B = \dot{U}_b$; $\dot{U}_C = \dot{U}_c$ (при равенстве нулю сопротивления линейных и нейтрального провода Z_{Nn}).
- **Линейные напряжения** – между линейными проводами \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA}
- К приемнику подводятся два напряжения – **линейное и фазное**.

$$U_l = \sqrt{3} U_\phi$$

- Число соединительных проводов уменьшается с 6 (для 3-х однофазных источников и нагрузок) до 4 или 3

7. Токи в схеме Y/Y с нулевым проводом

- Если $Z_{Nn}=0$, то $\phi_N = \phi_n$ – в схеме - 3 обособленных контура.
- Расчет как в 1 фазной ЭЦ.

• Токи

$$\begin{matrix} \boxed{I_A = \frac{E_A}{Z_a}} & \boxed{I_B = \frac{E_B}{Z_b}} & \boxed{I_C = \frac{E_C}{Z_c}} \end{matrix} \Rightarrow \boxed{I_N = I_A + I_B + I_C}$$

При симметричной нагрузке $Z_a = Z_b = Z_c = z_\phi e^{j\varphi} = \bar{Z}$

$$I_A = \frac{E_\phi e^{j0}}{ze^{j\varphi}} = \left(\frac{E_\phi}{z} \right) e^{-j\varphi} = I_\phi e^{-j\varphi}$$

$$I_B = \frac{E_\phi e^{-j120}}{ze^{j\varphi}} = I_\phi e^{-j(120+\varphi)}$$

$$I_C = \frac{E_\phi e^{-j240}}{ze^{j\varphi}} = I_\phi e^{-j(240+\varphi)}$$

Токи в фазах по модулю равны и сдвинуты на 120°

Ток в нейтральном проводе

$$I_N = I_A + I_B + I_C = I_\phi e^{-j\varphi} (e^{j0} + e^{-j120} + e^{-j240}) = I_\phi e^{-j\varphi} [1 + (-0,5 - j0,5\sqrt{3}) + (-0,5 + j0,5\sqrt{3})] = 0$$

$$I_{nN} = 0 !!!$$

Для Y $I_\lambda = I_\phi$

При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе равен 0 и он может быть исключен – трехпроводная линия – для питания ЭП

При несимметричной нагрузке – ток $I_N \neq 0$, но $U_{фн} = U_{фг}$,

Преимущество: при нейтральном проводе напряжение на нагрузке выравнивается. Используют для осветительной нагрузки.

8.Соединение Y/Y без нулевого провода

- При **несимметричной** нагрузке

$$\bar{Z}_a \neq \bar{Z}_b \neq \bar{Z}_c \quad \longrightarrow \quad \bar{I}_A \neq \bar{I}_B \neq \bar{I}_C$$

- возникает **разность потенциалов** для нейтральных точек n-N,
- по методу **узловых потенциалов**

$$U_{nN} = \frac{U_A \bar{Y}_A + U_B \bar{Y}_B + U_C \bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C} \quad - Y_A, Y_B, Y_C - \text{проводимости фаз нагрузки.}$$

Приводит к перекосу напряжений и токов в нагрузке – недостаток схемы.

В основном используют для симметричной нагрузки – ЭП.

Лекция

№8

9.Соединение Y/Δ

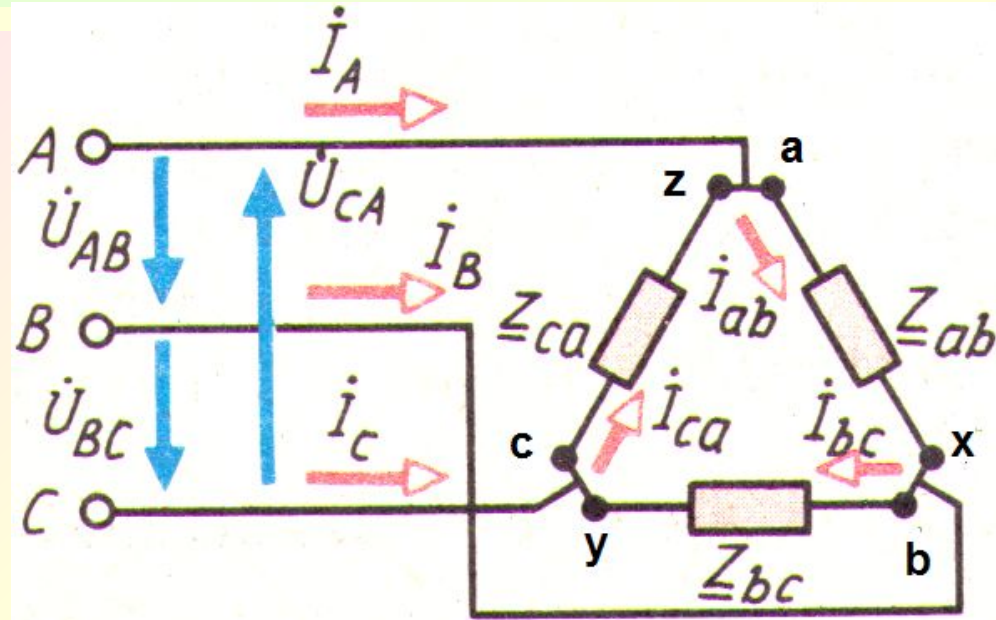
$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ –линейные токи,

$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ - фазные токи нагрузки;

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

Где $\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB} / Z_{ab};$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC} / Z_{bc}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA} / Z_{ca}$$



$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ – линейные напряжения источника;

$\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ – фазные напряжения нагрузки.

Для

$$\Delta \quad U_{лн} = U_{фн}$$

При симметричной нагрузке линейный и создающие его фазные токи образуют равносторонний треугольник

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{ф}$$

Никаноров В.Б.

10. Мощность трехфазной сети

- 3х-фазная ЭЦ – совокупность трех однофазных ЭЦ
- Активная и реактивные мощности 3х-фазной ЭЦ равна сумме мощностей отдельных фаз

- $P = P_a + P_b + P_c$
- $Q = Q_a + Q_b + Q_c$

- Полная мощность

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

$$S \neq S_a + S_b + S_c$$

В комплексной форме

$$\tilde{S} = P + jQ = \tilde{S}_a + \tilde{S}_b + \tilde{S}_c$$

При симметричной нагрузке

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

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin\phi$$

$$S = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi$$

Через линейные токи и напряжения

Y →

$$3U_\phi I_\phi = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell$$

Δ →

$$3U_\phi I_\phi = 3U_\ell \frac{I_\ell}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell$$

Для Y и Δ →

$$P = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell \cos\phi$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell \sin\phi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_\ell I_\ell$$

Для симметричной нагрузки

Схема соединений	Y	Δ
Линейное напряжение	$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$	$U_{л} = U_{\phi}$
Линейный ток	$I_{л} = I_{\phi}$	$I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$
Активная мощность	$P = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \cos \varphi$	
Реактивная мощность	$Q = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi$	
Полная мощность	$S = \sqrt{3}U_{л} I_{л}$	

11. Измерение мощности

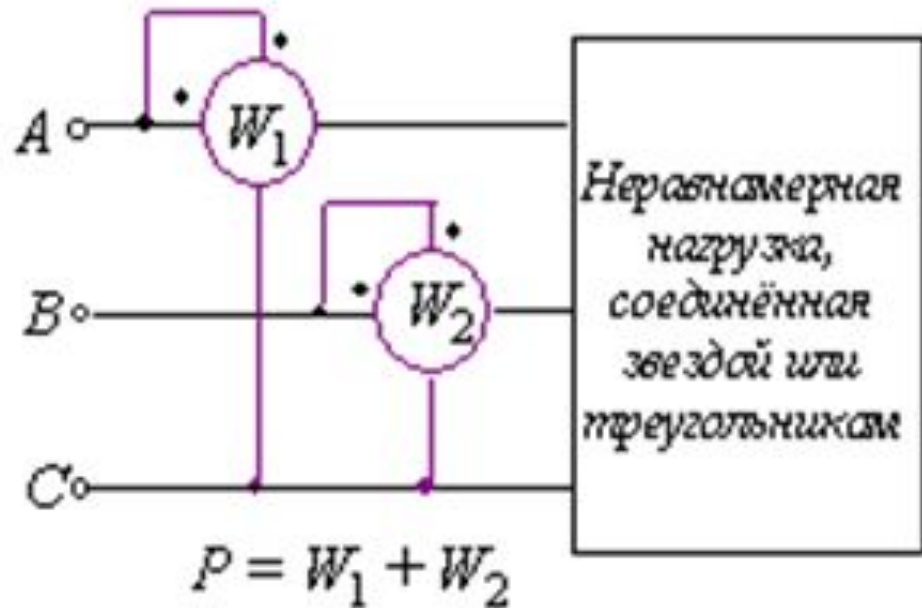
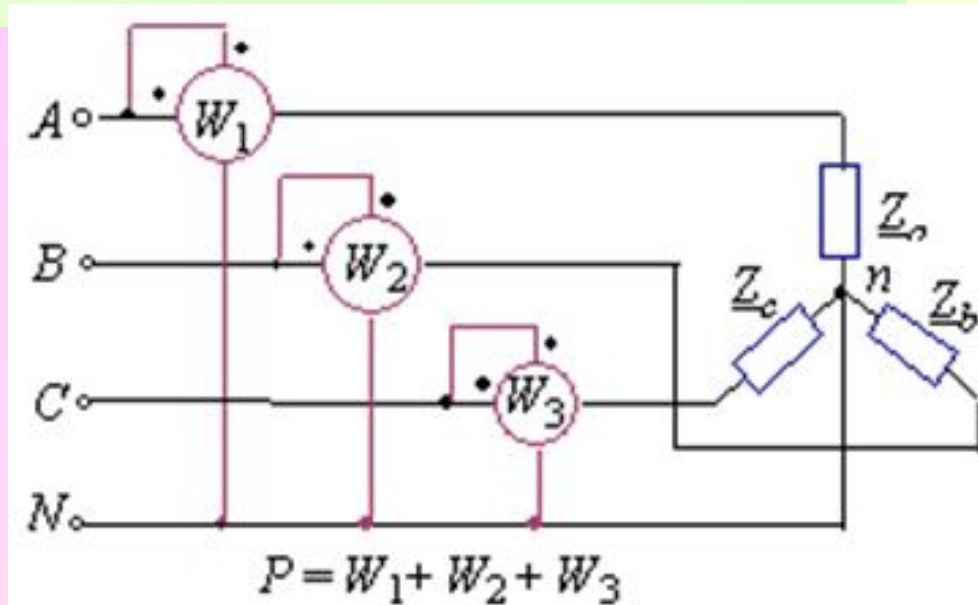
- Для измерения мощности при любой нагрузке и наличии нулевого провода нужно **3 ваттметра**.

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

- При отсутствии нулевого провода используют метод **двух ваттметров**

$$P = P_{W1} + P_{W2}$$

- алгебраическая сумма



Пример

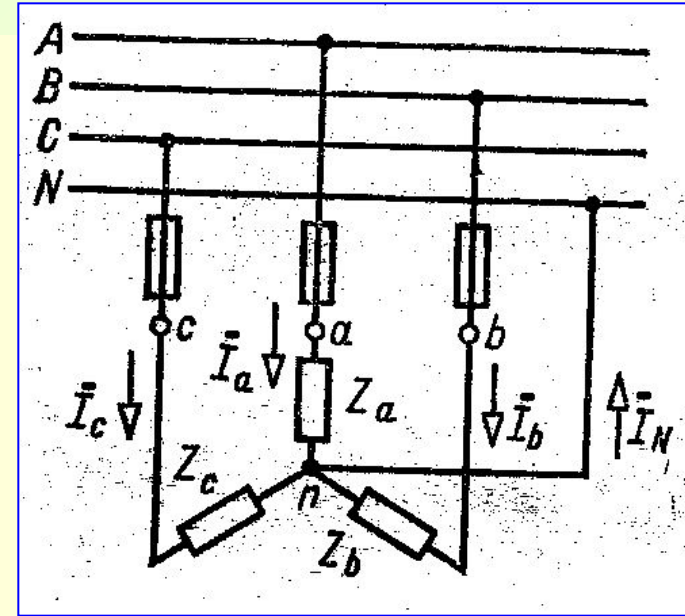
- **Дано:** $U_{л}=380\text{В}$, симметричная нагрузка $R_{\phi}=3\text{Ом}$, $X_{\phi}=4\text{Ом}$.
- **Найти:** токи?
- **Решение:**
- **1.** Т.к. нагрузка симметричная, то достаточен расчет одной фазы.
- **2.** Комплексное сопротивление фазы

$$\bar{Z}_{\phi} = z_{\phi} e^{j\varphi} = 3 + j4 = 5e^{j53,1^{\circ}}$$

3. Токи фаз

$$\bar{I}_a = \frac{U_a}{\bar{Z}_{\phi}} = \frac{220e^{j0}}{5e^{j53,1^{\circ}}} = 44e^{-j53,1^{\circ}}$$

- 4.** Ток $\bar{I}_{Nn} = 0$ т.к. нагрузка симметричная



Пример

- **Дано:** В предыдущей схеме в фазе А сгорел предохранитель.
- **Найти:** Вычислить токи в других фазах и нейтральном проводе.

• **Решение:**

• **1. Ток фазы В**

$$\begin{aligned} \vec{I}_b &= \frac{\vec{U}_b}{\bar{Z}_\phi} = \frac{220e^{-j120}}{5e^{j53,1}} = 44e^{-j173,1} = \\ &= 44[\cos 173,1 - j \sin 173,1] = 44(-0,993 - j0,12) \end{aligned}$$

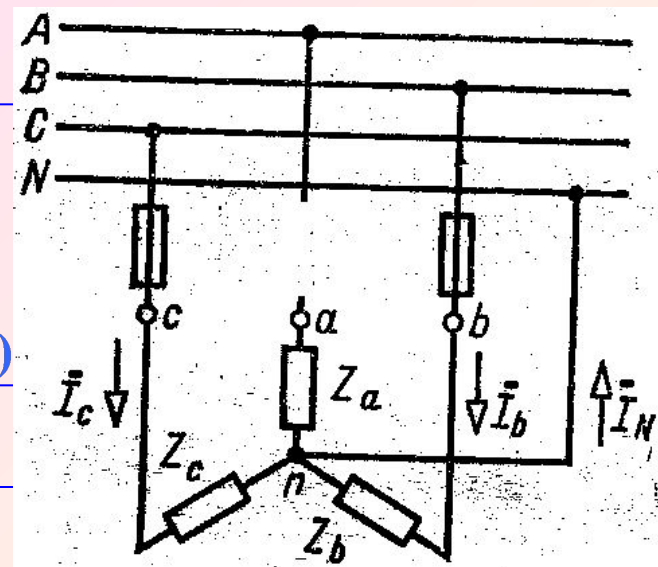
• **2. Ток фазы С**

$$\begin{aligned} \vec{I}_c &= \frac{\vec{U}_c}{\bar{Z}_\phi} = \frac{220e^{-j240}}{5e^{j53,1}} = 44e^{-j293,1} = \\ &= 44[\cos 293,1 - j \sin 293,1] = 44(0,392 + j0,92) \end{aligned}$$

• **3. Ток в нейтральном проводе**

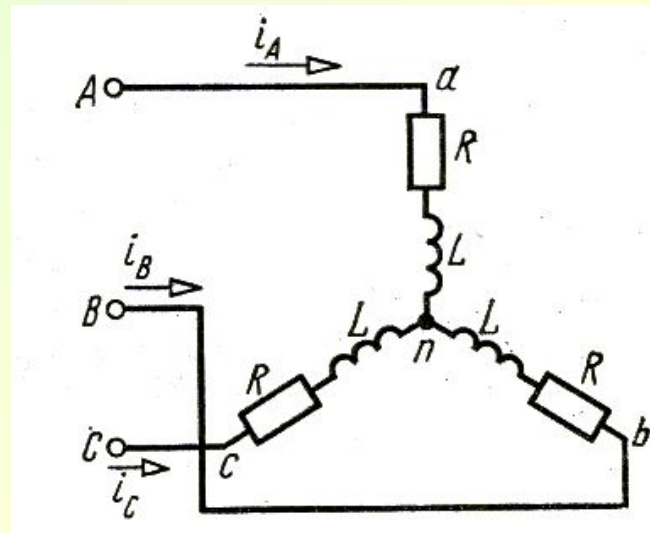
$$\vec{I}_{Nn} = \vec{I}_b + \vec{I}_c = 44(-0,6 + j0,8) = 44e^{-j53}$$

Никаноров В.Б.



Пример

- **Дано:** Активная мощность симметричной нагрузки $P = 2900$ Вт, $\cos\varphi = 0.6$, $U_{\phi} = 127$ В.
- **Определить:** параметры нагрузки R и L и ток в линейных проводах.
- **Решение:**
- 1. Приемник симметричный, фазные напряжения приемника и генератора равны между собой. Достаточно определить ток и параметры одной фазы.



- 2. Мощность одной фазы
- $P_{\phi} = P/3 = U_{\phi} \cos\varphi$.
- Откуда ток

$$I = \frac{P}{3U \cos\varphi} = \frac{2900}{3 \cdot 127 \cdot 0,6} = 12,7 \text{ A}$$

3. Полное сопротивление фазы нагрузки

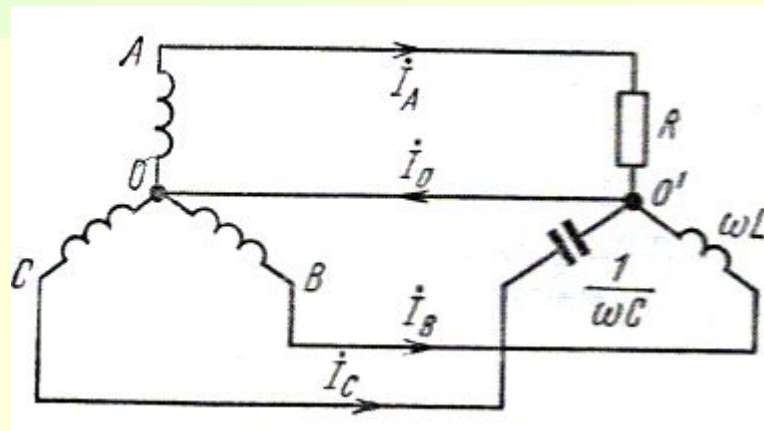
$$Z = U_{\phi} / I = 127 / 12,7 = 10 \text{ A}$$

4. Параметры нагрузки

$$R = z \cdot \cos\varphi = 10 \cdot 0,6 = 6 \text{ Ом} \quad X_L = z \cdot \sin\varphi = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ Ом.}$$

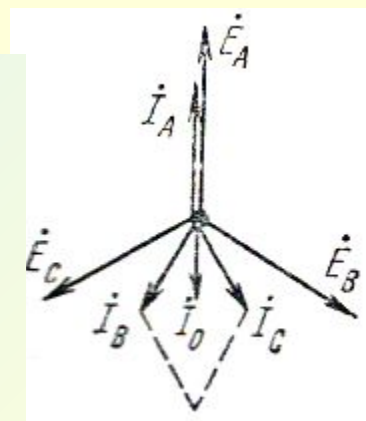
Пример

- **Дано:** в схеме ЭДС каждой фазы генератора равна 127 В. Сопротивления нагрузки равны по величине 6,35 Ом, но имеют разный характер $Z_a = R$; $Z_b = j\omega L$; $Z_c = -j/\omega C$.
- **Определить** ток в нулевом проводе.



Решение.

1. Построим векторную диаграмму.
2. Токи всех фаз по модулю равны $I_{\phi} = E_{\phi} / z_{\phi} = 127 / 6,35 = 20 \text{ A}$.
3. Ток в фазе А совпадает с E_A по фазе, i_B отстает от E_B на 90° , i_C опережает E_C на 90° (при вращении векторов против часовой стрелки).
4. Сумма $i_A + i_B + i_C = i_0$
- По модулю этот ток равен



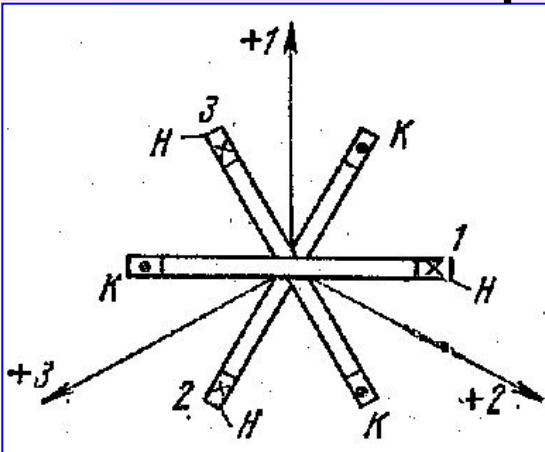
$$I_0 = 2 \cdot I_{\phi} \cdot \cos 30^\circ - I_{\phi} = 2 \cdot 20 \cdot 0.866 - 20 = 14.64 \text{ A.}$$

11. Получение кругового вращающегося

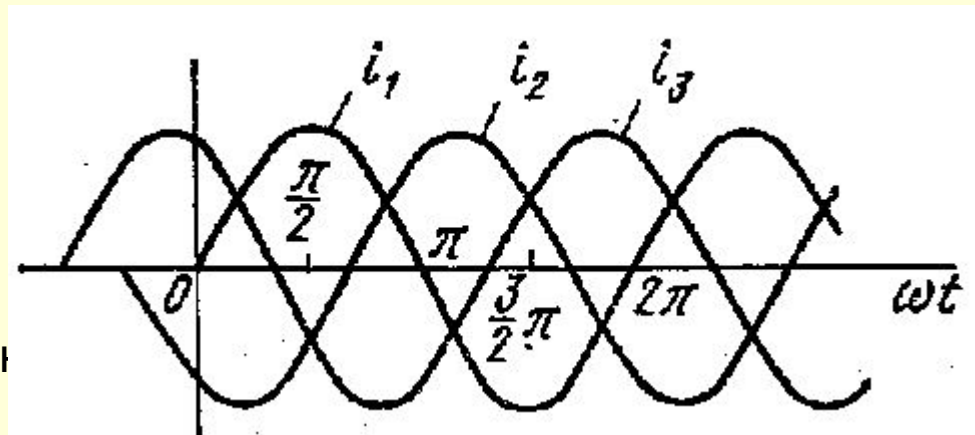
- Важнейшее свойство трехфазной системы токов
- Используется в электрических машинах переменного тока – асинхронных и синхронных ЭМ.
- Круговое вращающееся магнитное поле – магнитное поле, вектор результирующей индукции которого неизменен и вращается с постоянной угловой скоростью ω .
- Расположим 3 одинаковых катушки так, что оси их смещены на 120° по отношению друг к другу.
- По катушкам протекает трехфазная система токов (от Н к К катушек)

$$i_1 = I_m \sin \omega t; i_2 = I_m \sin(\omega t - 120^\circ); i_3 = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

- Каждый из токов создает пульсирующее магнитное поле, положительное направление соответствует +1, +2, +3



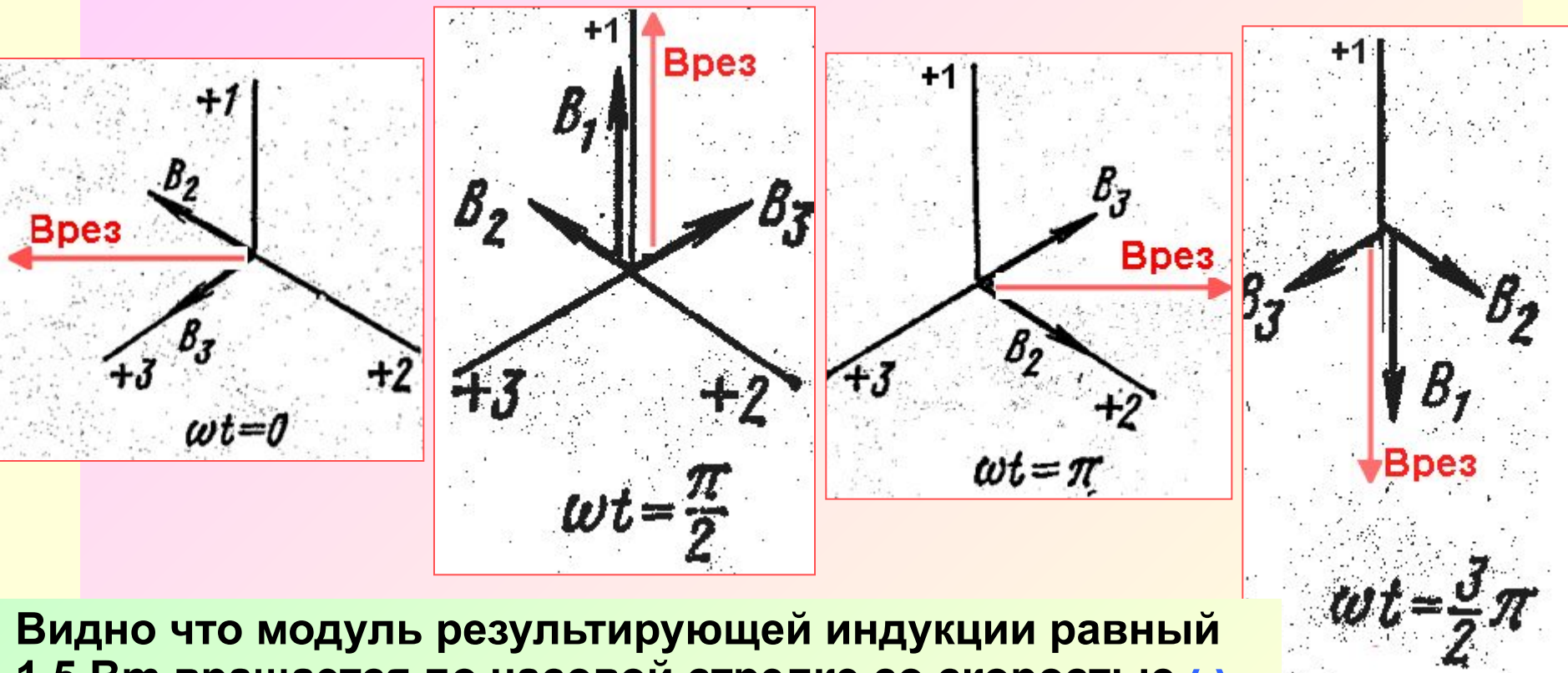
Никал



- Магнитные индукции катушек

$$B_1 = B_m \sin \omega t; B_2 = B_m \sin(\omega t - 120^\circ); B_3 = B_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

• Мгновенные значения B_1, B_2, B_3 и результирующей индукции $B_{рез}$ для нескольких моментов времени.



Видно что модуль результирующей индукции равный $1,5 B_m$ вращается по часовой стрелке со скоростью ω

• Вращающееся магнитное поле лежит в основе принципа действия асинхронных двигателей