

Электрические трёхфазные цепи

Содержание

1. Основные понятия и определения
2. Получение трехфазной системы ЭДС
3. Соединение обмоток генератора и фаз приемника звездой
4. Трехфазный приемник, соединенный по схеме «звезда» (симметричный)
5. Трехфазный приемник, соединенный по схеме «звезда» (несимметричный)
6. Соединение фаз приемника звездой с нейтральным проводом
7. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником
8. Определение мощностей и коэффициента мощности 3-х фазного приемника
9. Получение вращающегося магнитного потока
10. Подключение приемников к трехфазной сети

Основные понятия и определения

Трехфазной электрической цепью называется совокупность трех однофазных цепей (фаз), в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на 120° и индуцированные в одном источнике энергии.

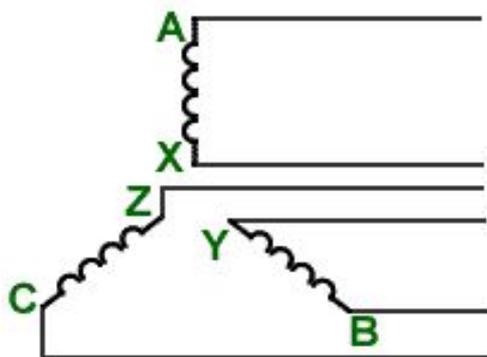
Трехфазная система была разработана в 1891г. М. О. Доливо-Добровольским. Она нашла широкое распространение во всем мире. В настоящее время вся электроэнергия вырабатывается на электростанциях трехфазными генераторами, передается к местам потребления по трехфазным линиям передачи и основная ее доля используется в трехфазных приемниках.

Преимущества трехфазной системы основываются, по мнению М. О. Добровольского, на ее свойствах:

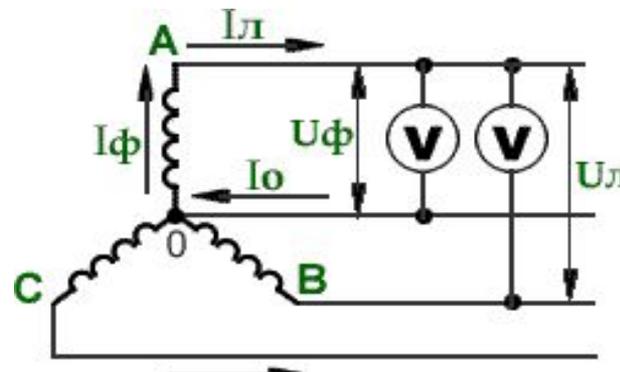
- экономичная передача электроэнергии на большие расстояния (экономия цветного металла на линии электропередач);
- превосходное качество трехфазных двигателей;
- получение двух эксплуатационных напряжений.

Отдельная цепь трехфазной системы, по которой протекает один и тот же ток называется **фазой**.

Маркировка фаз: начала – А, В, С; концы – X, Y, Z.



а)



б)

Получение трехфазных ЭДС

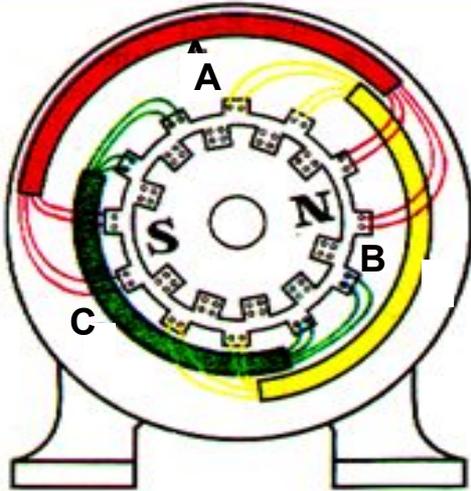
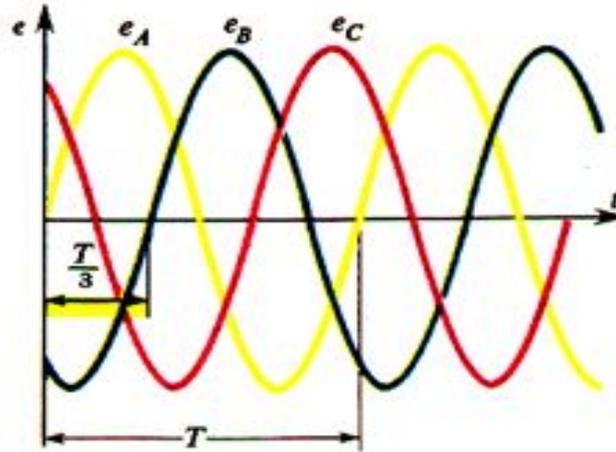
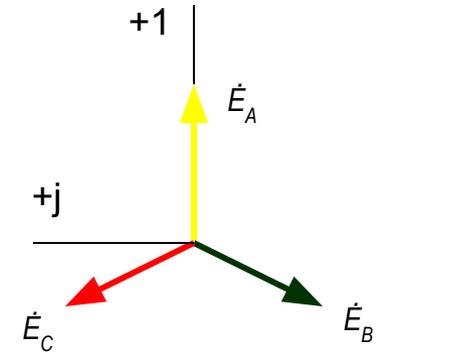


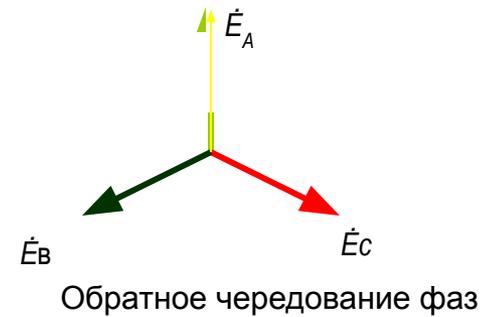
Схема устройства трехфазного генератора



Кривые мгновенных значений эдс трехфазной системы



Прямое чередование фаз



Обратное чередование фаз

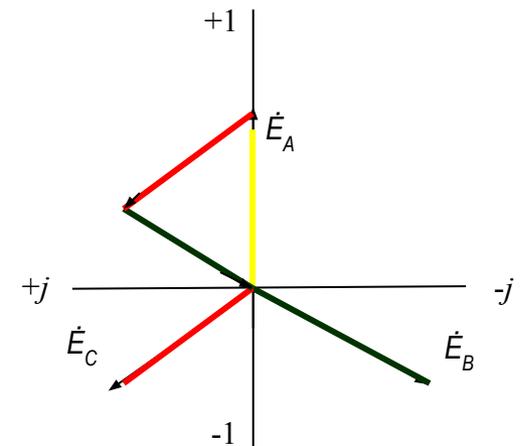
Приняв начальную фазу ЭДС фазы А равной 0, получаем:

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

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

$$e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

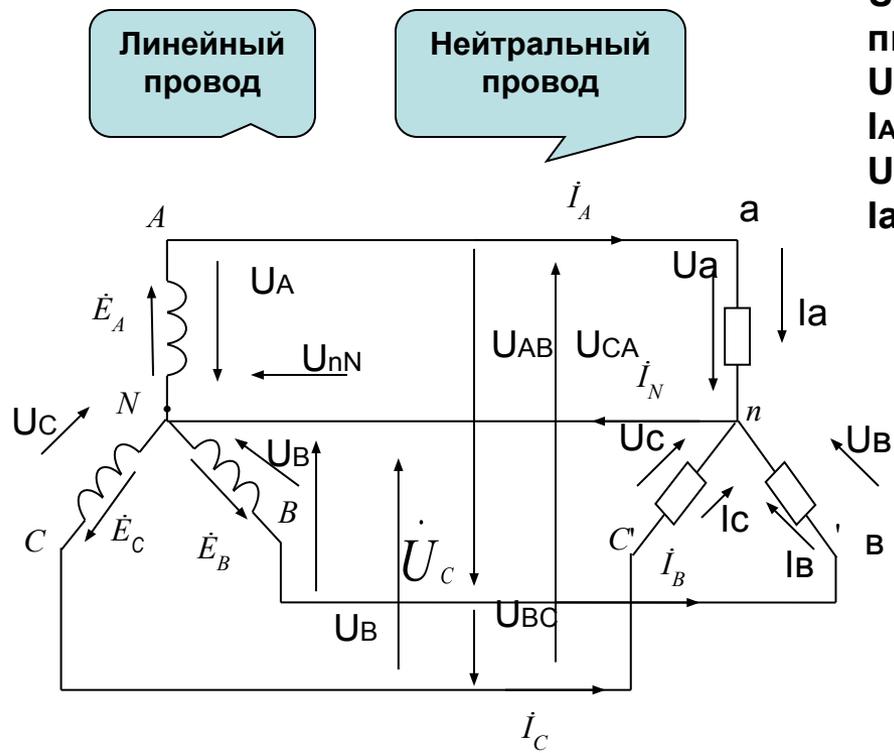
$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E e^{j0} \\ \dot{E}_B &= E e^{-j120} \\ \dot{E}_C &= E e^{+j120} \end{aligned}$$



При симметричной системе векторная сумма ЭДС равна нулю:

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

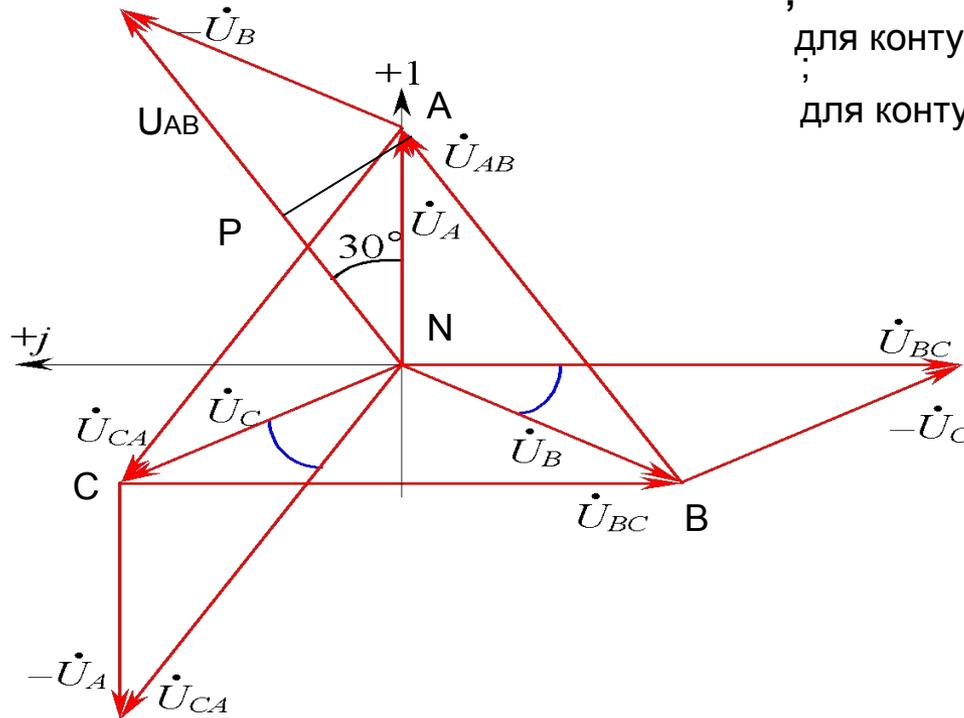
Соединение обмоток фаз генератора и приемника по схеме "звезда"



U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения источника питания;
 U_A, U_B, U_C – фазные напряжения источника питания;
 I_A, I_B, I_C – линейные токи;
 U_a, U_b, U_c – фазные напряжения приемника
 I_a, I_b, I_c – фазные токи приемника

$$I_{л} = I_{ф}$$

Соотношения между линейным и фазным напряжениями источника питания



для контура ANBA: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$
 ;
 для контура BNCB: $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$
 ;
 для контура CNAC: $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$

Из ΔNAP

$$|AB| = U_{AB} = 2U_A \cos 30^\circ,$$

$$U_{л} = 2\sqrt{3} U_{\phi} / 2 = \sqrt{3} U_{\phi}$$

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$$

$$\dot{U}_A = U_{\phi} e^{j0}$$

$$\dot{U}_B = U_{\phi} e^{-j120^\circ}$$

$$\dot{U}_C = U_{\phi} e^{+j120^\circ}$$

$$\dot{U}_{AB} = U_{л} e^{+j30^\circ}$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{л} e^{-j90^\circ}$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{л} e^{+j150^\circ}$$

В промышленности пользуются напряжением 127, 220 и 380 В.

В высоковольтных линиях электропередачи применяют напряжение 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 400 кВ, 500 кВ и более.

В низковольтных установках применяются, как правило, четырехпроводные линии электропередачи, а в высоковольтных - трехпроводные. Четырехпроводные линии удобны при совместном электропитании силовых и осветительных потребителей.

Электродвигатели, например, подключаются к трем линейным проводам, а осветительные приборы - к одному линейному и нулевому проводам.

При электроснабжении жилых домов в них вводят четырехпроводный кабель. В квартиры же подается один нулевой провод и один линейный. При этом линейные провода чередуются от квартиры к квартире. Это необходимо для того, чтобы наиболее равномерно загрузить сеть по фазам.

Трехфазный приемник, соединенный по схеме "звезда"

Симметричный трехфазный приемник это приемник, у которого комплексные сопротивления фаз равны между собой т.е.

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c \quad Z_a = Z_b = Z_c, \quad \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c.$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0.$$

Согласно схеме четырехпроводной системы:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a + \dot{U}_{nN} - \dot{U}_A &= 0, \\ \dot{U}_b + \dot{U}_{nN} - \dot{U}_B &= 0, \\ \dot{U}_c + \dot{U}_{nN} - \dot{U}_C &= 0. \end{aligned}$$

Напряжения фаз приемника:

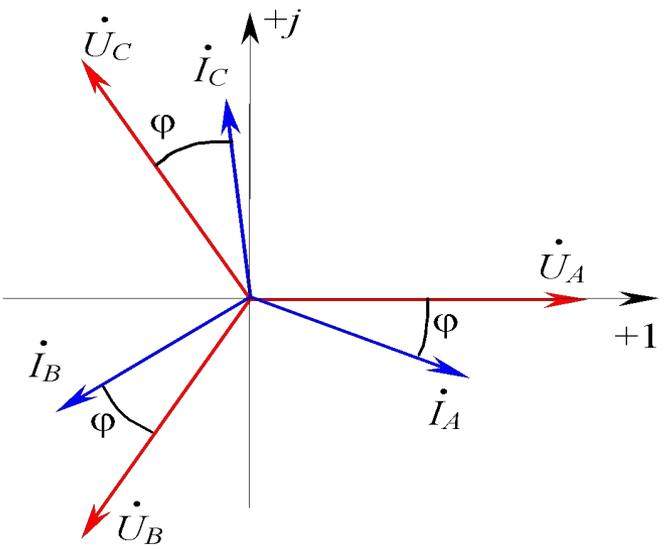
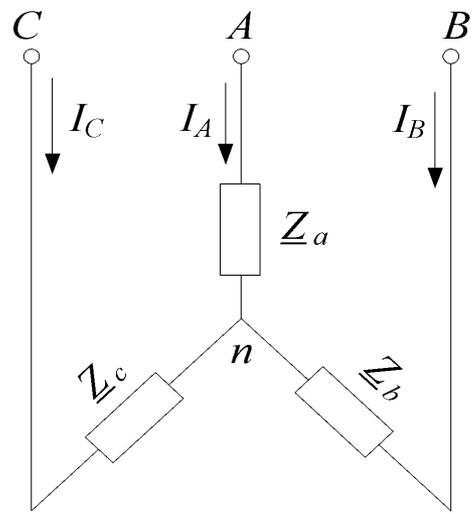
$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \end{aligned}$$

Так как $U_{nN} = 0$, то

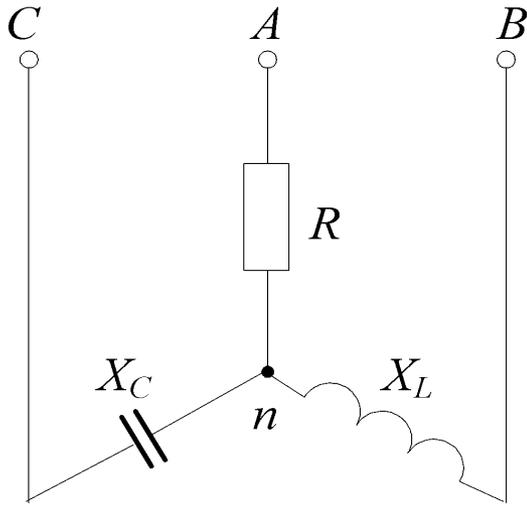
$$\dot{U}_a = \dot{U}_A \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C$$

Фазные токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{U}_a / \underline{Z}_a \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c \\ \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c &= 0 \end{aligned}$$



Несимметричный трехфазный приемник – это приемник, у которого комплексные сопротивления фаз не равны между собой, т.е.



$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c, \phi_a \neq \phi_b \neq \phi_c$ – общий случай,
 $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c, \phi_a \neq \phi_b \neq \phi_c$ – равномерная несимметричная,
 $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c, \phi_a = \phi_b = \phi_c$ – однородная несимметричная.

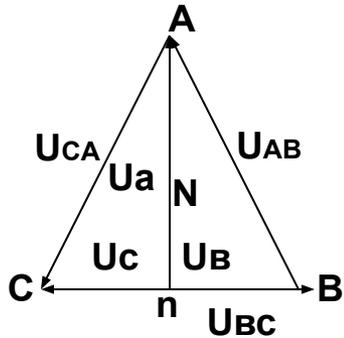
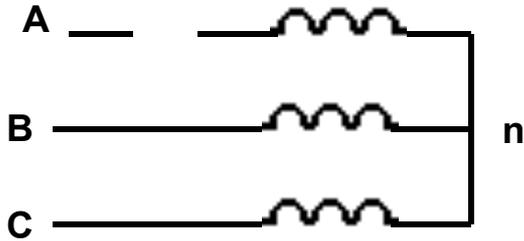
Проводимости фаз:

$$\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a = 1/R$$

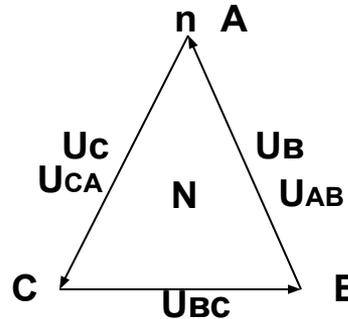
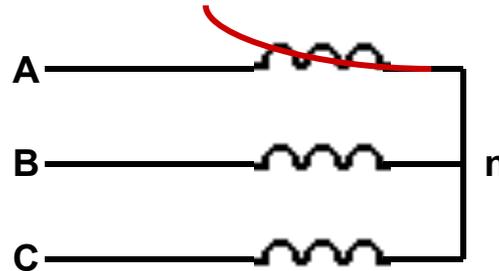
$$\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b = 1/(X_L e^{+j90^\circ})$$

$$\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c = 1/(X_C e^{-j90^\circ})$$

Обрыв фазы «А»



Короткое замыкание фазы «А»



Напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{nN} = (\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c) / (\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c),$$

Фазные напряжения:

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

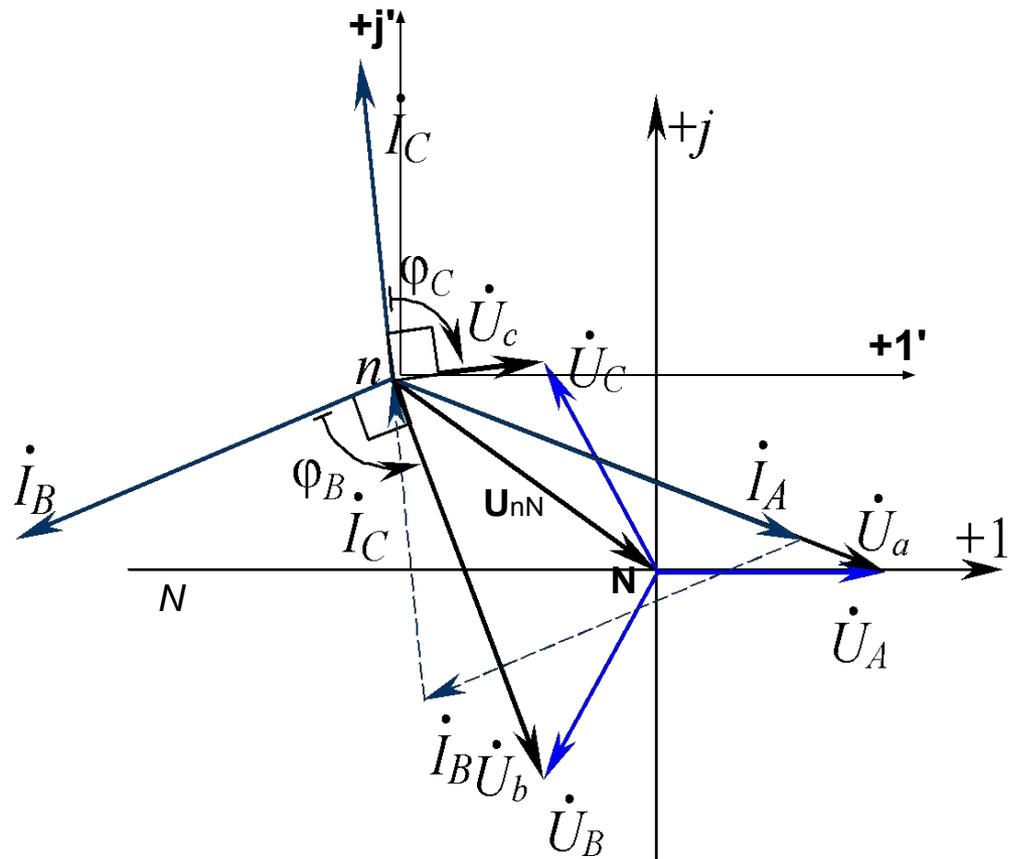
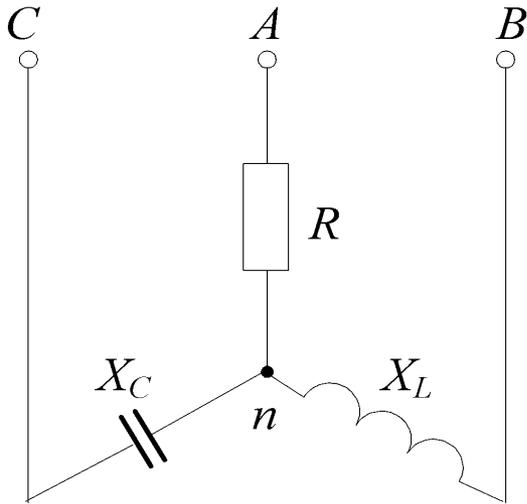
$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}$$

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

Токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c$$

Векторная диаграмма электрической цепи при несимметричной нагрузке

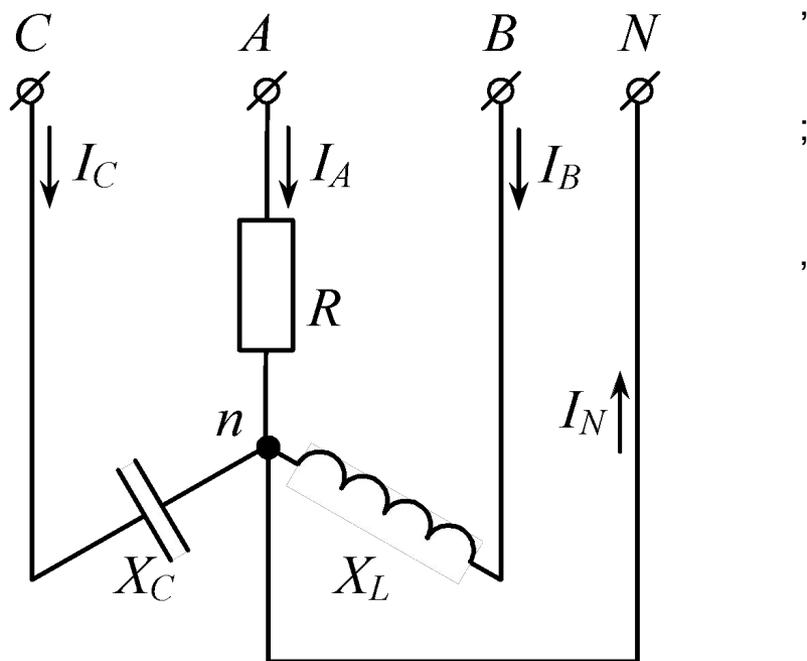


Асимметрия нагрузки в трехпроводной сети приводит к перекосу фазных напряжений, что недопустимо. Поэтому трехпроводная система при несимметричной нагрузке и схеме «звезда» не применяется.

Соединение фаз приемника "звездой" с нейтральным проводом

Для выравнивания фазных напряжений приемника необходимо получить значение напряжения между нейтральными точками генератора и приемника равное 0. Это возможно при включении нейтрального провода между нейтралями генератора и приемника. Сопротивление этого провода не более 4 Ом.

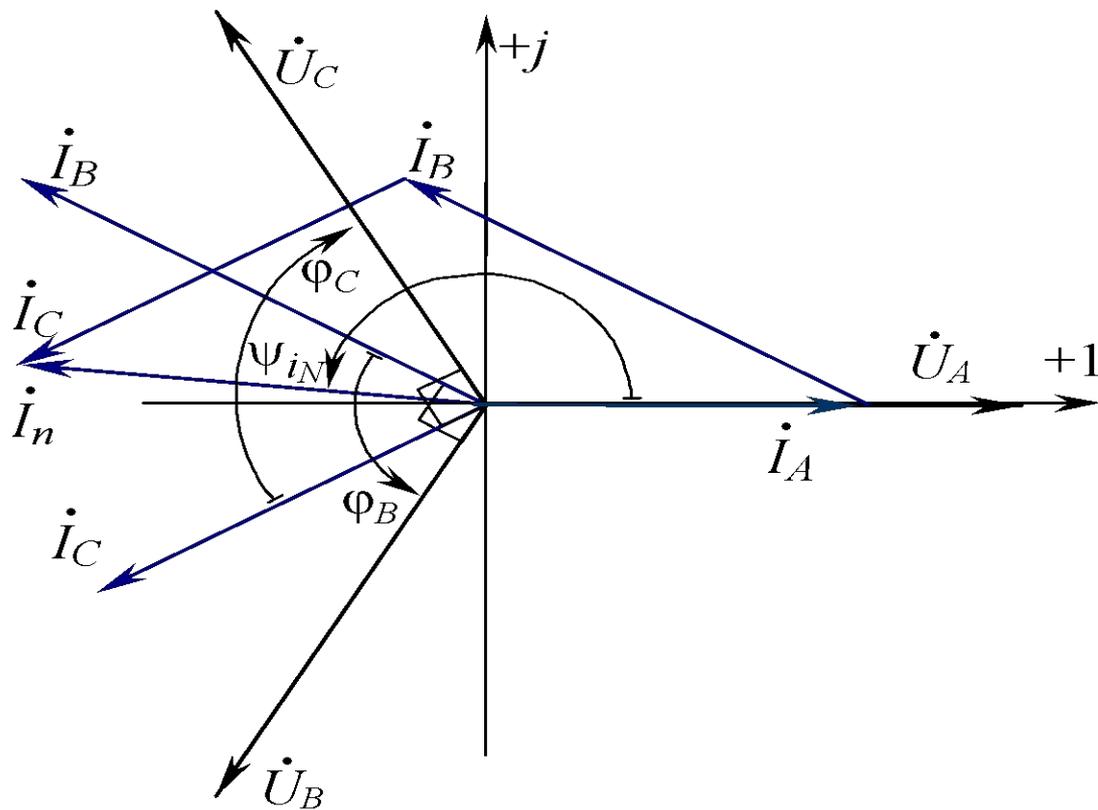
$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_{nN}} = 0$$



Тогда:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C\end{aligned}$$

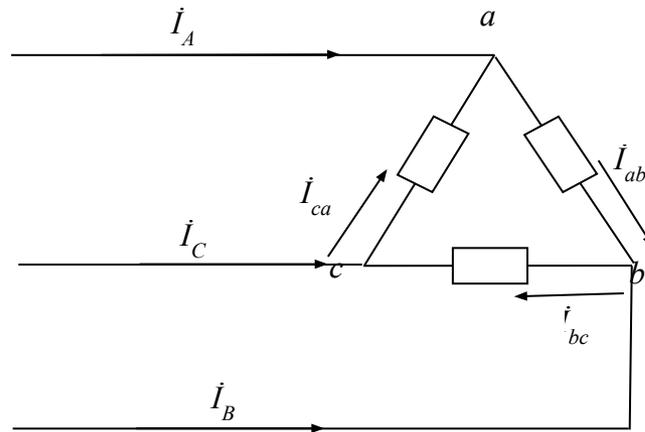
Векторная диаграмма несимметричного трехфазного приемника с нейтральным проводом



Ток нейтрального провода

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

Соединение обмоток генератора и фаз приемника по схеме "треугольник"



$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф.}}$$

$$\begin{aligned} I_{ca} - I_{ab} + I_A &= 0; \\ I_{ab} - I_{bc} + I_B &= 0; \\ I_{bc} - I_{ca} + I_C &= 0. \end{aligned}$$

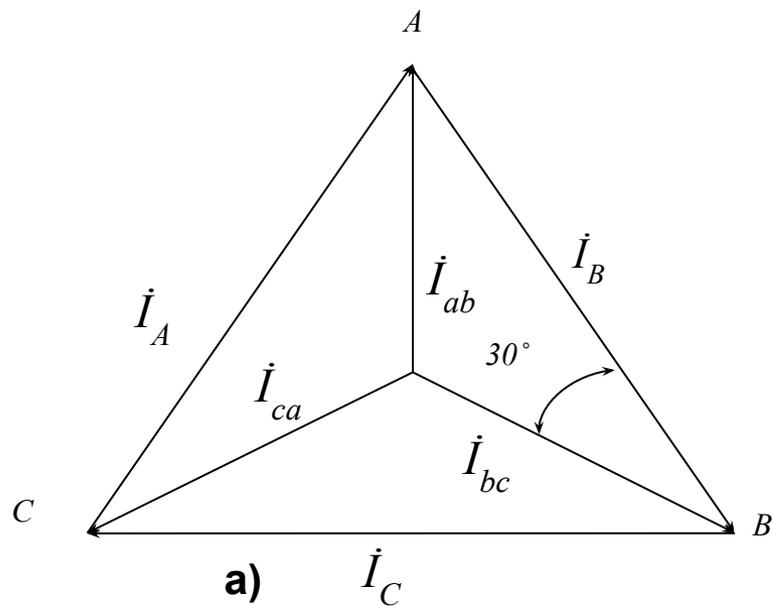


Линейные токи:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{ab} - I_{ca}; \\ I_B &= I_{bc} - I_{ab}; \\ I_C &= I_{ca} - I_{bc}. \end{aligned}$$

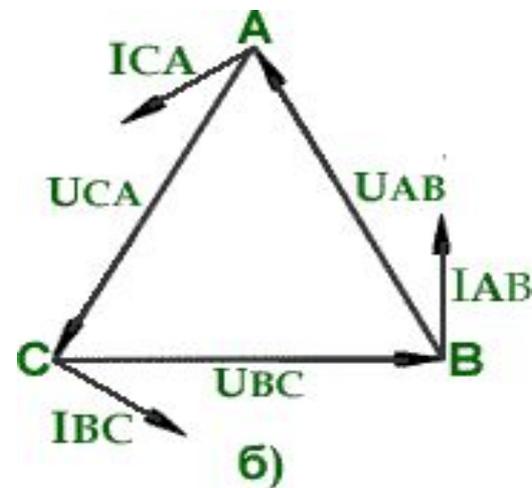


$$I_A + I_B + I_C = 0.$$



Векторная диаграмма токов

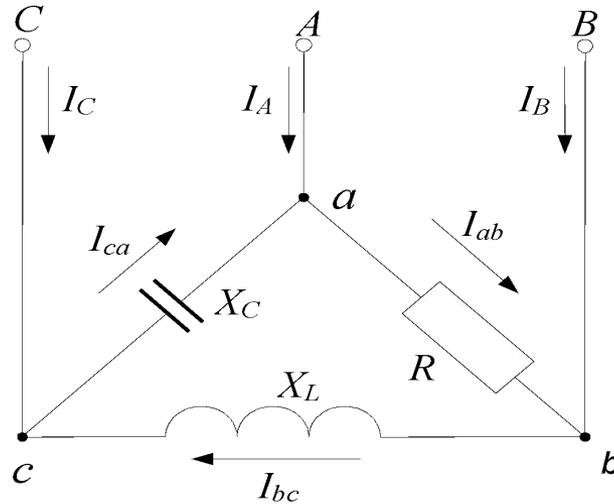
$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\Phi}$$



Векторная диаграмма приемника при активно-индуктивной нагрузке

Несимметричная нагрузка при соединении фаз приемника по схеме "треугольник"

Трехпроводная система. При соединении треугольником $U_\Delta = U_\Phi$, а линейные напряжения источника всегда симметричны. Поэтому соединение треугольником применяется в трехпроводных системах при любой нагрузке, как симметричной, так и несимметричной, если номинальное напряжение приемника равняется линейному напряжению источника питания.



$$\underline{Z}_{ab} = R e^{j0}$$

$$\underline{Z}_{bc} = X_L e^{+j90^\circ}$$

$$\underline{Z}_{ca} = X_C e^{-j90^\circ}$$

Примем $\psi_{AB} = 0^\circ$

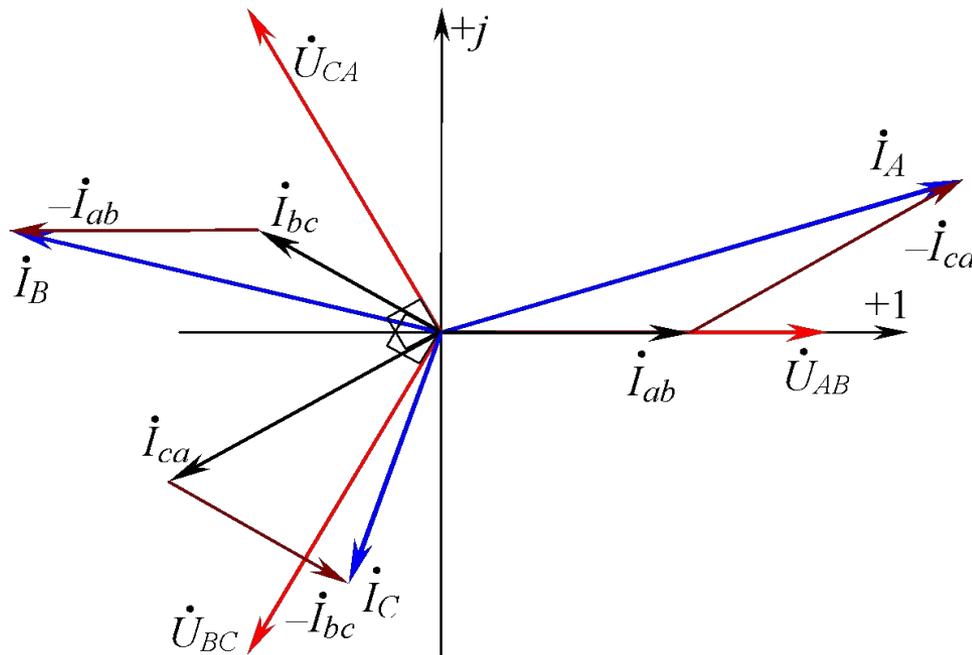
$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{U_\Phi e^{j0}}{R e^{j0}} = I_{ab} e^{j0}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{-\underline{Z}_{bc}} = \frac{U_\Phi e^{-j120^\circ}}{Z e^{j90^\circ}} = I_{bc} e^{-j210^\circ}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{-\underline{Z}_{ca}} = \frac{U_\Phi e^{+j120^\circ}}{Z e^{-j90^\circ}} = I_{ca} e^{+j210^\circ}$$

Векторная диаграмма напряжений, фазных и линейных токов при несимметричной нагрузке

Для построения векторной диаграммы на комплексной плоскости сначала строятся векторы линейных напряжений, затем векторы фазных токов и по ним определяются графически линейные токи, которые должны совпасть с расчетными по модулю и аргументу.



$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

Определение мощности и коэффициента мощности трехфазного приемника

**При симметричной нагрузке фаз
приемника:**

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$$

Полная мощность S , ВА:

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{лл} I_{л}$$

Активная мощность P , Вт:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos\varphi = \sqrt{3} U_{лл} I_{л} \cos\varphi$$

Реактивная мощность Q , вар:

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin\varphi = \sqrt{3} U_{лл} I_{л} \sin\varphi$$

Коэффициент
мощности

$$\cos\varphi = P/S$$

**При несимметричной нагрузке
фаз**

$$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$$

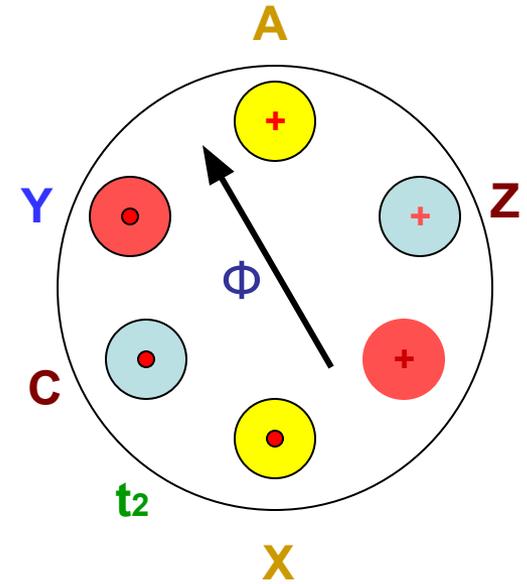
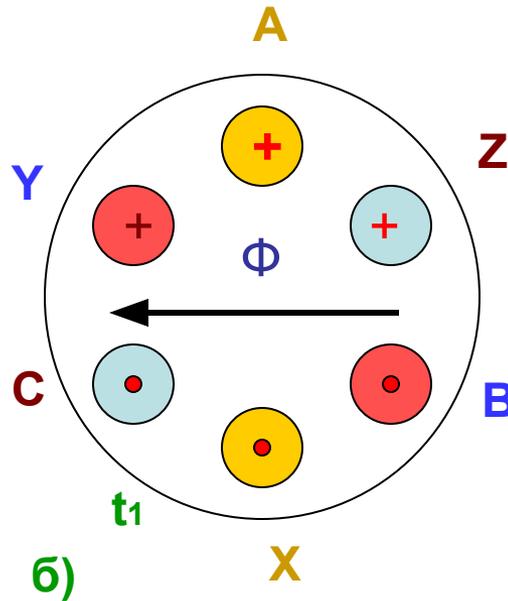
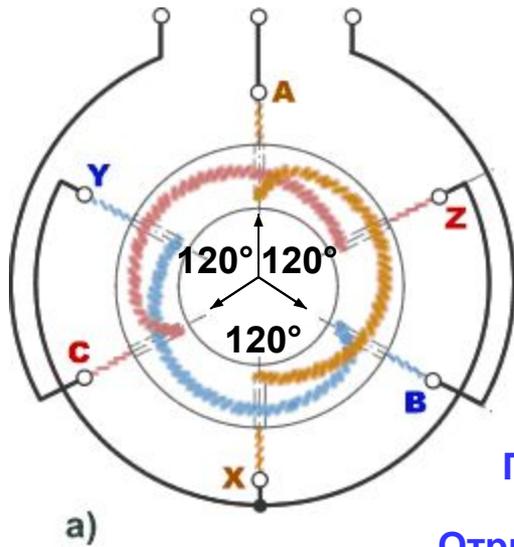
Полная мощность трехфазной цепи определяется как геометрическая сумма мощностей фаз:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА}$$

Активная мощность: $P = P_a + P_b + P_c, \text{ Вт}$

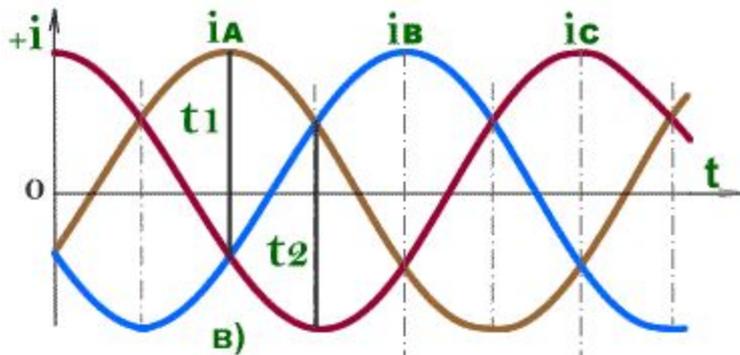
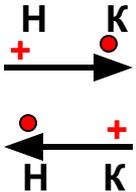
Реактивная мощность $Q = \pm Q_a \pm Q_b \pm Q_c, \text{ вар}$

Получение вращающегося магнитного потока



Положительное направление тока от начала к концу фазы

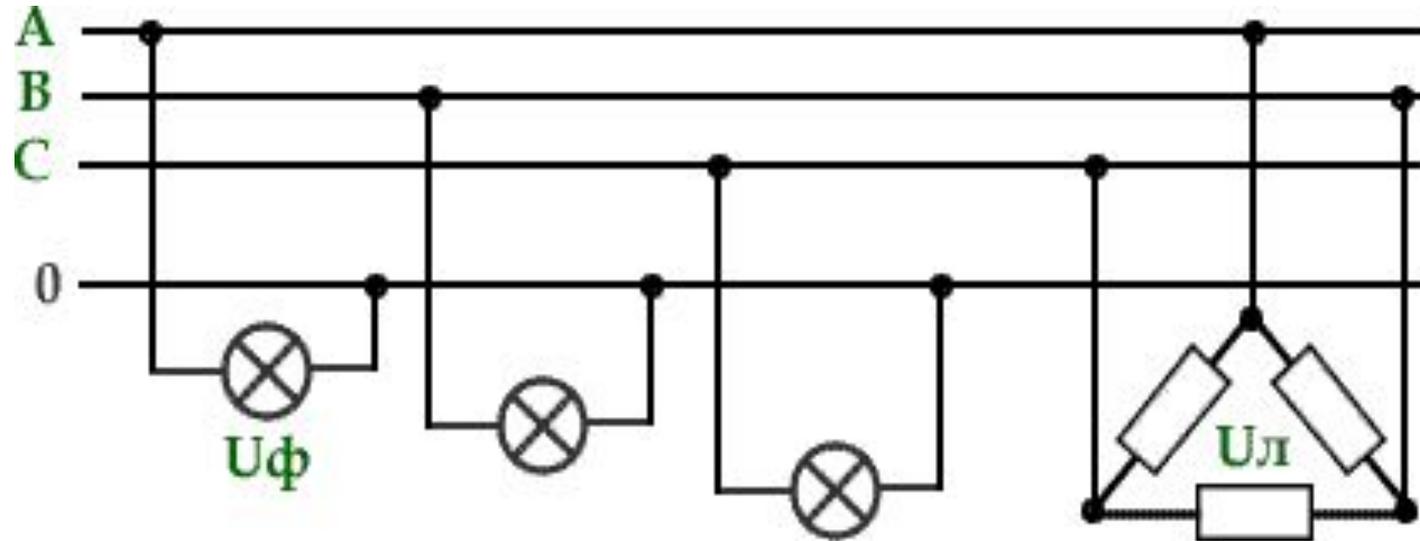
Отрицательное направление тока от конца к началу фазы



Условия возникновения вращающегося магнитного потока:

1. пространственный сдвиг катушек;
2. разные начальные фазы токов катушек

Подключение приемников к трехфазной сети



Задача .

В четырехпроводную сеть с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ $\psi_{U_a} = 0$, включен трехфазный приемник, соединенный по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Комплексные сопротивления фаз приемника:

$$\underline{Z}_a = 3 + j4; \quad \underline{Z}_b = 3 + j5,2; \quad \underline{Z}_c = 4 + j3;$$

Найти комплексные токи в линейных и нейтральном проводах.

Решение.

Фазное напряжение, В:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127$$

Комплексные фазные напряжения, В:

$$\underline{U}_a = 127e^{j0^\circ}; \quad \underline{U}_b = 127e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_c = 127e^{-j240^\circ} = 127e^{+j120^\circ};$$

Комплексные линейные токи равны соответственно комплексным фазным токам, А:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{127e^{j0^\circ}}{\sqrt{3^2 + 4^2} e^{j \arctg \frac{4}{3}}} = \frac{127e^{j0^\circ}}{5e^{j53^\circ}} = 25,4e^{-j53^\circ}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{\sqrt{3^2 + 5,2^2} e^{j \arctg \frac{5,2}{3}}} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{6e^{j60^\circ}} = 21,2e^{-j180^\circ}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{127e^{j120^\circ}}{\sqrt{4^2 + 3^2} e^{j \arctg \frac{3}{4}}} = \frac{127e^{j120^\circ}}{5e^{j37^\circ}} = 25,4e^{j83^\circ}$$

Комплексный ток в нейтральном проводе, А:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 25,4e^{-j53^\circ} + 21,2e^{-j180^\circ} + 25,4e^{j83^\circ}$$

$$\begin{aligned} \vec{I}_N &= (25,4 \cos(-53^\circ) + j25,4 \sin(-53^\circ)) + (21,2 \cos(-180^\circ) + j21,2 \sin(-180^\circ)) + \\ &+ (25,4 \cos 83^\circ + j25,4 \sin 83^\circ) = -2,81 + j4,9 = 5,9e^{j120} \end{aligned}$$

Задачи

1. К трехфазной линии с $U_{л} = 220$ В подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме: а) «звезда» с нейтральным проводом; б) «треугольник». Сопротивления фаз приемника $R_a = 10$ Ом, $R_b = 3$ Ом, $X_b = 4$ Ом, $X_C = -10$ Ом. Определить линейные и фазные токи, активную, реактивную, полную мощности трехфазного приемника, коэффициент мощности. Построить векторную диаграмму напряжений и токов на комплексной плоскости.
2. К трехфазной линии с $U_{л} = 220$ В подключен симметричный трехфазный приемник, активная потребляемая мощность которого $P = 5$ кВт, $\cos\varphi = 0,6$. Определить токи приемника при соединении фаз по схеме «звезда», «треугольник». Определить сопротивление фазы приемника. Построить совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений
3. Приемник соединен по схеме «звезда» с нейтральным проводом. В фазу A включен реостат R , в фазу B – катушка L , в фазу C – конденсатор C . Начертите электрическую схему и построить векторную диаграмму токов и напряжений.
4. Вычертите электрическую схему и построить векторную диаграмму напряжений и токов для трехфазного приемника, соединенного по схеме «треугольник», если в первую фазу включен элемент с параметром L , во вторую – с параметром C , в третью – с параметром R .