

# ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

## Общие сведения

- Многофазными цепями называются цепи переменного тока, в которых действуют многофазные системы ЭДС.
- Любая из цепей многофазной системы, где действует одна ЭДС, называется фазой. В зависимости от числа фаз цепи бывают однофазные, двухфазные, трехфазные, шестифазные и т.д.
- Наибольшее распространение получили трехфазные системы. История их возникновения и развития связана с изобретением М.О. Доливо-Добровольским трехфазного асинхронного двигателя и трехфазного трансформатора.
- Трехфазной называют совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но сдвинутые по фазе одна относительно другой на угол  $120^\circ$ .
- Трехфазные системы имеют ряд преимуществ перед другими системами (однофазными и многофазными):
- -они позволяют легко получить вращающееся магнитное поле (на этом основан принцип работы разных двигателей переменного тока).
- -трехфазные системы наиболее экономичны (за счет меньшей длины проводов), имеют высокий КПД.
- -конструкция трехфазных двигателей, генераторов и трансформаторов наиболее проста, что обеспечивает их высокую надежность.
- -один трехфазный генератор позволяет получать два различных (по величине) напряжения (220В и 380В).
- Современные электрические системы, состоящие из генераторов, электростанций, трансформаторов, линий передачи электроэнергии и распределительных сетей, представляют собой в подавляющем числе случаев трехфазные системы переменного тока.
- Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии. Каждая из цепей, входящих в трехфазную цепь, принято называть фазой. В данном случае не следует путать понятие фазы в многофазной системе с понятием начальной фазы синусоидальной величины.
- .
- Трехфазная цепь включает в себя источник (генератор) трехфазной ЭДС, проводники, потребители (приемники) трехфазной электрической энергии.

# ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

## Общие сведения

- Основой электроснабжения потребителей электрической энергии является трехфазная система токов. Эта система по сравнению с однофазной обладает рядом преимуществ:
- а) обеспечивает получение кругового вращающегося магнитного поля, которое необходимо для работы двигателей переменного тока;
- б) в одной электроустановке существуют две системы различных напряжений – фазное и линейное;
- в) осуществляет эффективную передачу электрической энергии на большие расстояния.

# Трехфазные линейные электрические цепи синусоидального тока

Многофазными цепями называются цепи переменного тока, в которых действуют многофазные системы ЭДС. Любая из цепей многофазной системы, где действует одна ЭДС, называется фазой.

Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии. Каждая из цепей, входящих в трехфазную цепь, принято называть фазой. В данном случае не следует путать понятие фазы в многофазной системе с понятием начальной фазы синусоидальной величины.

Трехфазные системы имеют ряд преимуществ перед другими системами (однофазными и многофазными):

- 1.-они позволяют легко получить вращающееся магнитное поле (на этом основан принцип работы разных двигателей переменного тока).
2. -трехфазные системы наиболее экономичны, имеют высокий КПД.
3. -конструкция трехфазных двигателей, генераторов и трансформаторов наиболее проста, что обеспечивает их высокую надежность.
4. -один трехфазный генератор позволяет получать два различных (по величине) напряжения (220 и 380В).

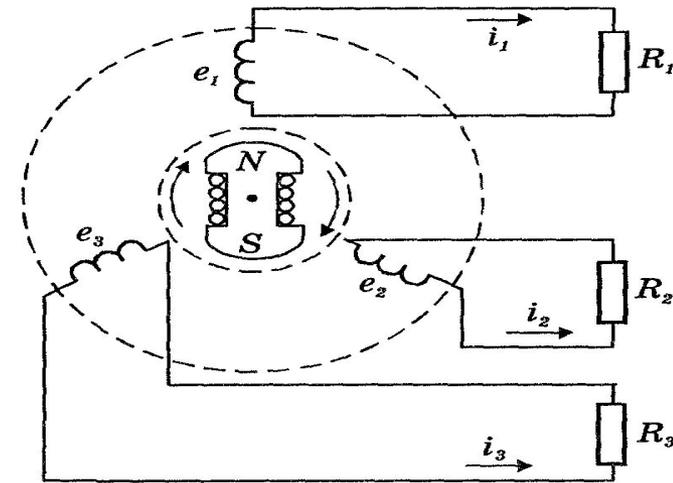
Современные электрические системы, состоящие из генераторов, электростанций, трансформаторов, линий передачи электроэнергии и распределительных сетей, представляют собой в подавляющем числе случаев трехфазные системы переменного тока.

В зависимости от числа фаз цепи бывают однофазные, двухфазные, трехфазные, шестифазные и т.д. Трехфазные цепи более экономичны чем однофазные.

Трехфазная цепь включает в себя источник (генератор) трехфазной ЭДС, проводники, потребители (приемники) трехфазной электрической энергии.

# Получение трехфазного напряжения

- Трёхфазную систему эдс получают при помощи трёхфазного генератора, у которого три неподвижные обмотки (А, В, С), сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  размещаются в пазах на статоре (неподвижная часть электрической машины).
- В центре статора вращается электромагнит - ротор (вращающаяся часть электрической машины). Магнитное поле создаётся током обмотки, расположенной на роторе (для этого через щётки и кольца к концам этой обмотки подаётся постоянное напряжение от специального источника постоянного тока.)

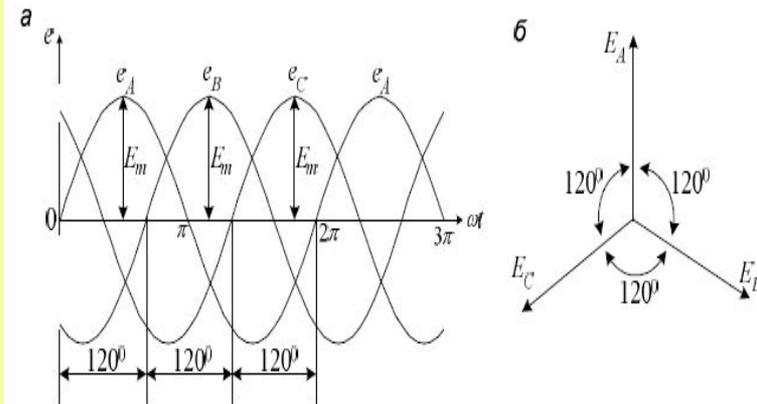


При вращении ротора его магнитное поле пересекает обмотки статора и в них по закону электромагнитной индукции индуктируются синусоидальные эдс:

$$e_A = Em \sin(\omega t); \quad e_B = Em \sin(\omega t - 120^\circ);$$

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

где  $Em$  - амплитудное значение эдс во всех трёх фазах;  $\omega$  - угловая частота вращения ротора.



Сумма электродвижущих сил симметричной трехфазной системы в любой момент времени равна нулю :

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = E(1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) =$$

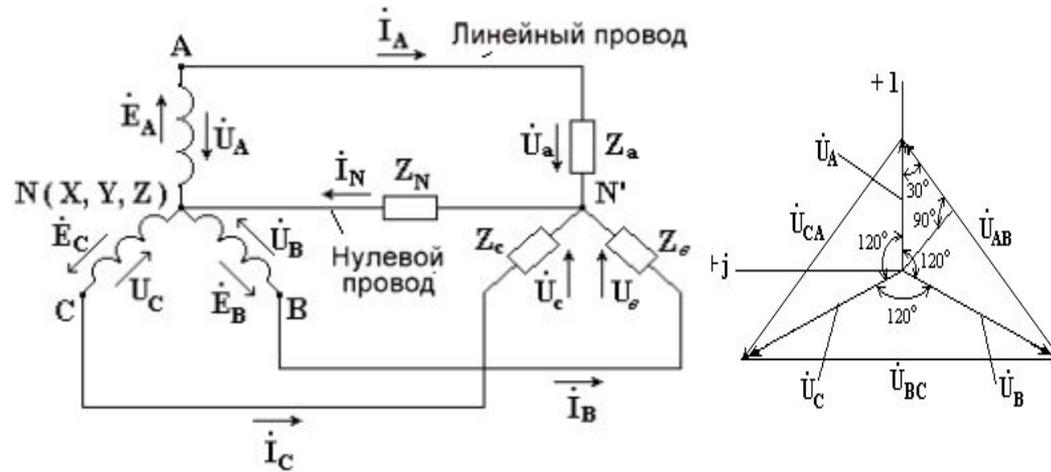
$$= E(1 + \cos 120^\circ - j \cdot \sin 120^\circ + \cos 120^\circ + j \cdot \sin 120^\circ) = E\left(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) = 0.$$

# Основных способа соединения: Звездой и треугольником

Трехфазный генератор соединенный проводами с трехфазным приемником образует трехфазную цепь. Есть два способа соединения обмоток генератора и нагрузок приемника.

## Соединение звездой

Если концы всех фаз генератора (X, Y, Z) соединить в общий узел, а начала фаз (A, B, C) соединить с нагрузкой, получится трехфазная цепь, соединенная звездой. При этом три обратных провода сливаются в один, называемый нулевым или нейтральным.



Фазными напряжениями называют напряжения между соответствующими фазными выводами и нулевым выводом  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$  - их обозначают  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$

Линейными напряжениями называются напряжение между фазными выводами  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ .

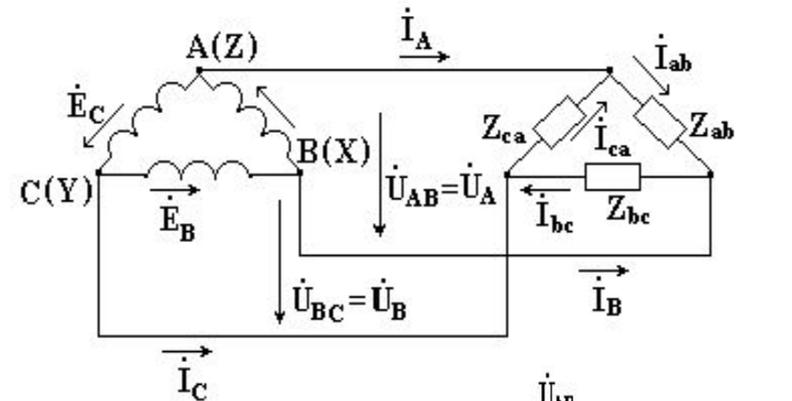
$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi \quad \text{Например, при } U_L=380 \text{ В, } U_\phi=220 \text{ В}$$

$$I_L = I_\phi.$$

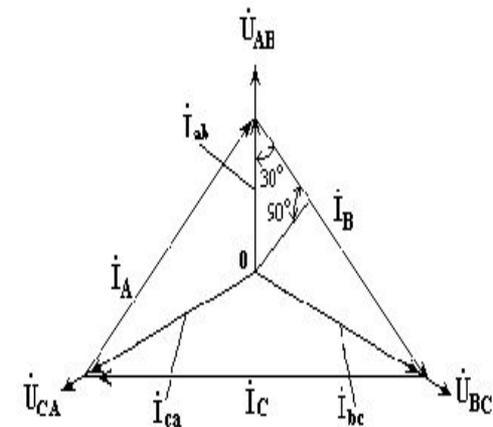
## Соединение треугольником

Если конец каждой фазы обмотки генератора соединить с началом следующей фазы, образуется соединение в треугольник. При таком соединении фазные напряжения равны линейным, а фазные токи меньше линейных в  $\sqrt{3}$  ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – линейные токи;  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$  – фазные токи)



$$U_L = U_\phi,$$

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi.$$



# Включение в трехфазную цепь приёмников электрической энергии

Трёхфазные приемники электрической энергии могут быть включены в трехфазную сеть звёздой и треугольником, рис. 4.3, а, б.

Однофазные приемники могут быть включены на фазное напряжение или на линейное напряжение, рис. 4.3, в

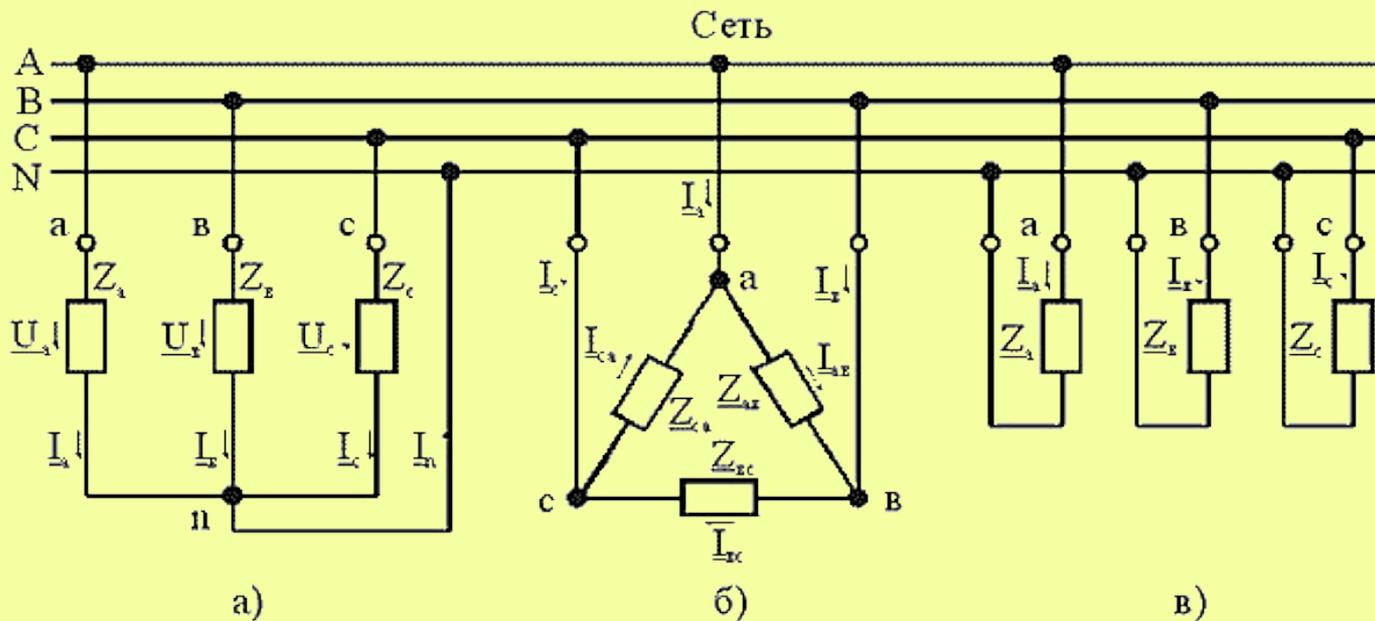


Рис. 4.3 – Схемы включения потребителей в трехфазную сеть:

а) звездой;

б) треугольником;

в) включение однофазных потребителей

Трёхфазные цепи, соединенные звездой, получили большее распространение, чем трехфазные цепи, соединенные треугольником. Это объясняется тем, что, во-первых, в цепи, соединенной звездой, можно получить два напряжения: линейное и фазное. Во-вторых, если фазы обмотки электрической машины, соединенной треугольником, находятся в неодинаковых условиях, в обмотке появляются дополнительные токи, нагружающие ее. Такие токи отсутствуют в фазах электрической машины, соединенных по схеме "звезда". Поэтому на практике избегают соединять обмотки трехфазных электрических машин в треугольник.

# Расчет цепей при соединении приемников звездой

- Рассмотрим расчёт токов потребителей  $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c, \underline{I}_n$  для схемы (рис. 4.3, а). Заданными являются модуль линейного напряжения сети  $U$  (действующее значение) и комплексные сопротивления фазных нагрузок  $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ .

Определяем фазные напряжения

$$\underline{U}_a = U_\phi; \quad \underline{U}_b = U_\phi \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_c = U_\phi \cdot e^{j120^\circ}, \quad U_\phi = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

где (при соединении звездой).

Определяем токи в фазах согласно закону Ома.

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

Согласно первому закону Кирхгофа ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости. Векторы фазных напряжений откладываем с учетом их начальных фаз ( $\psi_a = 0, \psi_b = -120^\circ, \psi_c = 120^\circ$ ). Получаем звезду фазных напряжений. Соединив вершины этой звезды, получаем треугольник линейных напряжений. Из диаграммы видно, что для симметричной системы напряжений линейные напряжения представляют тремя векторами, сдвинутыми по фазе друг относительно друга на угол  $120^\circ$ . Кроме того, векторы линейных напряжений  $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$  опережают по фазе соответственно векторы фазных напряжений  $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$  на угол  $30^\circ$ .

Следует различать направление стрелок на схеме, указывающих условное положительное направление линейных напряжений (рис. 4.2) и направление векторов на векторной диаграмме (рис. 4.4). Так вектор  $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b$  должен быть направлен к точке a.

Комплексные значения линейных напряжений запишем в виде

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a$$

Здесь  $\psi_{ab} = 30^\circ, \psi_{bc} = -90^\circ, \psi_{ca} = -210^\circ; U$  – модуль линейного напряжения

Затем в масштабе откладываем вычисленные значения токов в фазах и в нейтрали  $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c, \underline{I}_n$ .

Положения векторов фазных токов относительно векторов фазных напряжений определяются углами  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ , которые зависят от характера нагрузок потребителей  $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ . Векторная диаграмма построена для случая, когда нагрузка во всех фазах активно-индуктивная ( $\varphi > 0$ ).

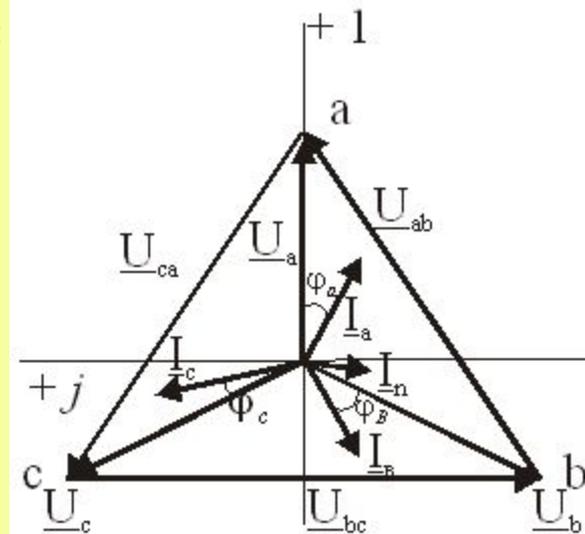
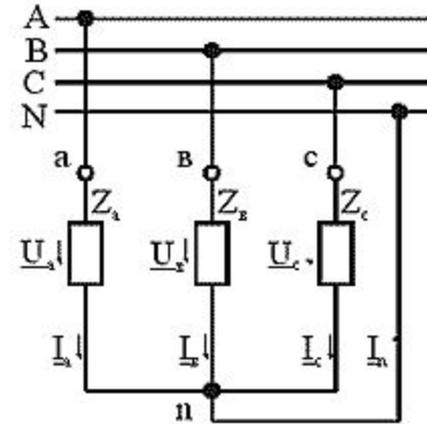
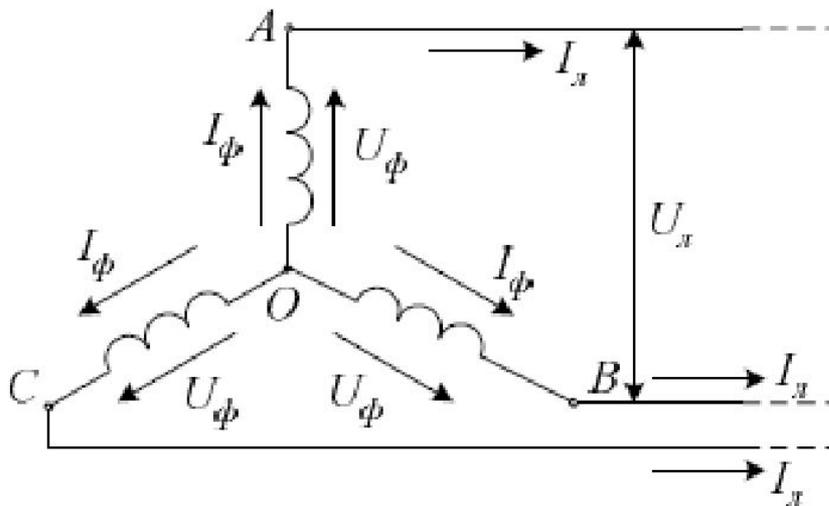


Рис. 4.4 – Векторная диаграмма токов и напряжений при соединении электроприемников звездой

# Как появляется $\sqrt{3}$

а



б

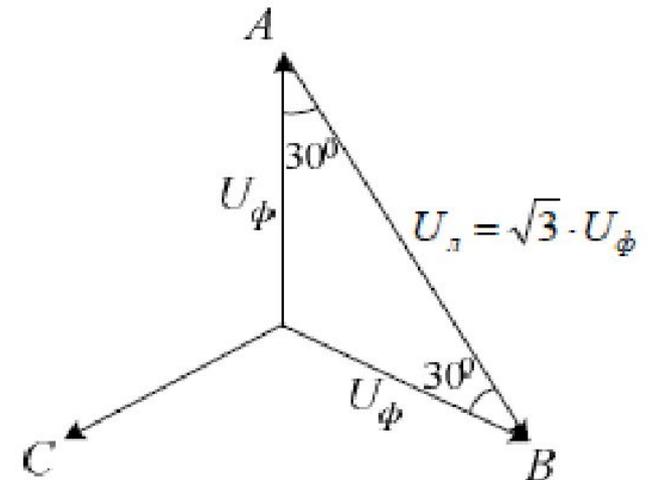


Рис. 11.6. Схема соединения генератора «звездой» (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

$$U_\lambda = U_{AB} = U_\phi \cdot 2 \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_\phi.$$

Для симметричных трёхфазных систем для любого момента времени справедливы соотношения

$$e_A + e_B + e_C = 0, \quad \overline{E}_A + \overline{E}_B + \overline{E}_C = 0.$$

На координатной плоскости изображение эдс и токов трёхфазной системы при активно-индуктивной нагрузке будет выглядеть следующим образом (рис. 11.5).

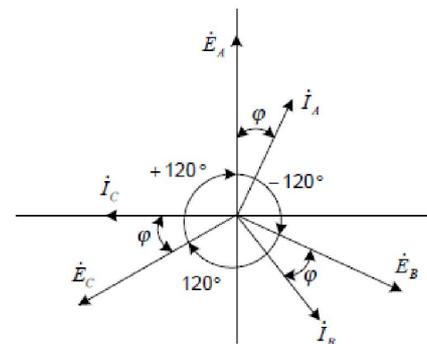


Рис. 11.5. Векторная диаграмма эдс и токов трёхфазной системы при активно-индуктивной нагрузке

# Трёхфазные цепи

		Таблица 4.1		
Напряжения	Токи	Векторная диаграмма напряжений	Схема изображения приемников	
			практическая	замещенная
Звезда с нейтральным проводом				
$U_A = U_\phi e^{j0}$ $\dot{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}$ $U_C = U_\phi e^{j120^\circ}$ $U_n = \sqrt{3}U_\phi$	$I_\phi = I_n$ $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$			
Звезда без нейтрального провода				
$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}$ $\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}$ $\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}$ $\dot{U}_{nN} = \frac{Y_a \dot{U}_A + Y_b \dot{U}_B + Y_c \dot{U}_C}{Y_a + Y_b + Y_c}$	$I_\phi = I_n$ $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$			
Треугольник				
$\dot{U}_{AB} = U_\pi e^{j30^\circ}$ $\dot{U}_{BC} = U_\pi e^{-j90^\circ}$ $\dot{U}_{CA} = U_\pi e^{j150^\circ}$ $U_n = U_\phi$	$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$ $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$ $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$			



# Мощность трехфазной цепи

Как и в однофазной линейной цепи синусоидального тока, в трехфазной линейной цепи могут иметь место три вида мощности: - активная  $P_A$ ; - реактивная  $Q$ ; - полная  $S$ .

1. Активной мощностью трехфазной электрической цепи называется сумма активных мощностей всех фаз источников электрической энергии или всех фаз приемника.

Трехфазная электрическая цепь с симметричным приемником. В электрической цепи с симметричным приемником, при любой схеме их соединений, для каждой из фаз приемника имеем:

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз между фазными напряжением  $U$  и током  $I$ .

Очевидно, в этом случае активная мощность всей электрической цепи:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi,$$

или

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

2. Реактивная мощность для каждой из фаз приемника:

$$Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi.$$

Реактивная мощность всей цепи:

$$Q = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi,$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi,$$

3. Для полной мощности в случае симметричного приемника имеем:

$$S = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L.$$