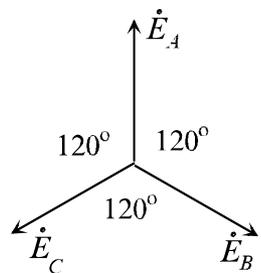
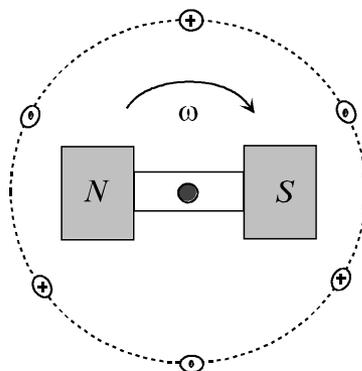


2.13. Трехфазные цепи

Многофазными называются электрические цепи, в которых действует несколько источников гармонических колебаний одинаковой частоты с одинаковыми амплитудами и постоянными фазовыми сдвигами, образующую симметричную систему.



Векторная диаграмма



Ротор - электромагнит, т.е. обмотка, питаемая постоянным током. Статор содержит три обмотки, расположенные под углами 120° друг к другу. При этом частота колебаний ω равна угловой частоте вращения ротора $\omega = \omega_p$. Применяются также генераторы, у которых ротор имеет не одну, а n пар полюсов и соответственно $3n$ обмоток статора, при этом $\omega = n \cdot \omega_p$.

$$e_A = E_A \cos \omega t, \quad e_B = E_B \cos(\omega t - 2\pi/3), \quad e_C = E_C \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

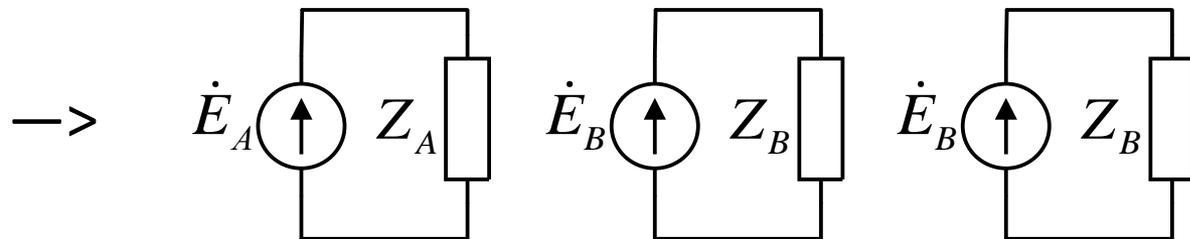
$$\dot{E}_A = E_A$$

$$\dot{E}_B = E_B e^{-j2\pi/3}$$

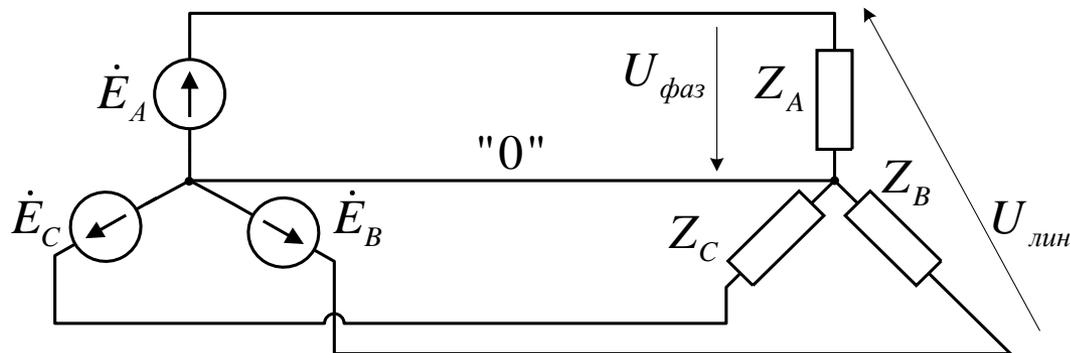
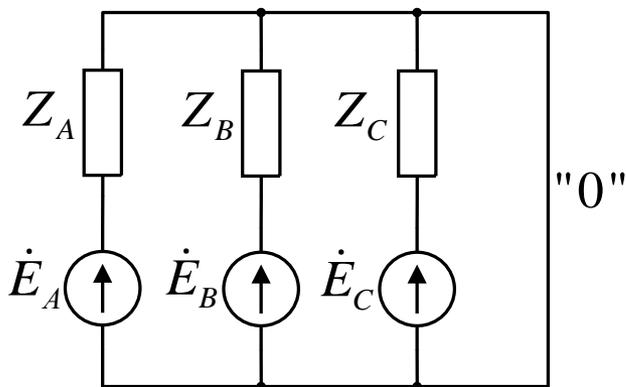
$$\dot{E}_C = E_C e^{+j2\pi/3}$$

e_A, e_B, e_C - фазные ЭДС, или кратко «фазы».

Несвязанная
трехфазная цепь

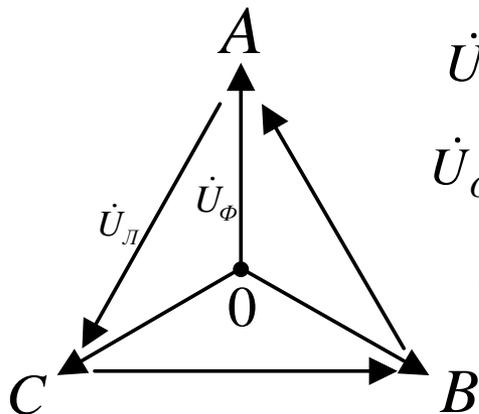


Соединение фаз генератора и нагрузки «звездой». Общая точка называется нулевой или нейтральной, а соответствующий провод — нулевым проводом, или нейтралью. Остальные провода называются линейными проводами.



Напряжения между линейными проводами и токи в них называются линейными напряжениями и токами. Напряжения на фазах нагрузки и токи в них называют фазными напряжениями и токами. Кроме того, используют термин «фазное напряжение линии по отношению к нулевой точке» $U_{\phi 0}$

$z_A = z_B = z_C$ - симметричный режим работы цепи $z_A = |z| \cdot e^{j\varphi}$



$\dot{U}_{AC}, \dot{U}_{CB}, \dot{U}_{BA}$ - линейные напряжения,

$\dot{U}_{OA}, \dot{U}_{OB}, \dot{U}_{OC}$ - фазные напряжения по отношению к «0»

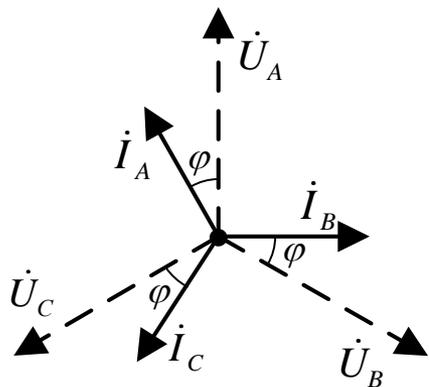
$U_L = \sqrt{3} U_{\phi 0}$ - при любой схеме соединения нагрузок

$U_L = 380 \text{ В}, U_{\phi} = 220 \text{ В}$

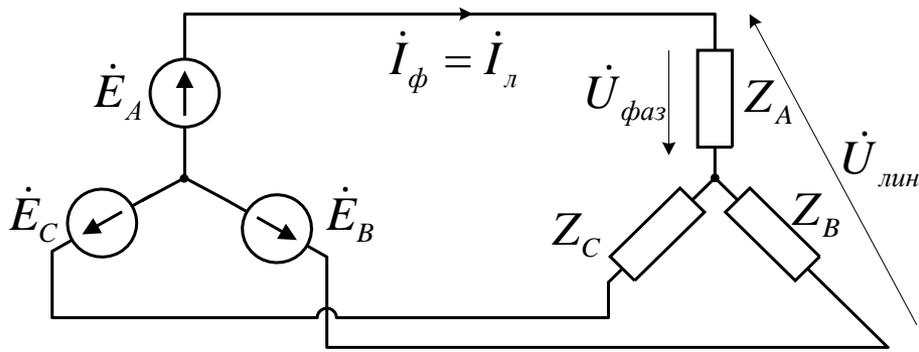
$$\dot{I}_{\phi} = \dot{I}_L$$

Сумма токов в любой момент времени равна нулю

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



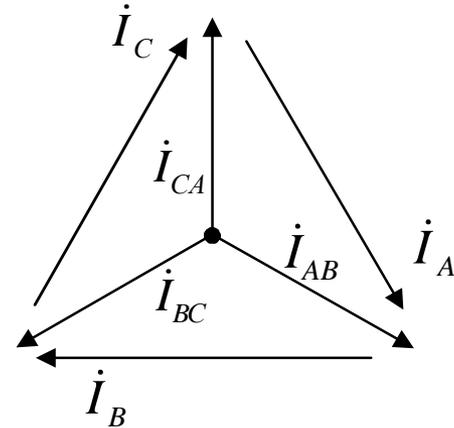
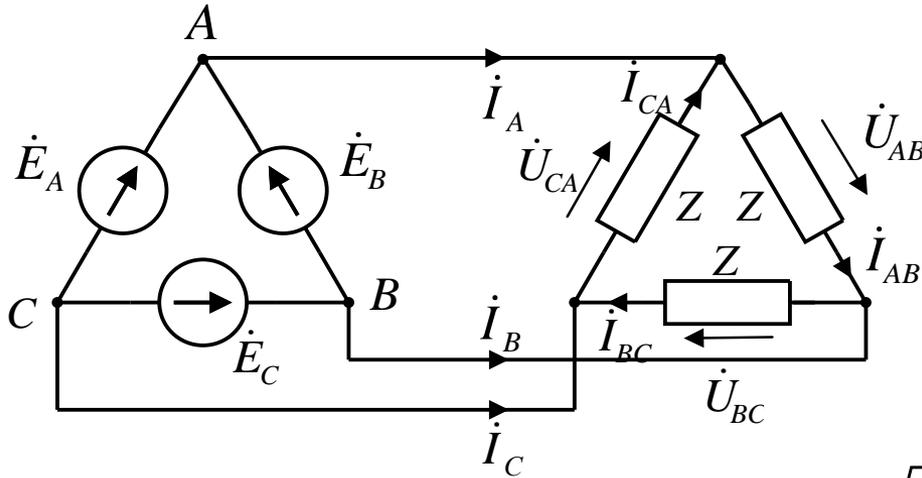
—> Ток нейтрали равен нулю $\dot{I}_0 = 0$ —>



нулевой провод можно убрать, не изменяя режим работы.

Экономия проводов в 2 раза по сравнению с несвязанной системой.

Другой вид соединения — «треугольник-треугольник»:



$$I_l = \sqrt{3} I_\phi$$

$\dot{U}_\phi = \dot{U}_l$ - фазные и линейные напряжения тождественны

Активная мощность, потребляемая трехфазной симметричной нагрузкой $z_A = z_B = z_C$

$$P = \operatorname{Re}(\dot{U}_A \dot{I}_A^* + \dot{U}_B \dot{I}_B^* + \dot{U}_C \dot{I}_C^*) = 3\operatorname{Re}(\dot{U}_\phi \dot{I}_\phi^*) = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi$$

φ - фазовый сдвиг между напряжением и током в каждой “фазе”.

При соединении нагрузки звездой:

$$\dot{U}_\phi = \frac{\dot{U}_l}{\sqrt{3}} \quad \rightarrow \quad P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi.$$

$$\dot{I}_\phi = \dot{I}_l$$

При соединении нагрузки треугольником:

$$\dot{I}_\phi = \frac{\dot{I}_l}{\sqrt{3}} \quad \rightarrow \quad P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi.$$

$$\dot{U}_\phi = \dot{U}_l$$

Мгновенные мощности $p_A(t)$, $p_B(t)$, $p_C(t)$ содержат постоянные составляющие и колебания с удвоенной частотой, причем последние образуют симметричную систему и их сумма равна нулю.

$$p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos\varphi = \text{const}$$

Уравновешенность – у всех симметричных многофазных систем, включая двухфазные, суммарная мгновенная мощность не зависит от времени.

—>

отсутствуют пульсации вращающего момента у двигателей и генераторов.

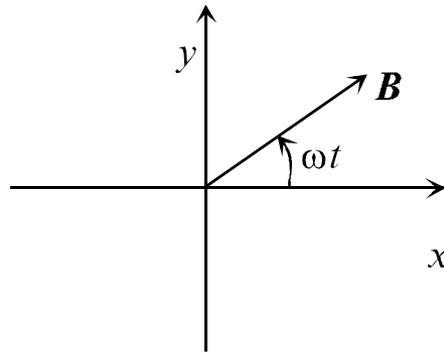
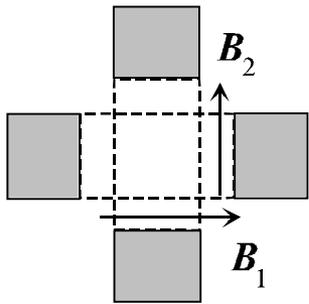
Достоинства трехфазных систем:

1. Уравновешенность (постоянство мгновенной мощности).
2. Возможность получения вращающегося магнитного поля.
3. Экономия проводов (3 вместо 6) — в 2 раза меньше по сравнению с однофазной при той же передаваемой мощности. Более компактными получаются и трехфазные трансформаторы.
4. При выпрямлении в постоянный ток амплитуда пульсаций на порядок меньше, а их частота втрое выше, чем при однофазном источнике.

2.14. Многофазные электрические машины

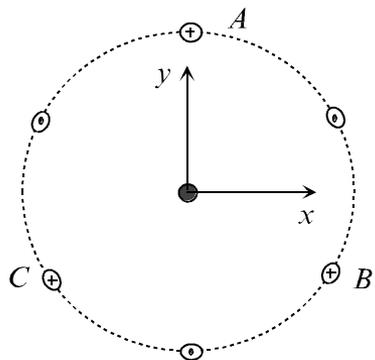
Две катушки, оси которых перпендикулярны, питаются от двухфазного источника тока:

$$B_x = B_1(t) = B_m \cos \omega t, \quad B_y = B_2(t) = B_m \cos(\omega t - \pi/2) = B_m \sin \omega t, \quad B_z = 0.$$



Вектор индукции магнитного поля \mathbf{B} вращается в плоскости xy с частотой ω , его длина остается постоянной.

Трехфазная система - три катушки, оси которых расположены под углами 120° друг к другу, питаются трехфазным током.



Пространственная ориентация витков с током добавляет множители –

для проекции на ось X: $\cos 0, \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right), \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)$

для проекции на ось Y: $\sin 0, \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right), \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)$

$$B_x = B_m \left[\cos 0 \cdot \cos \omega t + \cos \left(-\frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \frac{2\pi}{3} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right] =$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$= B_m \left[\cos \omega t - \frac{1}{2} \left\{ \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \right] =$$

$$= B_m \left[\cos \omega t - \frac{1}{2} \left\{ 2 \cos \omega t \cdot \cos \left(2 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right\} \right] = B_m \left[\cos \omega t + \frac{1}{2} \cos \omega t \right] = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t$$

$$B_y = B_m \left[\sin 0 \cdot \cos \omega t + \left(-\sin \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \left(\sin \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right] =$$

$$= B_m \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left\{ \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right\} =$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$= B_m \sqrt{3} \cdot \left\{ \sin \omega t \cdot \sin \left(2 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right\} = B_m \sqrt{3} \sin \omega t \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -\frac{3}{2} B_m \sin \omega t$$

Итак:

$$\begin{cases} B_x = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t \\ B_y = -\frac{3}{2} B_m \sin \omega t \end{cases}$$

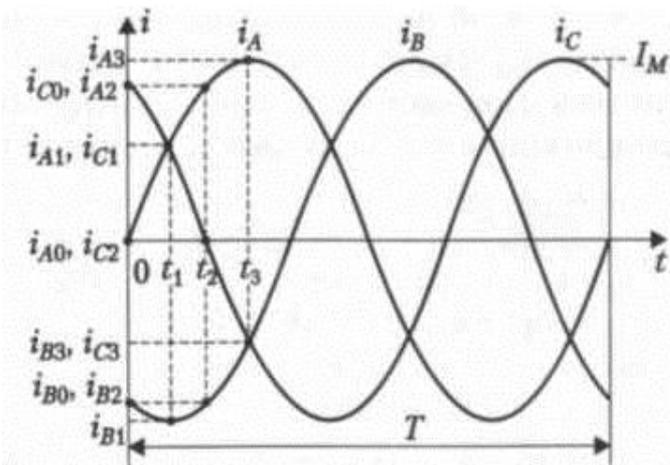
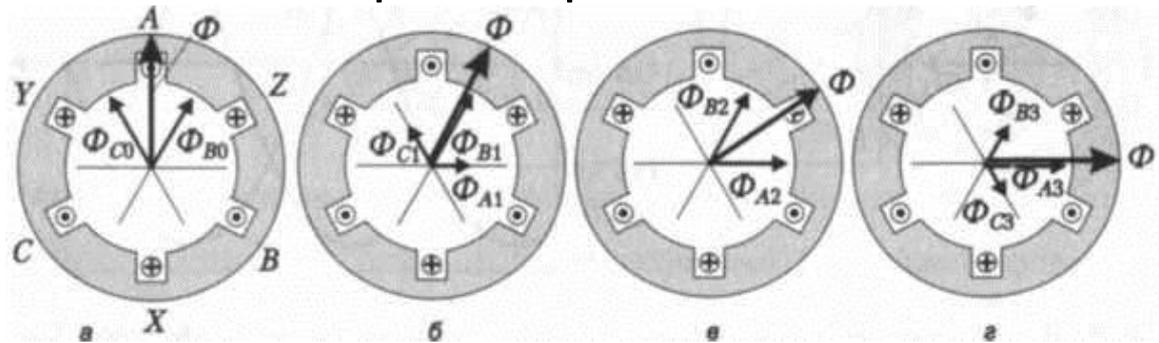


Иллюстрация вращения магнитного поля в статоре во времени

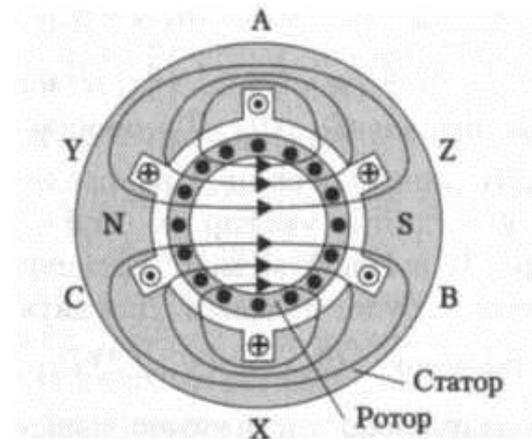


Для изменения направления вращения достаточно поменять местами токи в каких-либо двух обмотках (например i_B , i_C), а в двухфазном — изменить полярность одной из обмоток. При несимметрии токов вместо кругового вращения получается вращение по эллипсу.

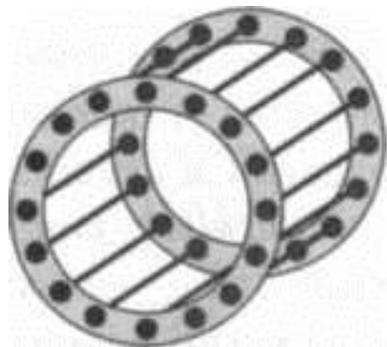
Дипольное магнитное поле. —>

Квадрупольное поле (6 обмоток, 4 полюса), вращается с частотой $\omega/2$

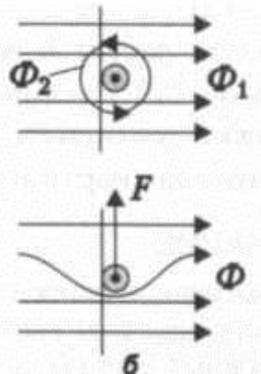
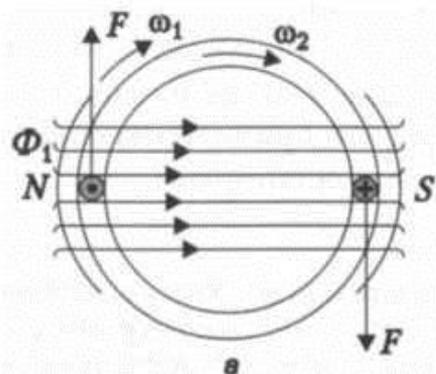
$$\omega_{вр} = \frac{\omega}{n} \quad n \text{ - число пар полюсов}$$



Асинхронный двигатель имеет трехфазный (двухфазный) статор и короткозамкнутый ротор (“беличье колесо”).



Внутри статора электродвигателя размещают ротор. Вращающееся магнитное поле возбуждает в роторе токи и индуцирует вращающий момент, который приводит ротор в движение.



ω_1 - угловая частота вращения магнитного поля статора

ω_2 - угловая частота вращения ротора

Ротор вращается с несколько меньшей угловой частотой

Скольжение $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$

$$s \approx 3 - 4\%$$

При увеличении нагрузки на вал двигателя скольжение растет.

Синхронный двигатель — ротор питается постоянным током (через кольца со щетками), статор создает вращающееся поле. Ротор надо предварительно раскрутить (используется обычно асинхронный маломощный пусковой двигатель). После включения в номинальный режим вращение ротора синхронно с вращением поля: $\omega_c = \omega$, но имеется угловой сдвиг ψ — запаздывание поля ротора относительно поля статора. С увеличением механической нагрузки на валу этот угол ψ растет, одновременно растет и вращающий момент, достигая максимума при $\psi = 90^\circ$. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к «выпаданию» из синхронизма и остановке.

Синхронный трехфазный двигатель — обратимое электромеханическое устройство. Если к статору подключить нагрузку, а ротор вращать с помощью сторонних механических сил, то получаем генератор. Если же к статору подключить стороннее трехфазное напряжение, а ротор механически нагрузить, то получаем двигатель.