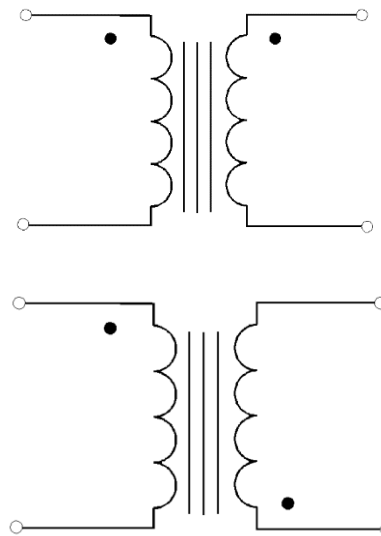
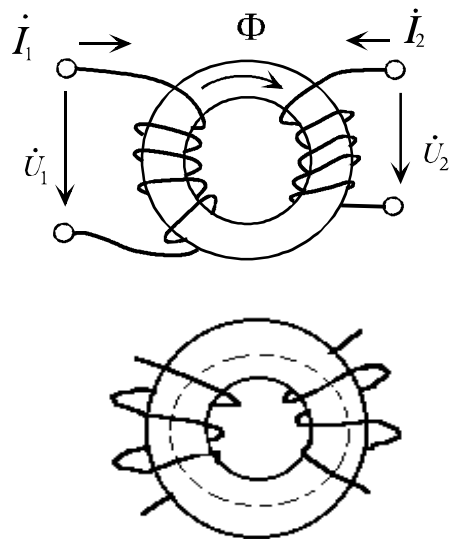


## 2.12. Трансформатор.

Электрический трансформатор — устройство на основе индуктивно связанных катушек, позволяющее изменять амплитуды напряжений при сохранении передаваемой мощности, т.е. при малом потреблении энергии внутри самого устройства.

Трансформатор состоит из двух катушек, которые для увеличения взаимной связи между ними намотаны на общем замкнутом сердечнике — магнитопроводе — из материала с высокой магнитной проницаемостью  $\mu$ .

Выбор условных положительных направлений для магнитных потоков согласуют с условными положительными направлениями токов по правилу правоходового винта. Полюсы, в которые втекают (в смысле выбора опорных направлений) токи, вызывающие согласно направленные магнитные потоки, называют однополярными (одноименными).



На НЧ материал сердечника - электротехническая сталь и железоникелевые сплавы.

Для уменьшения вихревых токов магнитопровод выполняется в виде тонких изолированных пластин или навивается из тонкой ленты.

На ВЧ материал сердечника - ферриты, магнитодиэлектрики.

Обмотка, присоединенная к источнику, называется первичной, к нагрузке — вторичной.

Все магнитное поле сосредоточено внутри магнитопровода. Магнитный поток  $\Phi$  через витки первичной и вторичной обмоток одинаков. Пренебрежем сопротивлением проводов.

$$u_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad u_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$

$\Phi$  - магнитный поток       $n$  - коэффициент трансформации

Гармонические колебания  $\rightarrow \dot{U}_1 = j\omega\dot{\Phi}N_1 \rightarrow \Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega N_1}$

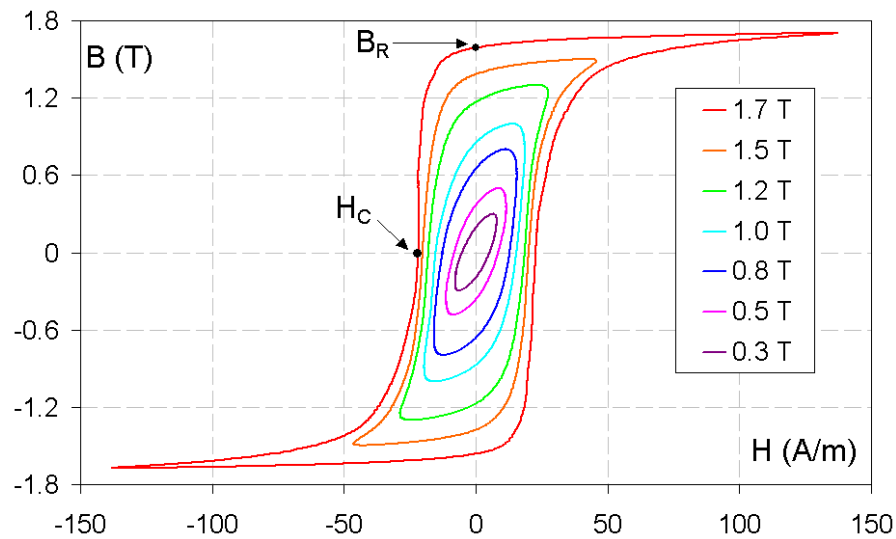
$\Phi = B \cdot S$        $S$  - поперечное сечение магнитопровода

$B$  - индукция магнитного поля

$B = B(H)$        $H$  - напряженность магнитного поля

$B = \mu \cdot H$       для материалов с узкой петлей гистерезиса,  
 $\mu \gg \mu_0$       если магнитопровод работает без насыщения.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м — проницаемость вакуума



Семейство петель магнитного гистерезиса электротехнической стали при синусоидальном изменении полей со временем с амплитудами от -140 до 140 А/м.

$B_R$  - остаточная намагниченность

$H_C$  - коэрцитивная сила

$H_C \approx 8 - 800$  А/м - магнито-мягкие материалы

$H_C \approx 10^3 - 10^5$  А/м - магнито-твердые материалы (пост. магниты)

Закон Ампера:  $H \cdot l = N_1 i_1 + N_2 i_2$

$l$  - длина магнитопровода

$$i_1 = \frac{Hl}{N_1} - \frac{N_2}{N_1} i_2 = I_{1xx} - n i_2$$

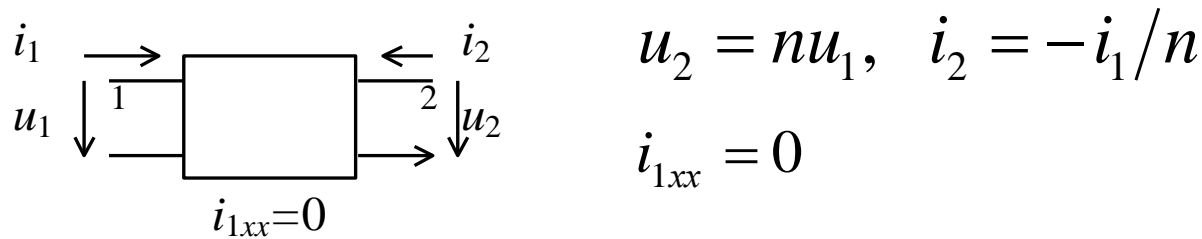
$i_{I_{xx}}$  - ток первичной обмотки при  $i_2 = 0$   
(холостой ход для вторичной обмотки).

$$I_{1xx(m)} = \frac{H_m l}{N_1} = \frac{B_m l}{\mu N_1} = \frac{\Phi_m l}{\mu S N_1} = \frac{l}{\mu S N_1^2 \omega} U_{1m}$$

Если  $i_{1xx} \ll i_1 \rightarrow i_1 \approx -n i_2 \rightarrow i_2 \approx -\frac{i_1}{n}$

Трансформатор следует проектировать так, чтобы  $I_{1xx} \rightarrow 0$ .

Идеальный трансформатор - устройство (четырёхполюсник) для которого

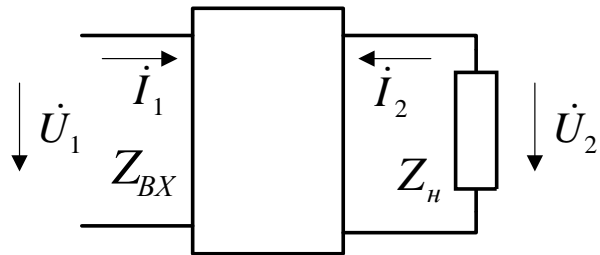


Идеальный трансформатор (ИТ) не потребляет мощности

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_1 i_1 - u_1 n i_1 / n = 0.$$

Вся мощность, потребляемая на входных зажимах, передается в нагрузку.

На выходе подключена нагрузка  $z_H$ . Определим  $Z_{BX}$  :



$$u_2 = -z_H i_2$$

$$Z_{BX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2/n}{-\dot{I}_2 n} = \frac{Z_H}{n^2}.$$

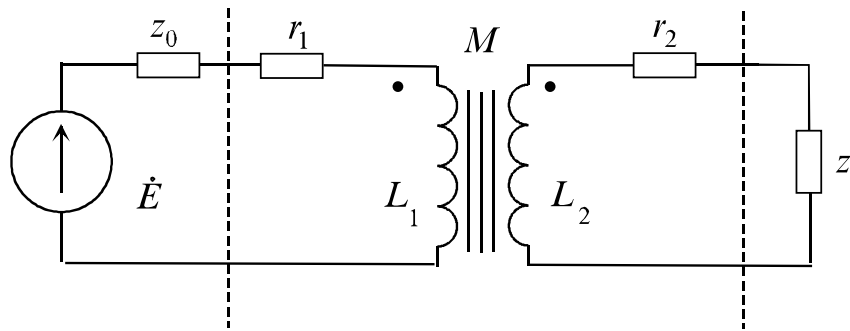
$$Z_{BX} = \frac{Z_H}{n^2}.$$

Происходит трансформация сопротивления в  $n^2$  раз.

Трансформатор позволяет обеспечить:

- 1) получение необходимой величины напряжения (например, для питания каких-либо устройств) без потери мощности;
- 2) согласование генератора с нагрузкой, когда  $Re z_2 \neq Re z_H$  ;
- 3) гальваническую развязку генератора и нагрузки.

## Реальный трансформатор

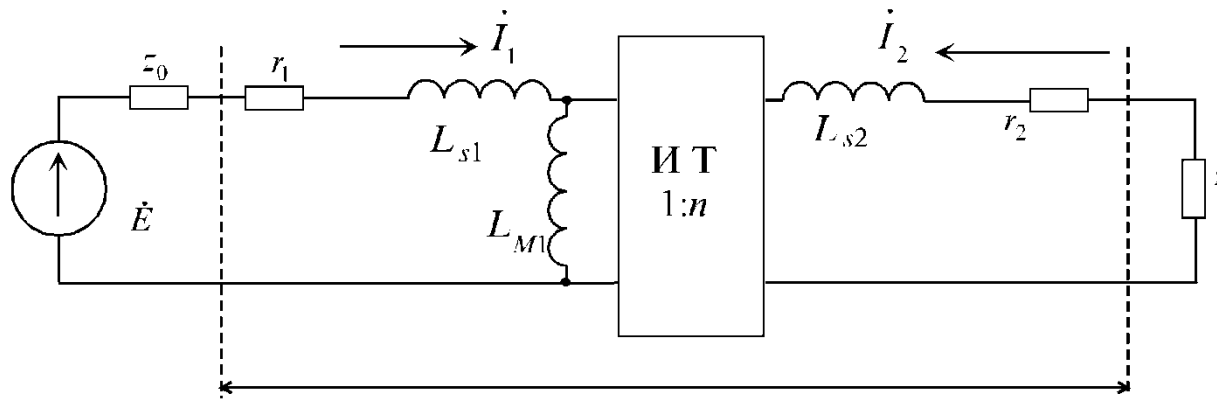


$M$  - взаимная индуктивность,  
 $r_1, r_2$  - сопротивления потерь в проводах (при их вычислении необходимо учесть скин-эффект и эффект близости).

Поток взаимной индукции 1-й и 2-ой обмотки делится на две части:  
- поток, который проходит через витки другой обмотки и  
- поток, поток рассеяния 1-й и 2-ой обмотки (мимо другой обмотки)

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 + \dot{I}_{1xx} = -n\dot{I}_2 + \dot{I}_{1xx}$$

За счет потоков рассеяния возникает ток холостого хода



Реальный трансформатор

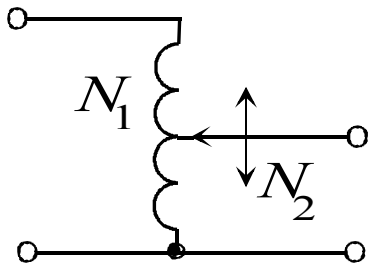
Все сопротивления вторичной цепи трансформируются в первичную с коэффициентом  $1/n^2$

Реальный трансформатор отличается от идеального в линейном приближении тем, что обладает конечным сопротивлением обмоток, индуктивностями рассеяния и индуктивностью намагничивания. Чем меньше  $r$  и  $L_S$  и чем больше  $L_M$ , тем ближе трансформатор к идеальному.



Среди указанных паразитных параметров на НЧ наибольшую роль играет  $L_M$ : с уменьшением  $\omega$  увеличивается ток холостого хода. На ВЧ большее влияние оказывают  $r_{1,2}$  и  $L_{S1,2}$ . На еще более высоких частотах могут сказываться межобмоточные и межвитковые емкости, которые не учитывались.

Автотрансформатор (одна из обмоток является частью другой):

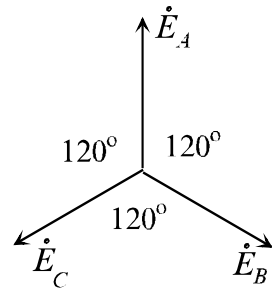


Поскольку по общей части протекает разностный ток  $i_1 + i_2 = i_1 - i_1 / n$ , уменьшаются потери в проводе

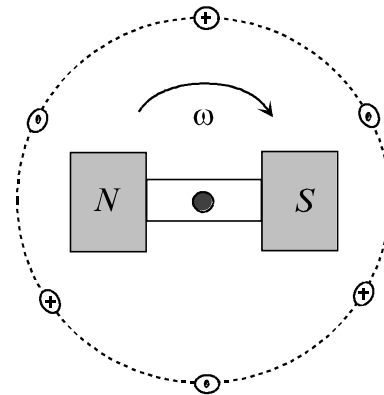
Недостаток - наличие гальванической связи между первичной и вторичной цепями.

## 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  $120^\circ$  друг к другу. При этом частота колебаний  $\omega$  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  $\omega = n \cdot \omega_p$ .

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

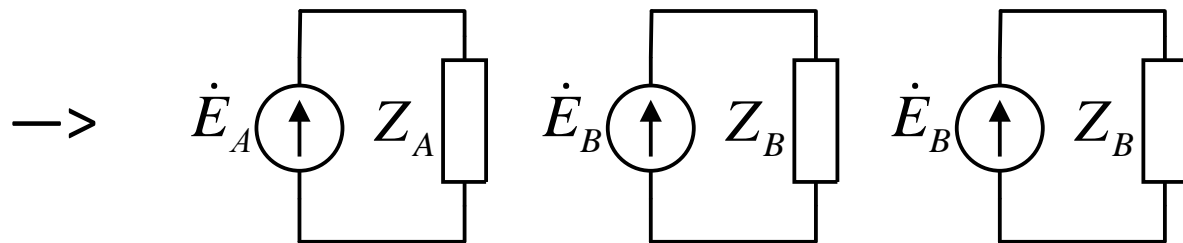
$$\dot{E}_A = E_A$$

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

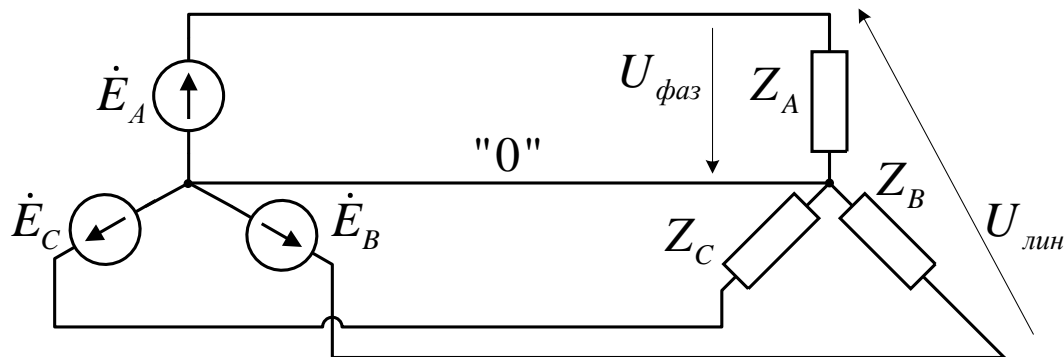
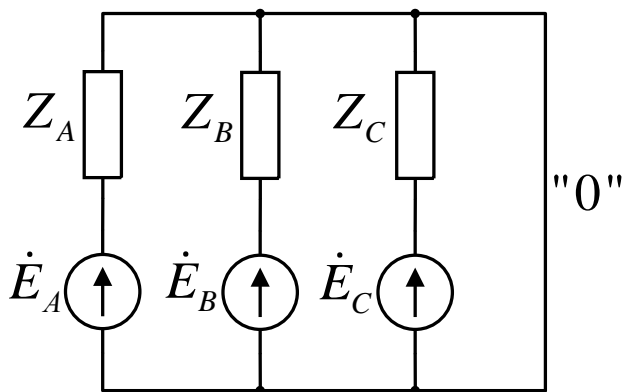
$$\dot{E}_C = E_C e^{+j2\pi/3}$$

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

Несвязанная  
трехфазная цепь

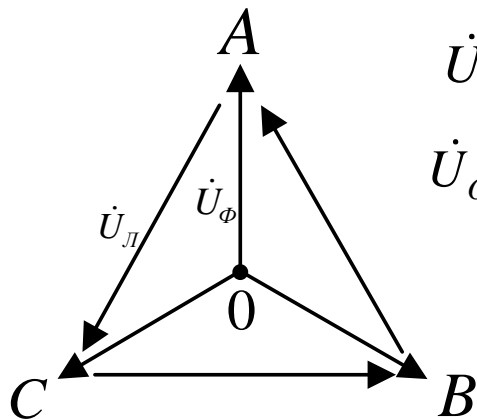


Соединение фаз генератора и нагрузки «звездой». Общая точка называется нулевой или нейтральной, а соответствующий провод — нулевым проводом, или нейтралью. Остальные провода называются линейными проводами.



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»

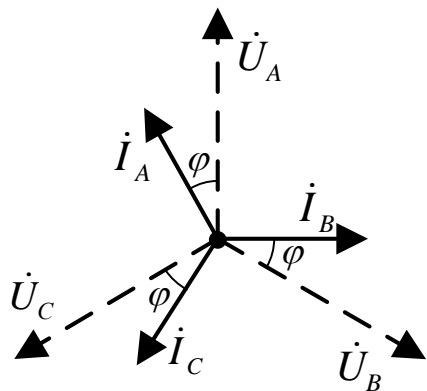
$\dot{U}_л = \sqrt{3}\dot{U}_{\phi 0}$  - при любой схеме соединения нагрузок

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

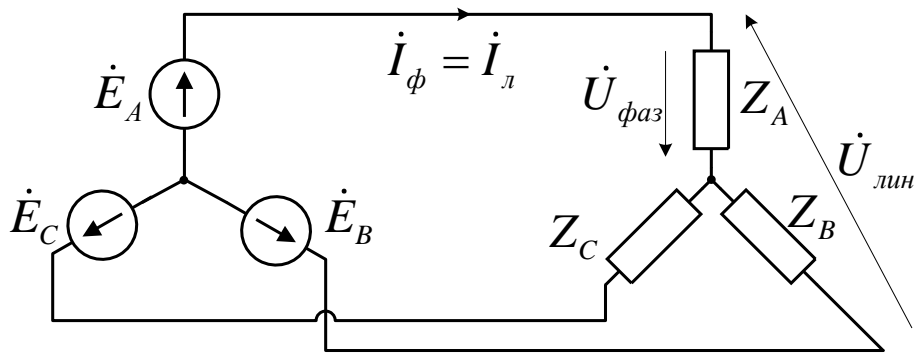
$$\dot{I}_\phi = \dot{I}_л$$

Сумма токов в любой момент времени равна нулю

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



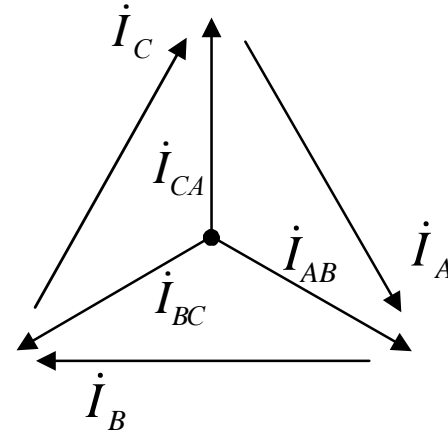
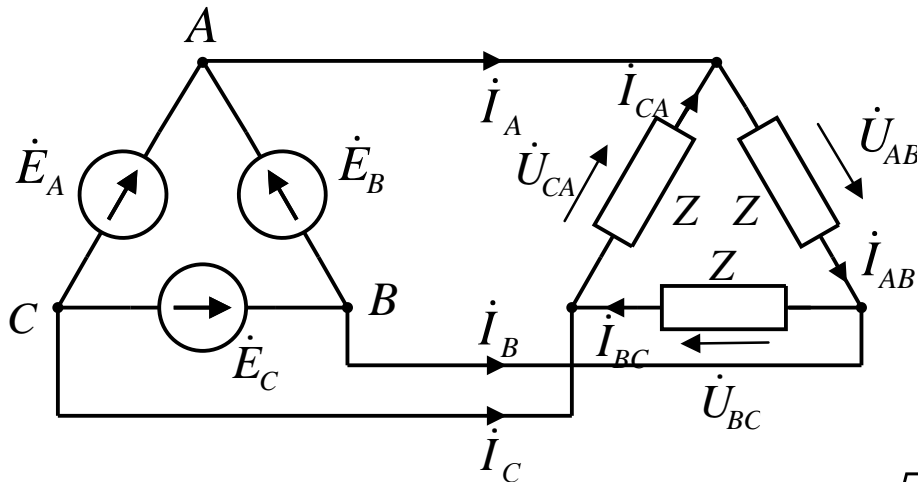
→ Ток нейтрали равен нулю  $\dot{I}_0 = 0$  →



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  $z_A = z_B = z_C$

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

$\varphi$  - фазовый сдвиг между напряжением и током в каждой “фазе”.

При соединении нагрузки звездой:

$$\begin{aligned} \dot{U}_\phi &= \frac{\dot{U}_l}{\sqrt{3}} \\ \dot{I}_\phi &= \dot{I}_l \end{aligned} \quad \rightarrow \quad P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi$$

При соединении нагрузки треугольником:

$$\begin{aligned} \dot{I}_\phi &= \frac{\dot{I}_l}{\sqrt{3}} \\ \dot{U}_\phi &= \dot{U}_l \end{aligned} \quad \rightarrow \quad P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi$$

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.