

Лекция 1

Краткое содержание

Глава 4. Трехфазные цепи синусоидального тока

**4.1. Понятие о многофазных системах ЭДС,
напряжения и тока**

**4.2. Виды соединений фазных обмоток
генератора**

4.3. Виды соединений фаз трехфазной нагрузки

Преимущества трехфазных систем переменного тока

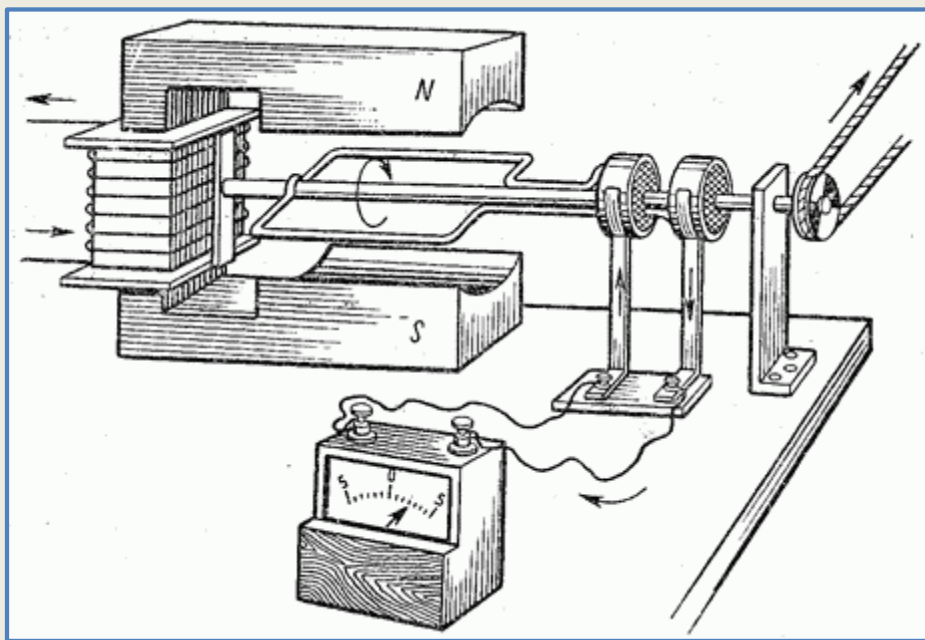
Основную роль в электроэнергетике и промышленной электротехнике играет переменный ток (напряжение), что объясняется преимуществом его производства и распределения. Условия получения, передачи и потребления электрической энергии существенно улучшаются при объединении однофазных цепей **в трехфазные системы**.

Основные преимущества использования переменного тока:

- легко получается вращающееся магнитное поле в генераторах и двигателях переменного тока;
- мгновенная мощность, которая определяет момент на валу генератора и двигателя, в трёхфазной симметричной цепи является величиной постоянной, а не пульсирующей, как в однофазной цепи;
- для передачи одной и той же мощности в 3-х фазной цепи требуется меньшее суммарное сечение проводов, чем в однофазной цепи;
- без каких-либо преобразований легко получается два различных напряжения: линейное и фазное (U_L и U_ϕ).

Переменная электродвижущая сила

Получение переменной ЭДС основано на явлении электромагнитной индукции: при движении проводника в магнитном поле или изменении числа линий магнитной индукции через площадку, ограниченную этим проводником, возникает электродвижущая сила.



$$e = Blv \sin \alpha$$

Генератором называется машина, преобразующая механическую энергию в электрическую. Вращение рамки в магнитном поле полюсов электромагнита приводит к появлению в проводнике переменной электродвижущей силы. Величина ЭДС зависит от магнитной индукции B , длины проводника l , скорости пересечения проводником магнитных линий v и синуса угла α , между направлением движения проводника и направлением магнитного поля.

Глава 4. Трехфазные цепи синусоидального тока

4.1. Понятие о многофазных системах ЭДС, напряжения и тока.

Многофазной системой электрических цепей называется совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные электродвижущие силы одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе, создаваемые общим источником энергии. Совокупность подобных ЭДС, равно как и совокупность синусоидальных электрических токов или напряжений одной частоты, сдвинутых друг относительно друга по фазе, называется многофазной системой соответственно ЭДС или напряжений (токов). Число фаз многофазной системы электрических цепей принято обозначать буквой m . При $m = 2, 3, 4$ и т.д. многофазные системы электрических цепей называют соответственно двух-, трех-, четырехфазными и т.д. системами электрических цепей.

Понятие о многофазных системах ЭДС, напряжения и тока.

Многофазные системы ЭДС, токов и напряжений принято подразделять на симметричные и несимметричные системы.

Симметричной m – фазной системой ЭДС (токов, напряжений) называется система, в которой максимальные значения всех ЭДС (токов, напряжений) одинаковы, но по фазе каждая последующая ЭДС (ток, напряжение) отстает от предыдущей ЭДС (предыдущего тока, напряжения) на угол $q \frac{2\pi}{m}$, где $q = 0, 1, \dots, m-1$.

Трехфазная цепь представляет собой совокупность трехфазных источников, трехфазной нагрузки и трехпроводной (или четырехпроводной) системы проводов, связывающих источники и нагрузку. Создателем трехфазной системы является выдающийся русский инженер и ученый М.О. Доливо -Добровольский.

Сооружение системы трехфазного переменного тока

В 1891 г. на Франкфуртской электротехнической выставке была представлена система передачи энергии на трехфазном токе из Лауфена на реке Некар (приток Майна) во Франкфурт на Майне. Длина линии 170 км, провода воздушные, расстояние между опорами около 60 м.

В состав системы входили:

- водяная турбина мощностью 304 л.с.;
- трехфазный синхронный генератор 230 кВА, 95 В, соединение обмоток статора в «звезду», **частота 30-40 Гц**, 150 об/мин;
- повышающий и понижающий трансформатор;
- трансформаторы для питания освещения и асинхронный короткозамкнутый двигатель мощностью 100 л.с. с числом полюсов, равным восьми, что соответствовало синхронной скорости 450-600 об/мин. Двигатель приводил во вращение гидронасос. На выставке имитировался водопад на реке Некар, приводивший во вращение турбину.

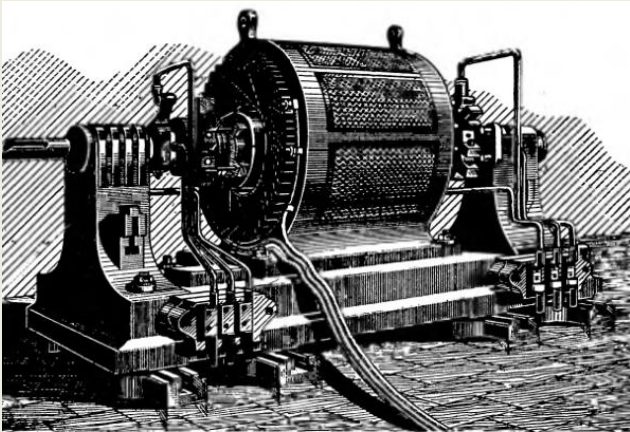
Напряжение в линии передачи вначале было **15 кВ**, а затем после установки новых трансформаторов оно было доведено до 28,3 кВ.



Доливо-Добровольский
Михаил
Осипович
(1862-1919)

Трехфазный двигатель переменного тока

Конструкции двухфазных машин, одним из изобретателей которых был Никола Тесла, имели существенные недостатки: выступающие полюса, сосредоточенные обмотки на полюсах и роторе, необходимость использования четырех проводов. Доливо-Добровольскому пришлось **доказывать, что трехфазная система является оптимальной.**



«Уже при первом включении выявилось ошеломляющее для представлений того времени действие. Электродвигатель, якорь которого имел диаметр 75 мм и длину также 75 мм и не обладал никакими особыми присоединениями к сети, мгновенно стал вращаться на полное число оборотов и был совершенно бесшумным. Попытка остановить его торможением за конец вала от руки блестяще провалилась... Если принять во внимание малые размеры моторчика, это представлялось чудом для всех приглашенных свидетелей...»

(М.О. Доливо-Добровольский)

Трёхфазный генератор

В трёхфазных цепях используют два понятия **фазы**:

Фаза – фаза синусоидального колебания и начальная фаза синусоидального колебания.

Фаза – как составная часть многофазной системы, в которой один и тот же ток с определенной начальной фазой.

Каждая фаза имеет буквенное обозначение. В России фазы обозначаются заглавными буквами А, В, С. В качестве трехфазных источников чаще других применяются **синхронные генераторы**. Синхронный генератор - генератор с постоянной частотой вращения ротора.

Трехфазный генератор

Одна фаза обмотки состоит из проводников, распределенных равномерно на $1/3$ внутренней поверхности **статора** (внешнего массивного неподвижного полого цилиндра из ферромагнитного материала). Две другие фазы обмотки занимают такие же участки внутренней поверхности статора, так что в целом трехфазная обмотка представляет собой систему проводников, равномерно распределенных вдоль воздушного зазора. Внутри статора соосно с ним расположена подвижная часть электрической машины - **ротор**. Между статором и ротором находится **воздушный зазор**. Обмотки ротора, создающие магнитное поле в зазоре между ротором и статором, подсоединены к **системе возбуждения**.

Трехфазный генератор

Если электромагнит привести в движение во вращение с угловой скоростью, близкой к ω , то он будет продолжать вращаться и достигнет частоты вращения равной ω . В зазоре между ротором и статором появится **вращающееся магнитное поле**, а в обмотках статора будут индуцироваться ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону. Обмотки статора подсоединяются к внешней трехфазной системе (к нагрузке).

Система возбуждения генератора - установка для генерирования постоянного тока обмотки возбуждения синхронных генераторов.

Часть машины, которая создает магнитное поле, называют **индуктором**, а ту часть, где располагается обмотка, в которой индуцируется ЭДС, называют **якорем**.

Синхронный генератор с возбудителем

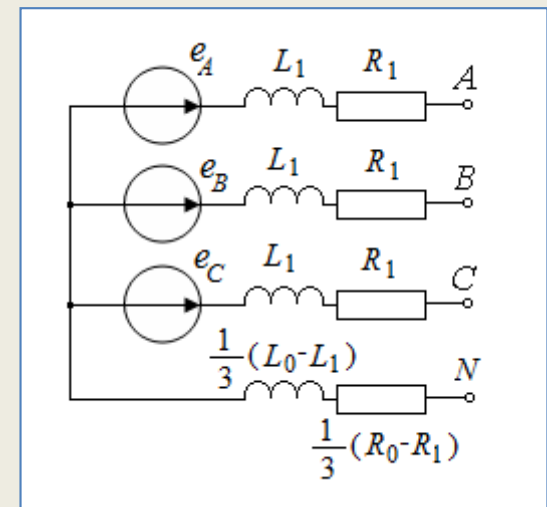
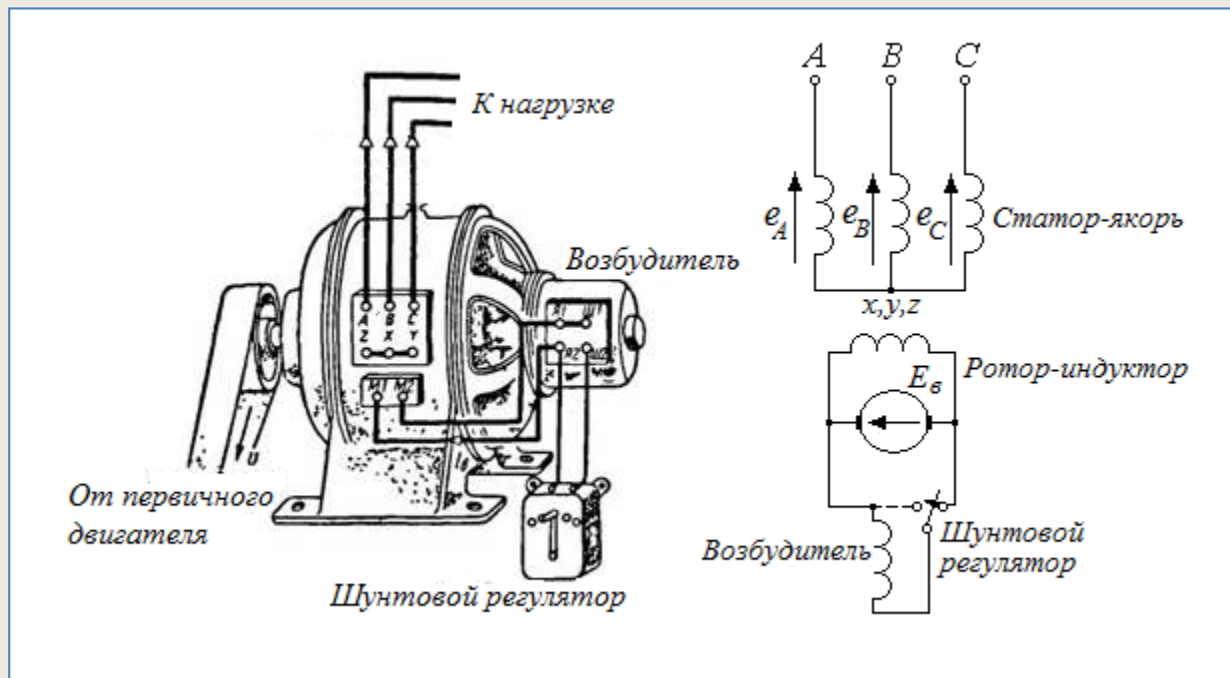
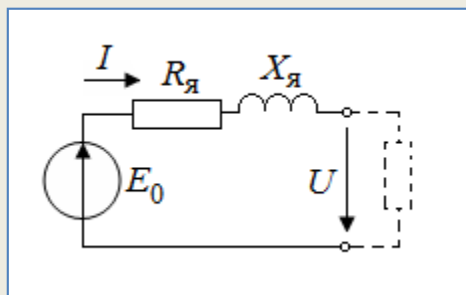
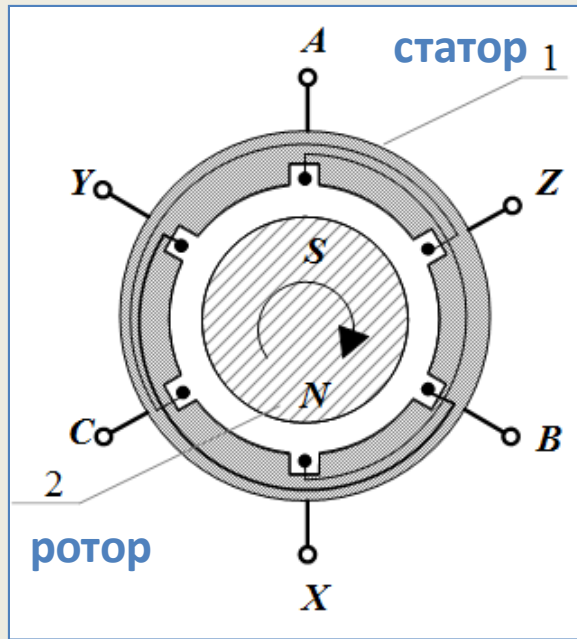


Схема замещения
трехфазная

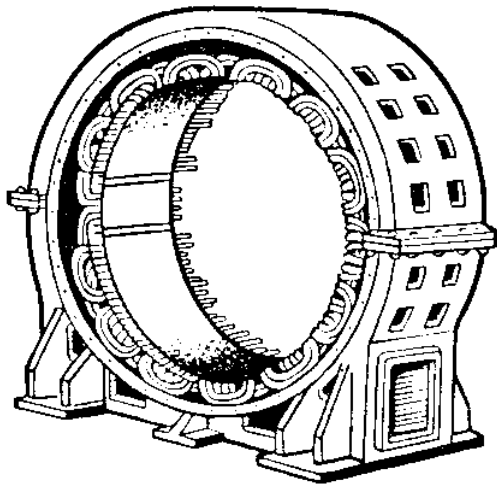


Упрощенная однофазная схема
замещения

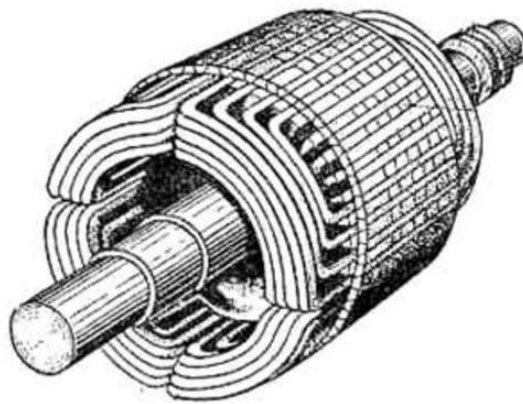
Трехфазный генератор



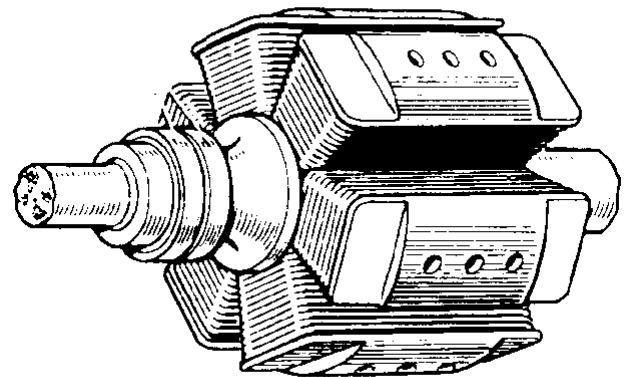
Если для наглядности представить обмотки статора состоящими из одного витка, то на статоре будет только шесть пазов, в каждом из которых будет лежать половина витка обмотки. Концы обмоток генератора статора обычно маркируют буквами: **A** – начало, **X** – конец обмотки фазы **A**. Соответственно для фазы **B**: (**B** – **Y**), для фазы **C** – (**C** – **Z**).



статор

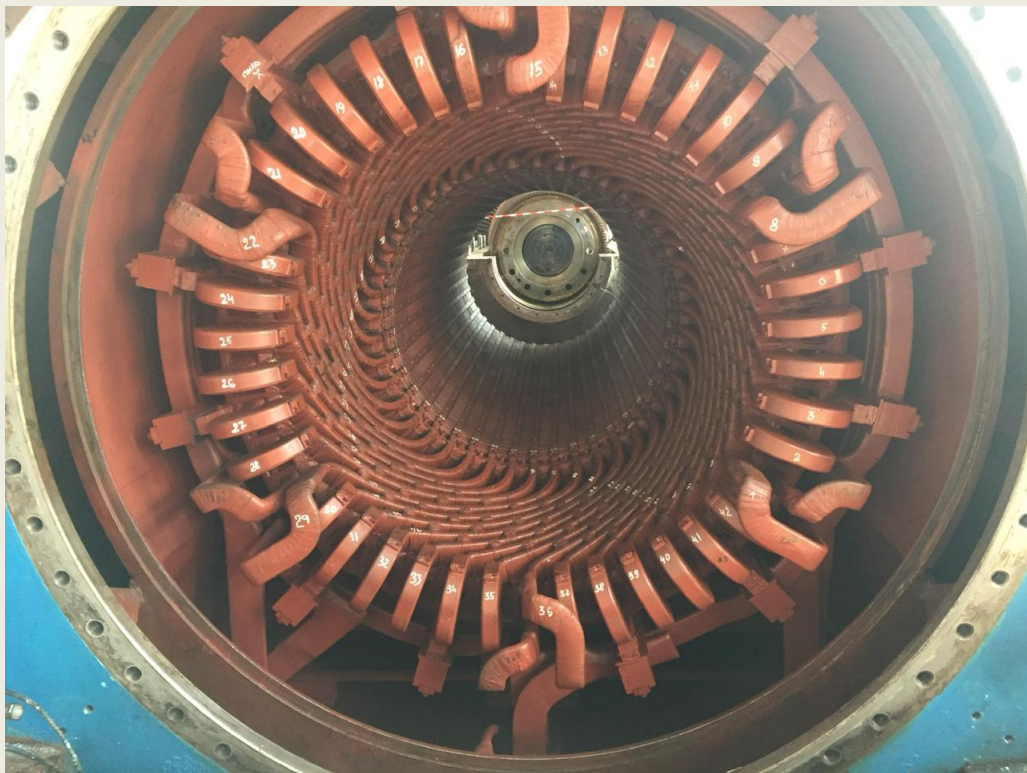


неявнополюсной ротор



явнополюсной ротор

Трехфазный генератор



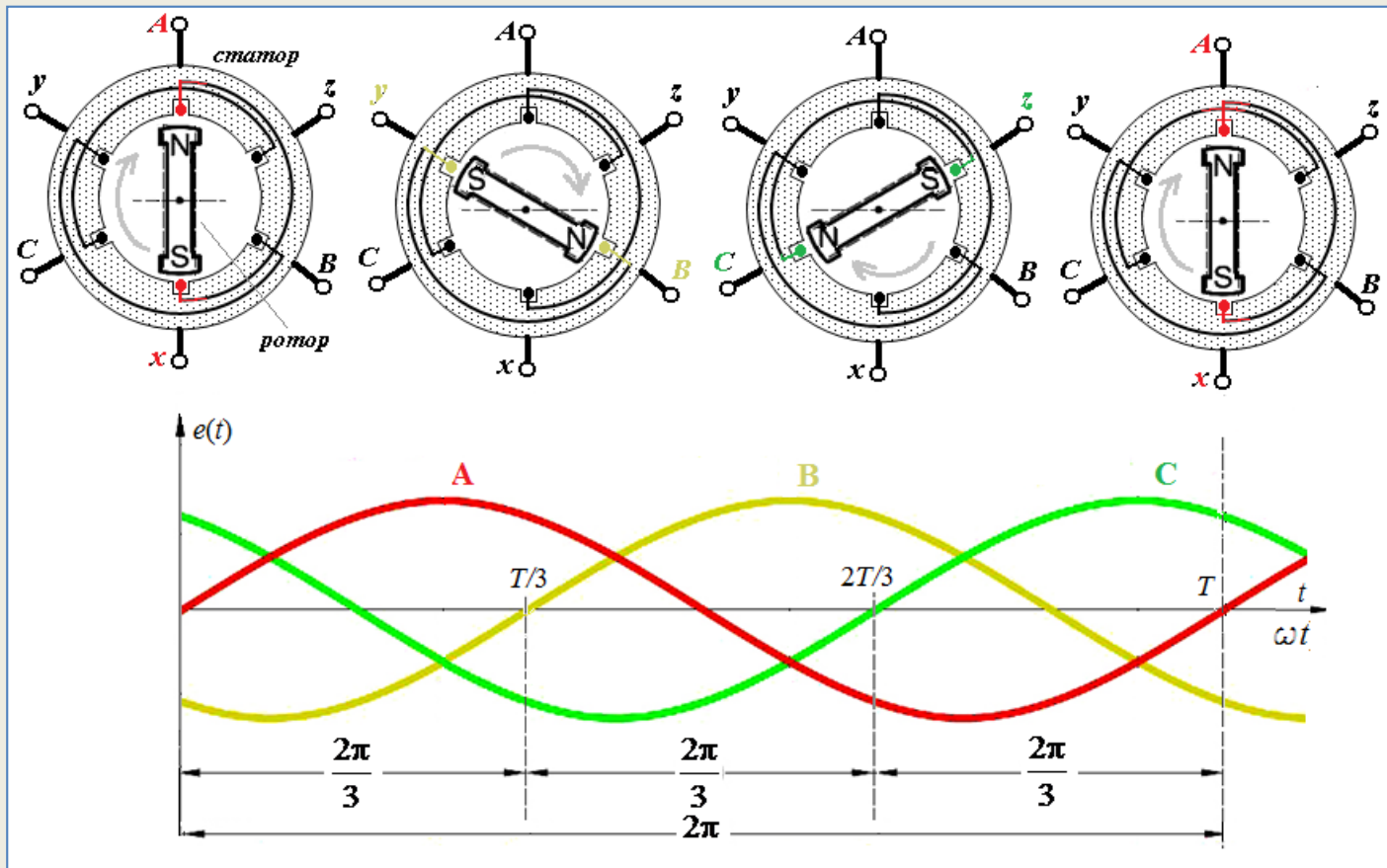
Статор



Ротор

Трехфазная система ЭДС

В обмотках статора индуцируются ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону, сдвинутые по времени относительно ЭДС фазы А соответственно на $T/3$ и $2T/3$.



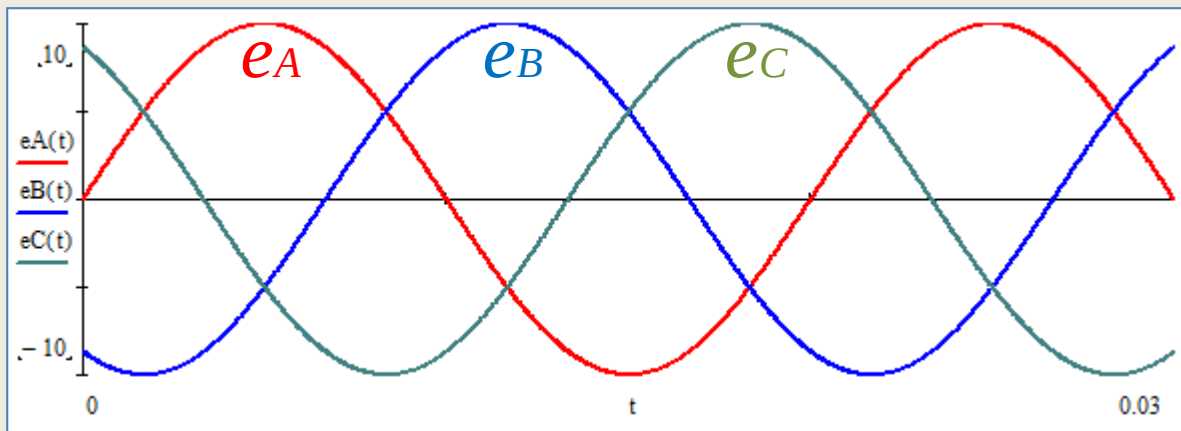
Трёхфазная система ЭДС прямой последовательности (q=1)

Определим начальную фазу для ЭДС, индуцированную в фазной обмотке А, за нулевую. Для **прямой последовательности**:

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

$$e_B(t) = e_A(t - \frac{T}{3}) = E_m \sin \omega(t - \frac{T}{3}) = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$e_C(t) = e_A(t - \frac{2T}{3}) = E_m \sin \omega(t - \frac{2T}{3}) = E_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$



Трёхфазная система ЭДС обратной ($q=1$) и нулевой последовательности ($q=0$)

Для *обратной последовательности*:

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

$$e_B(t) = e_A(t - \frac{2T}{3}) = E_m \sin \omega(t - \frac{2T}{3}) = E_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

$$e_C(t) = e_A(t - \frac{T}{3}) = E_m \sin \omega(t - \frac{T}{3}) = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

Для *нулевой последовательности*:

$$e_A(t) = e_B(t) = e_C(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$$

Сумма ЭДС *прямой и обратной последовательностей*

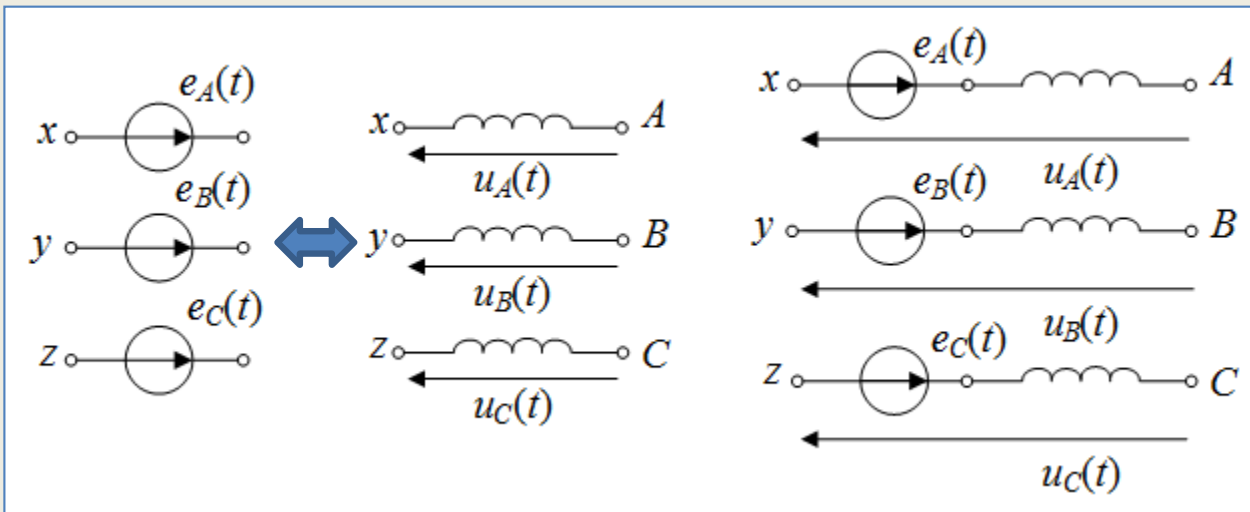
$$e_A(t) + e_B(t) + e_C(t) = 0 ,$$

для *нулевой*

$$e_A(t) + e_B(t) + e_C(t) = 3e_A(t)$$

Фазные ЭДС и фазные напряжения

Участки цепи, где индуцируются ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону, могут быть обозначены как **фазные ЭДС** $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ или как **фазные напряжения** $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$. Фазное напряжение равно фазному ЭДС при ничтожно малом внутреннем сопротивлении генератора или при отсутствии нагрузки. В таком случае действующее значение фазного напряжения $U_\phi = E_m / \sqrt{2}$.



Если необходимо учитывать внутреннее сопротивление генератора, то при наличии токов

$$e_A(t) \neq u_A(t)$$

$$e_B(t) \neq u_B(t)$$

$$e_C(t) \neq u_C(t)$$

Комплексные ЭДС трехфазных систем

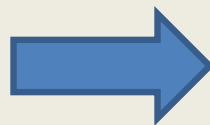
Расчет установившегося режима проводится **комплексным методом**:

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

$$e_B(t) = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_C(t) = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

мгновенные значения ЭДС



комплексные ЭДС

$$\underline{E}_{Am} = E_m e^{j0}$$

$$\underline{E}_{Bm} = E_m e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}\right)}$$

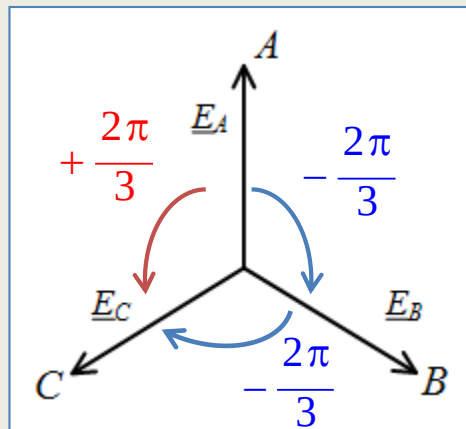
$$\underline{E}_{Cm} = E_m e^{j\left(-\frac{4\pi}{3}\right)} = E_m e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)}$$

$$\underline{E}_A = E_\phi e^{j0}$$

$$\underline{E}_B = E_\phi e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}\right)}$$

$$\underline{E}_C = E_\phi e^{j\left(-\frac{4\pi}{3}\right)} = E_\phi e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)}$$

$$E_\phi = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$



Комплексные фазные напряжения трехфазных систем

$$\begin{aligned}\underline{U}_{A_1} &= U_{\phi_1} e^{j0} \\ \underline{U}_{B_1} &= U_{\phi_1} e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}\right)} \\ \underline{U}_{C_1} &= U_{\phi_1} e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)}\end{aligned}$$

*прямой
последовательности*

$$\begin{aligned}\underline{U}_{A_2} &= U_{\phi_2} e^{j0} \\ \underline{U}_{B_2} &= U_{\phi_2} e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)}\end{aligned}$$

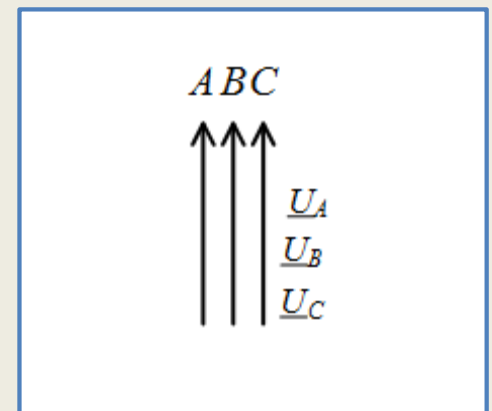
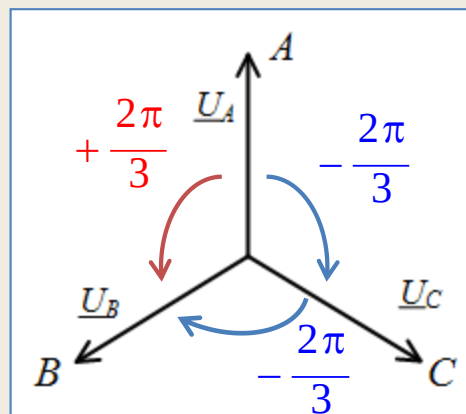
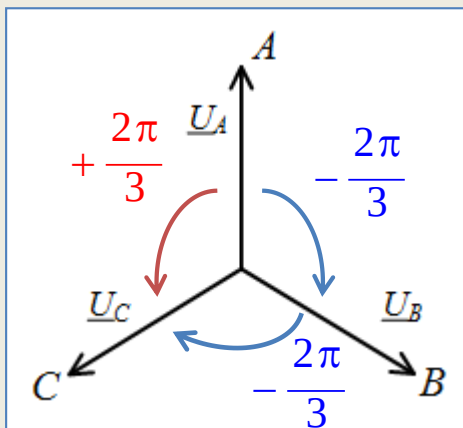
$$\underline{U}_{C_2} = U_{\phi_2} e^{j\left(-\frac{2\pi}{3}\right)}$$

*обратной
последовательности*

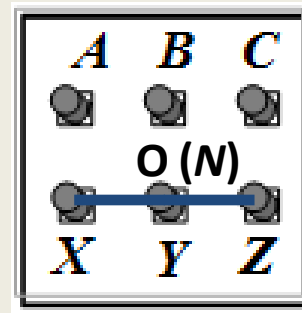
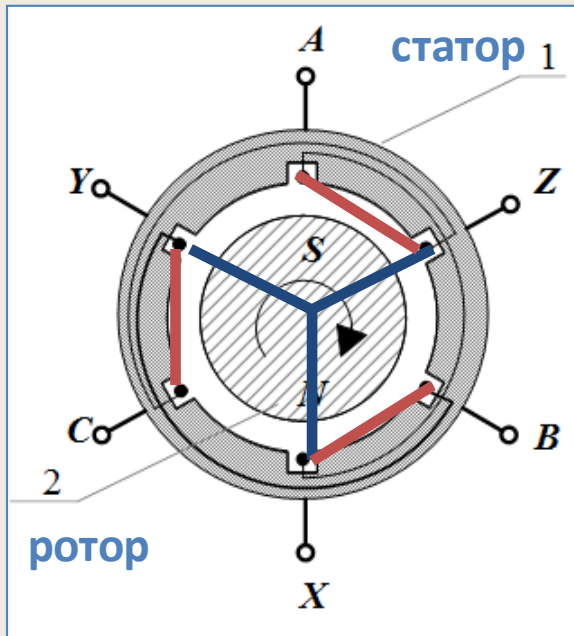
$$U_{\phi} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$\underline{U}_{A_0} = \underline{U}_{B_0} = \underline{U}_{C_0}$$

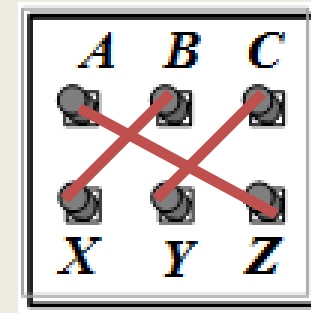
*нулевой
последовательности*



Соединение фазных обмоток генератора

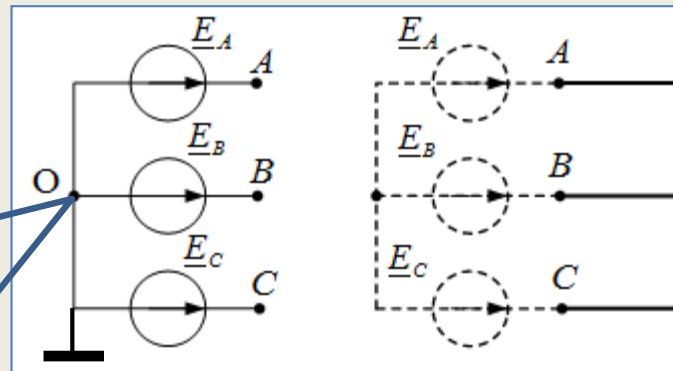


Соединение
«звезда»

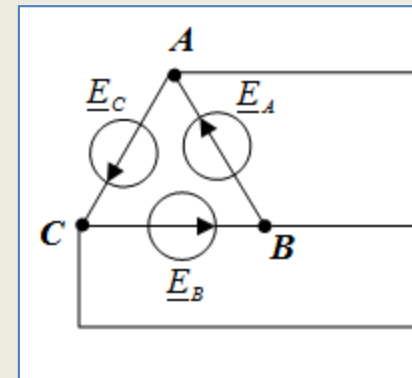


Соединение
«треугольник»

При соединении
«звезда»
появляется общая
точка («нулевая»
или
«нейтральная»)



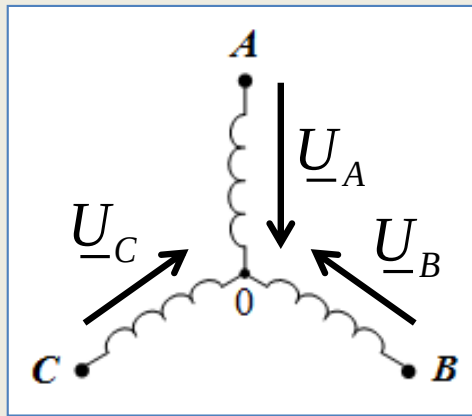
$$\varphi_0 = 0$$



Схемное изображение

Соединение фазных обмоток генератора «звездой»

Векторная диаграмма комплексных ЭДС (*фазных напряжений*) генератора при соединении «звездой»

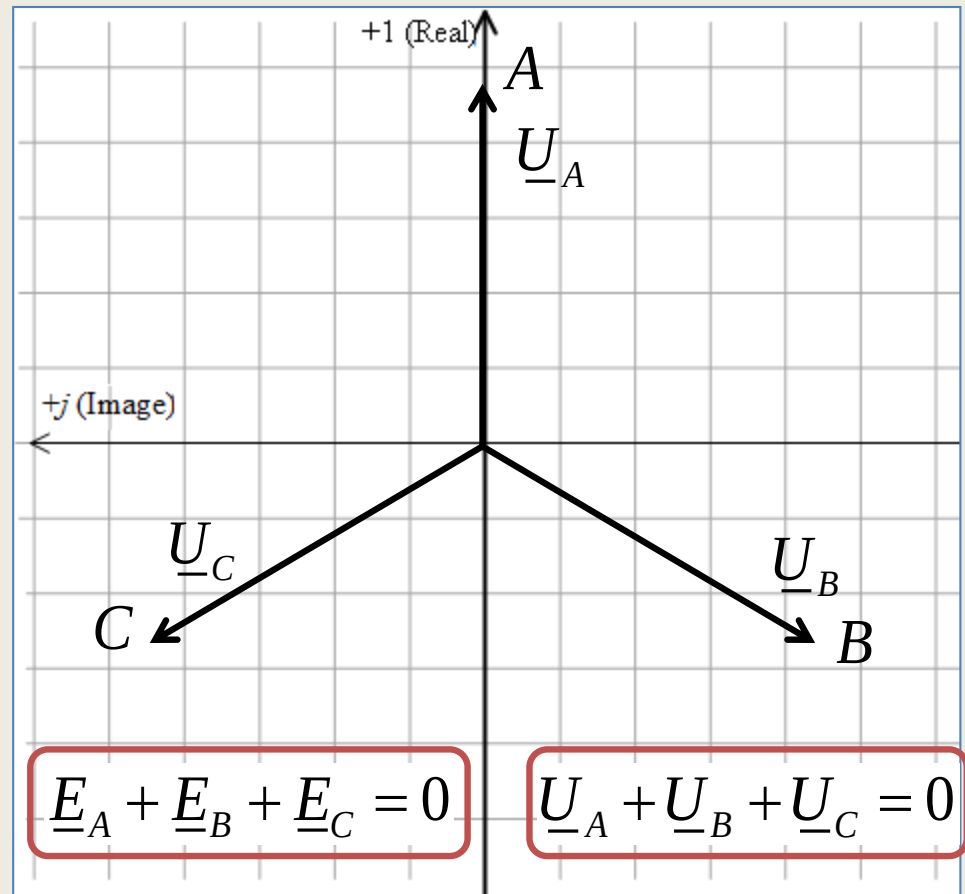


$$\underline{E}_A = \underline{U}_A = U_\Phi \angle 0^\circ$$

$$\underline{E}_B = \underline{U}_B = U_\Phi \angle -120^\circ$$

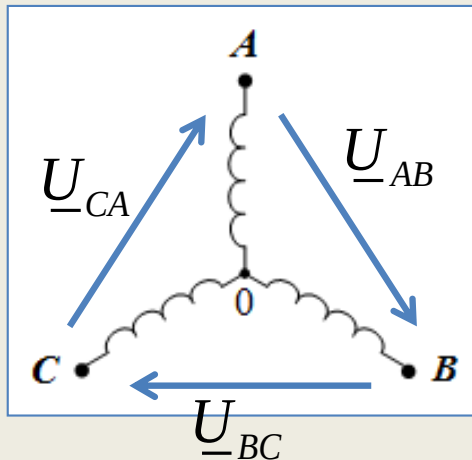
$$\underline{E}_C = \underline{U}_C = U_\Phi \angle 120^\circ$$

для прямой последовательности



Соединение фазных обмоток генератора «звездой»

Комплексные *линейные напряжения* – разность фазных напряжений

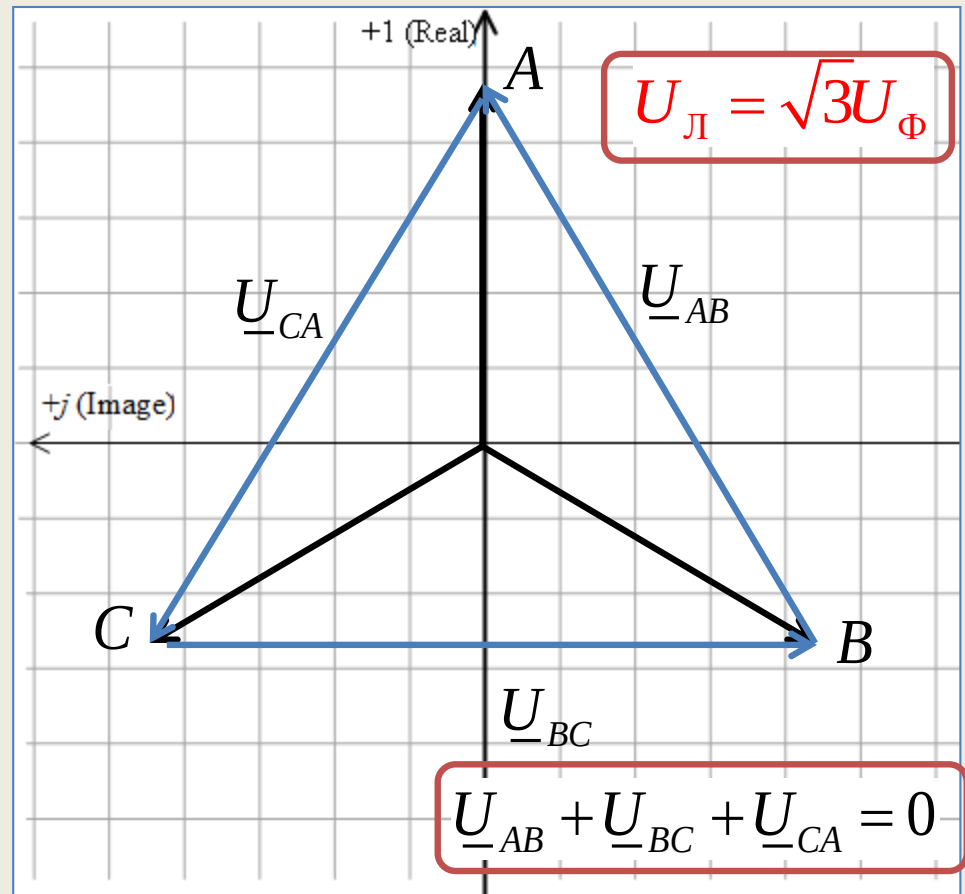


$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_{\text{л}} \angle 30^\circ$$

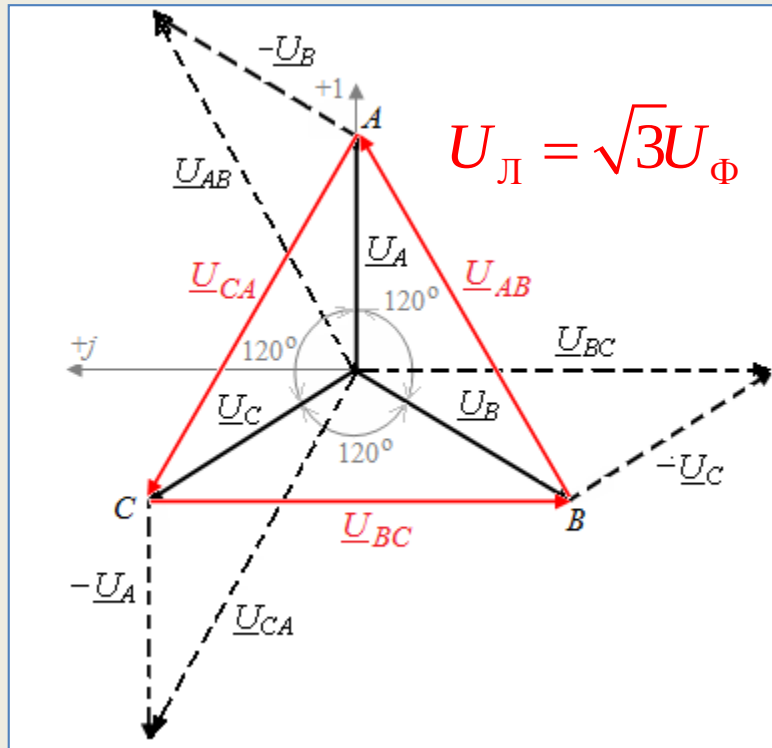
$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_{\text{л}} \angle -90^\circ$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_{\text{л}} \angle 150^\circ$$

для прямой последовательности



Фазные и линейные напряжения при соединении фазных обмоток генератора «звездой»



Фазные напряжения

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A = U_\Phi \angle 0^\circ$$

$$\underline{E}_B = \underline{U}_B = U_\Phi \angle -120^\circ$$

$$\underline{E}_C = \underline{U}_C = U_\Phi \angle 120^\circ$$

Линейные напряжения

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_L \angle 30^\circ$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = U_L \angle -90^\circ$$

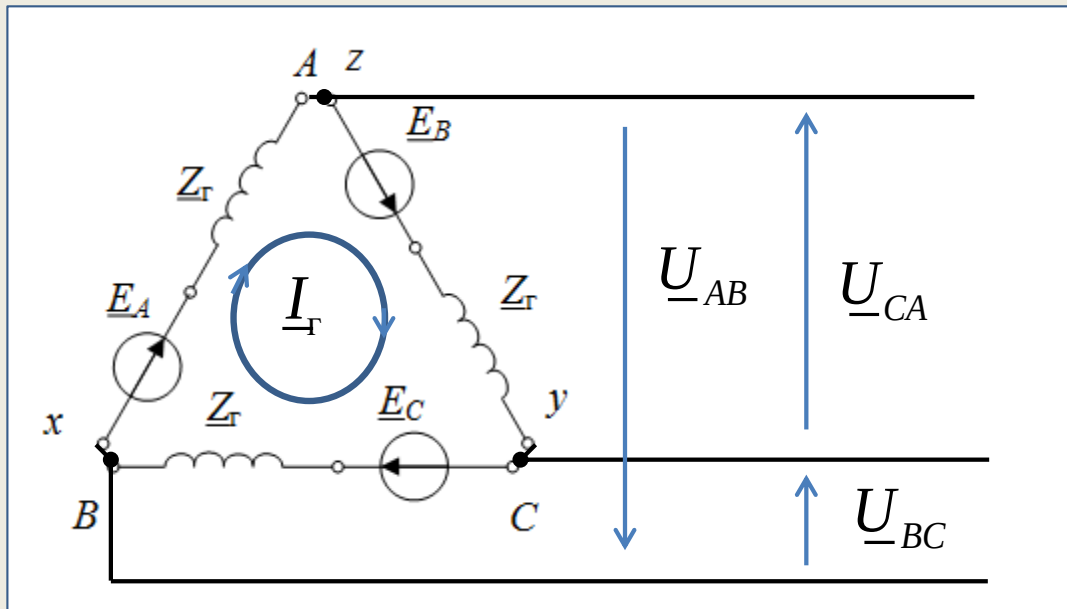
$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = U_L \angle 150^\circ$$

для прямой последовательности

$$U_\Phi = 220 \text{ В} \quad U_L = \sqrt{3}U_\Phi = 380 \text{ В}$$

Соединение фазных обмоток генератора «треугольником»

Соединим фазные обмотки генератора «треугольником»



для прямой последовательности

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{E}_A - \underline{I}_\Gamma \underline{Z}_\Gamma \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{E}_B - \underline{I}_\Gamma \underline{Z}_\Gamma \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{E}_C - \underline{I}_\Gamma \underline{Z}_\Gamma \end{aligned}$$

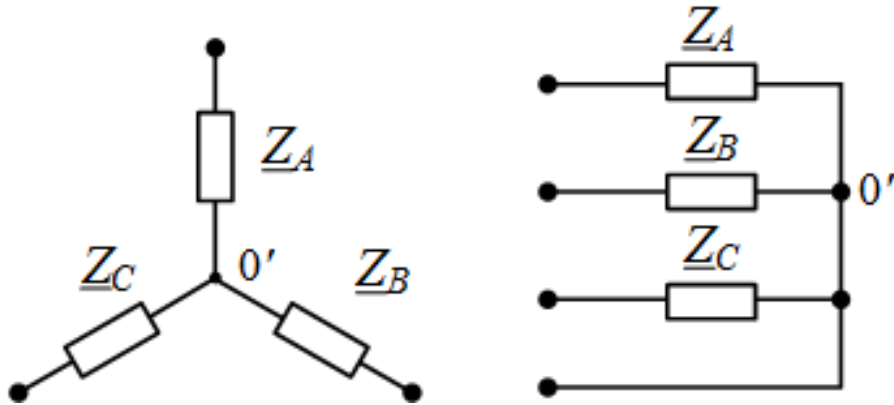
$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0 \Rightarrow \underline{I}_\Gamma = 0$$

$$\underline{U}_\text{Л} = \underline{U}_\text{Ф}$$

Так как сумма фазных ЭДС прямой последовательности равна нулю, то тока прямой последовательности в замкнутом контуре «треугольника» фазных обмоток генератора не будет.

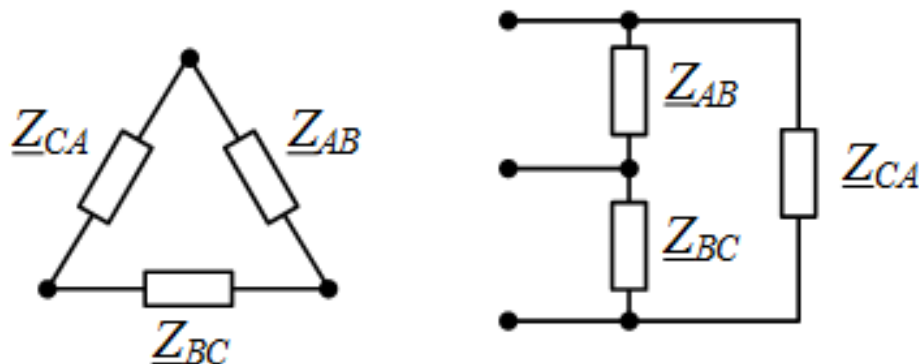
Соединение фазных обмоток трехфазной нагрузки

Соединение «звезда»



При соединении «звезда» появляется общая точка («нулевая» или «нейтральная»)

Соединение «треугольник»



Симметричная нагрузка

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

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$$

Автор доц. каф. ТОЭ НИУ «МЭИ»

Жохова М.П.



ZhokhovaMP@mpei.ru