

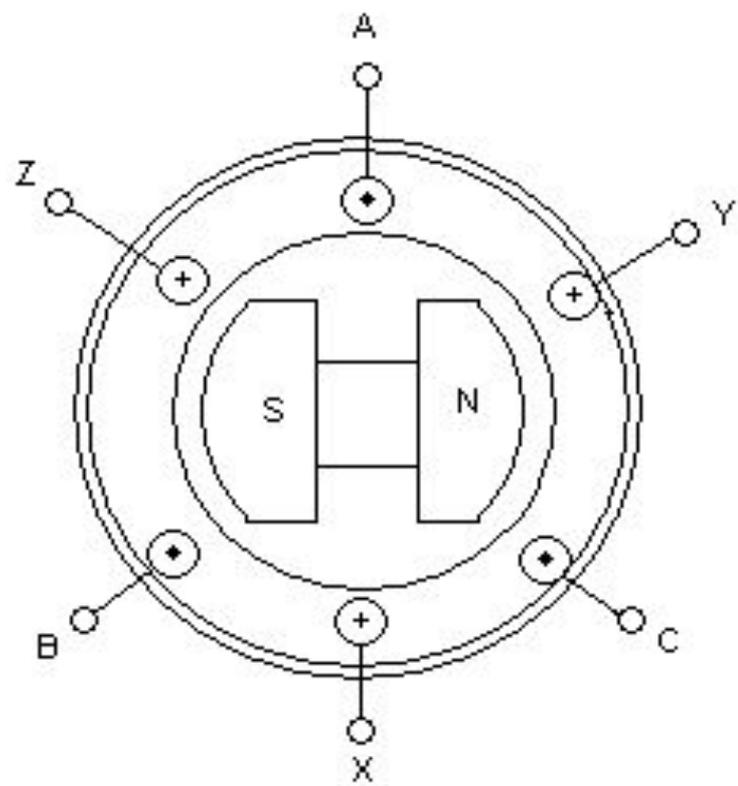
Трёхфазные цепи

1. Трёхфазная система ЭДС
2. Соединение обмоток генератора звездой
3. Соединение обмоток генератора треугольником
4. Соединение потребителей звездой
5. Соединение потребителей треугольником
6. Мощность трёхфазного тока
7. Вращающееся магнитное поле

1. Трёхфазная система ЭДС

Трёхфазной называется система трёх ЭДС одинаковой частоты, сдвинутых друг относительно друга по фазе так, что сумма углов сдвига фаз равна 2π , или 360° .

Трёхфазная система ЭДС называется **симметричной**, если ЭДС трёх фаз сдвинуты друг относительно друга на угол $2\pi/3 = 120^\circ$ и амплитуды этих трёх ЭДС одинаковы по величине:

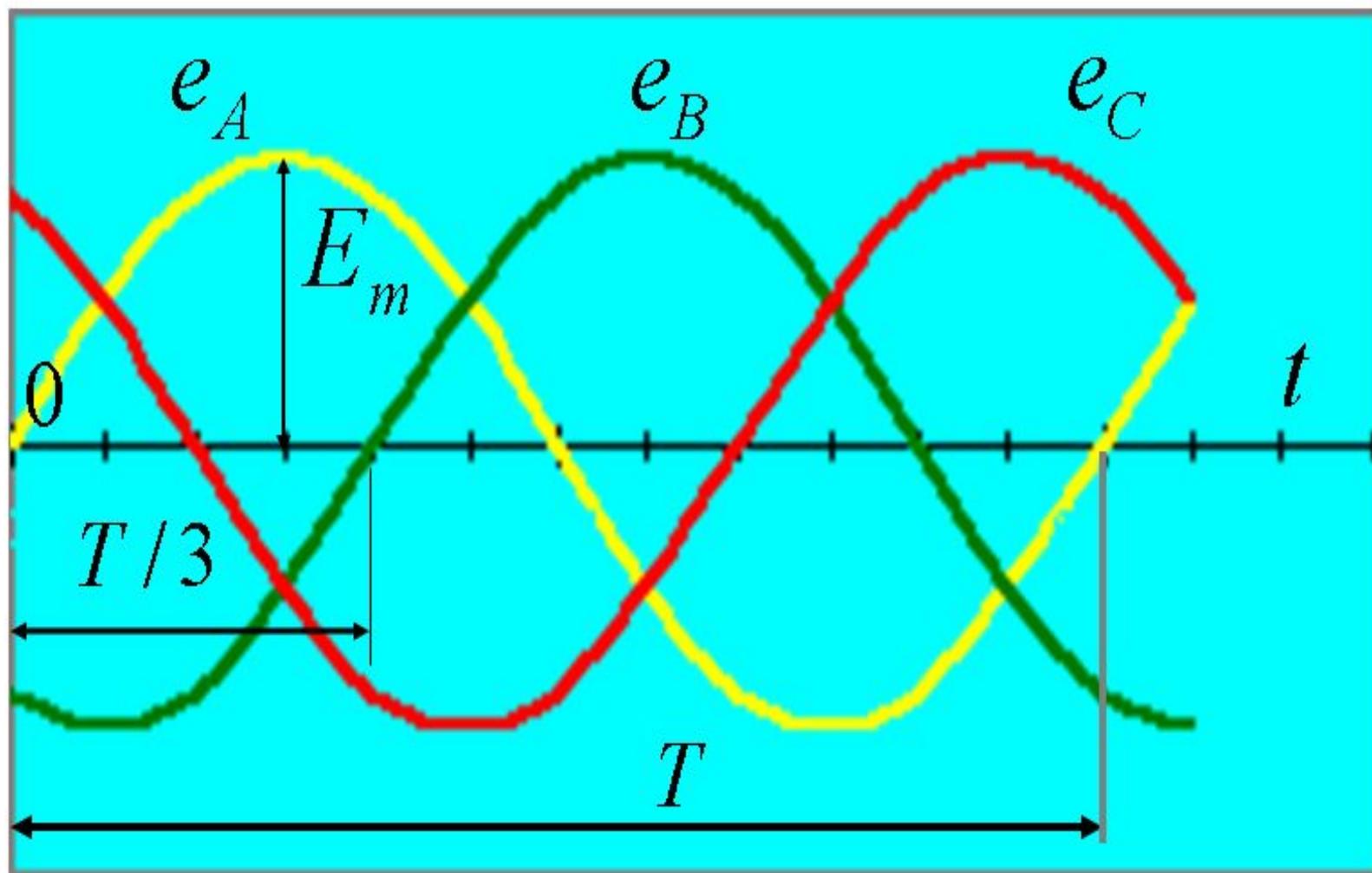


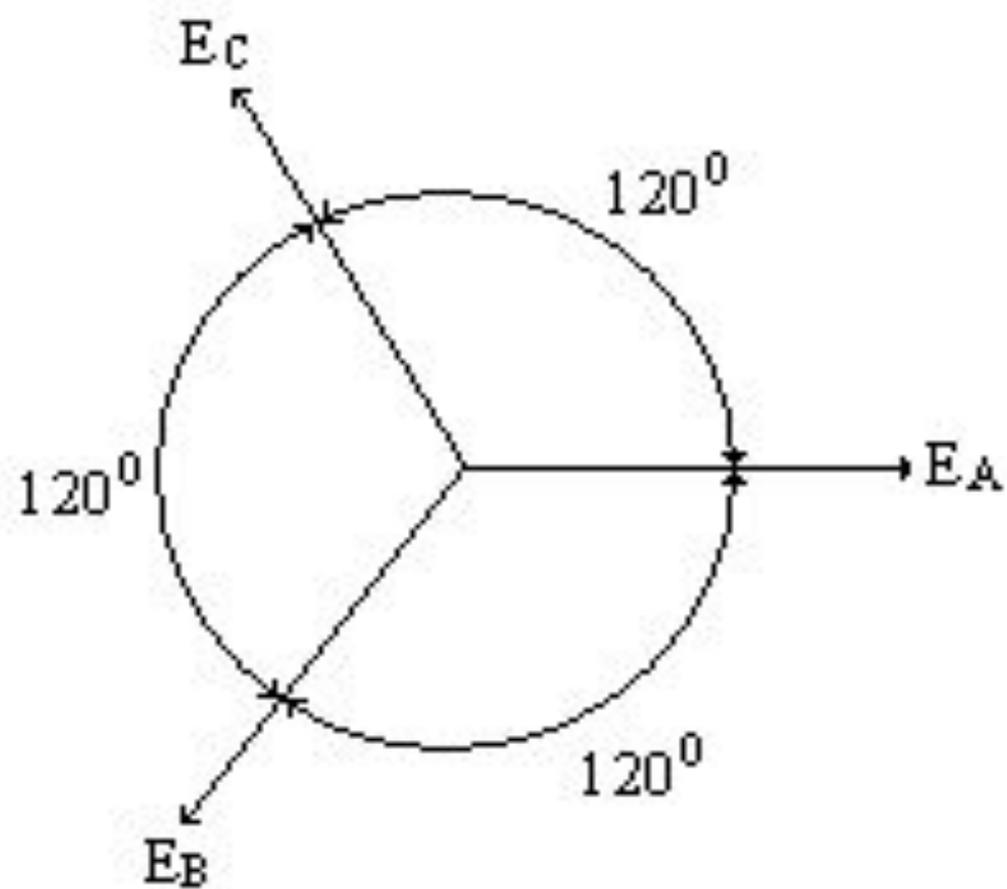
$$e_A = E_m \sin(\omega t)$$

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

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Получение симметрично трёхфазной системы ЭДС осуществляется в электромашинном генераторе, в котором три жёстко скреплённые под углом 120° обмотки пересекают магнитное поле с частотой ω .





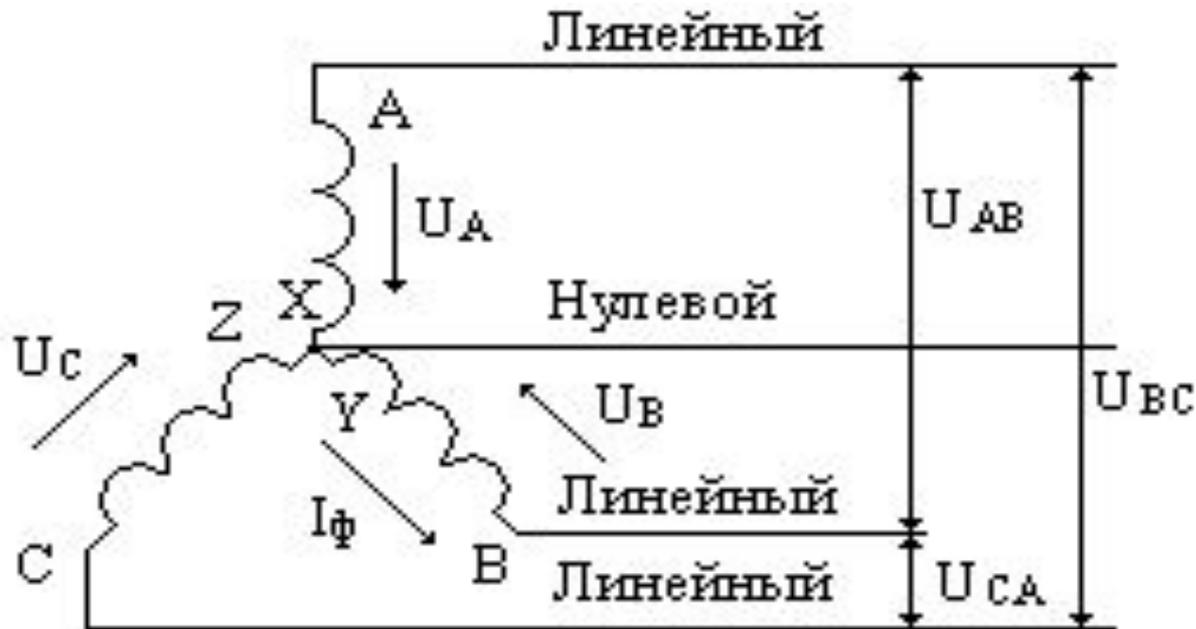
К каждой обмотке генератора может быть подключена нагрузка. Три обмотки генератора соединяются друг с другом электрически. Такая трёхфазная система называется **связанной**.

Каждая обмотка генератора со своей нагрузкой и соединительными проводами называется **фазой**.

В трёхфазной система энергоснабжения фазы обозначают прописными буквами **A, B, C**.

2. Соединение обмоток генератора звездой

При соединении обмоток генератора звездой концы обмоток X, Y, Z электрически соединяются. Эта точка соединения называется *нулевой (нейтральной)* и обозначается 0.



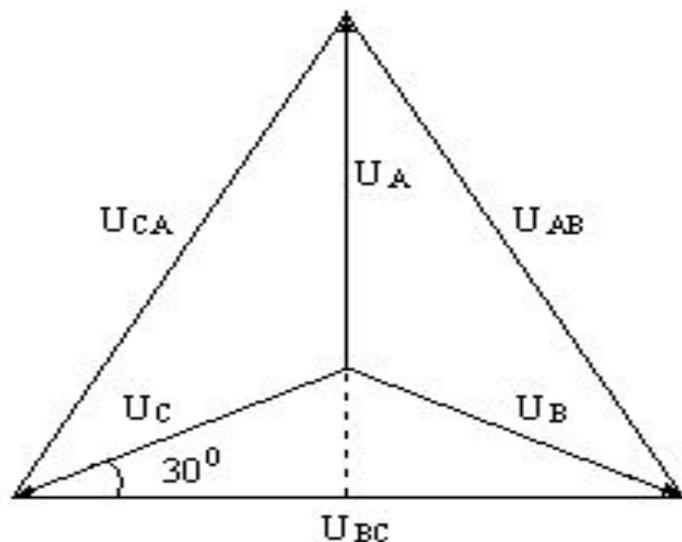
Фазным называется напряжение между началом и концом обмотки генератора или между нулевым и линейным проводом.

Обозначаются фазные напряжения прописными буквами с индексами фаз U_A, U_B, U_C

Линейным называется напряжение между началами обмоток генератора или между линейными проводами.

Обозначаются линейные напряжения прописными буквами с индексами фаз U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}

При соединении обмоток генератора звездой действующее линейное напряжение определяется геометрической разностью двух соответствующих фазных напряжений.



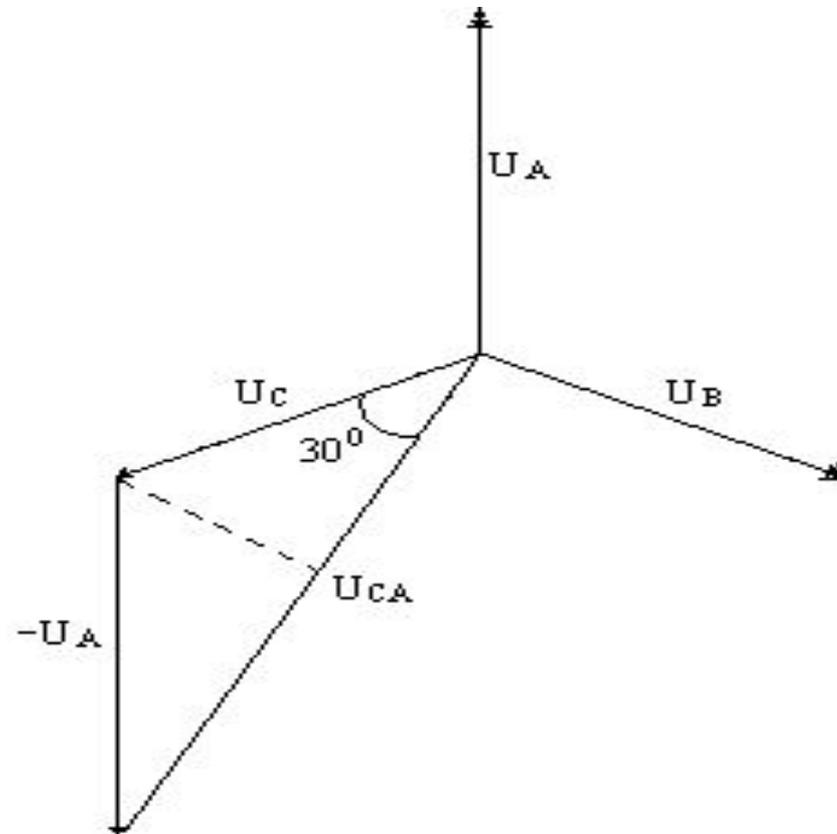
$$U_{AB} = U_A - U_B;$$

$$U_{BC} = U_B - U_C;$$

$$U_{CA} = U_C - U_A.$$

При симметричной системе ЭДС фазные напряжения равны по величине ($U_A = U_B = U_C$) и сдвинуты на 120°

Определим линейное напряжение по векторной диаграмме



$$U_{CA} = 2 U_C \cos 30^\circ = 2 U_C \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_C$$

При симметричной системе ЭДС линейное напряжение трёхфазного генератора, обмотки которого соединены звездой, в

$\sqrt{3} = 1,73$ раза больше фазного напряжения:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$$

В связанных трёхфазных системах **фазным** называется ток, проходящий по обмотке (фазе) генератора $I_{\text{ф}}$, а линейным считается ток, проходящий по линейному проводу $I_{\text{л}}$.

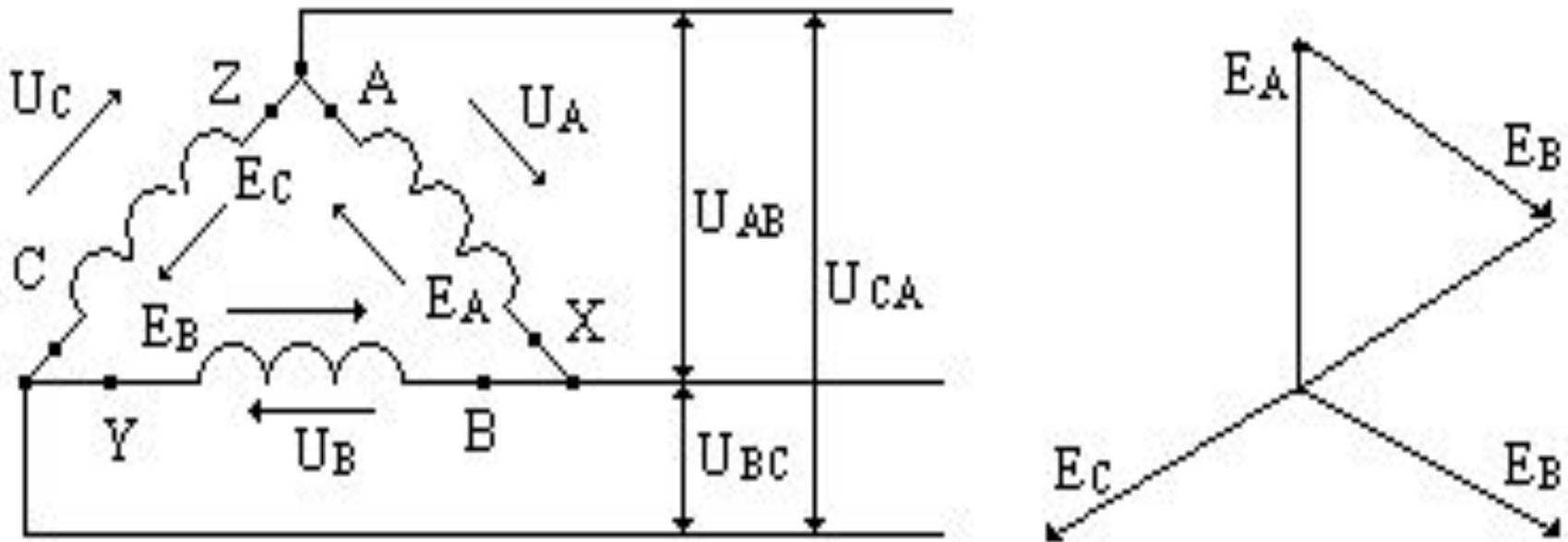
При соединении обмоток генератора звездой линейный ток $I_{\text{л}}$ равен фазному току

$I_{\text{ф}}$:

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}.$$

3. Соединение обмоток генератора треугольником

При соединении обмоток генератора треугольником конец обмотки фазы А соединяется с началом обмотки фазы В, конец обмотки фазы В соединяется с началом обмотки фазы С, конец обмотки фазы С соединяется с началом обмотки фазы А и к точкам соединения подключаются линейные провода.

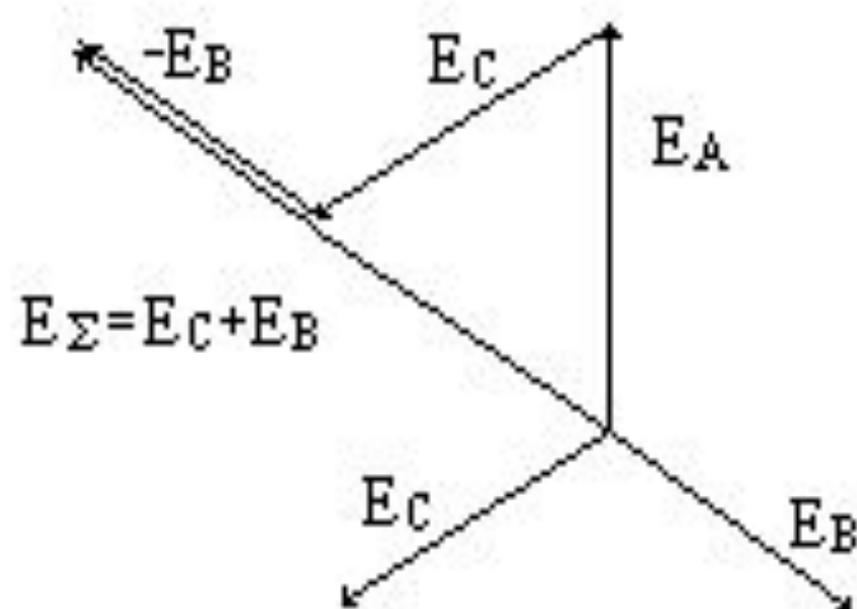
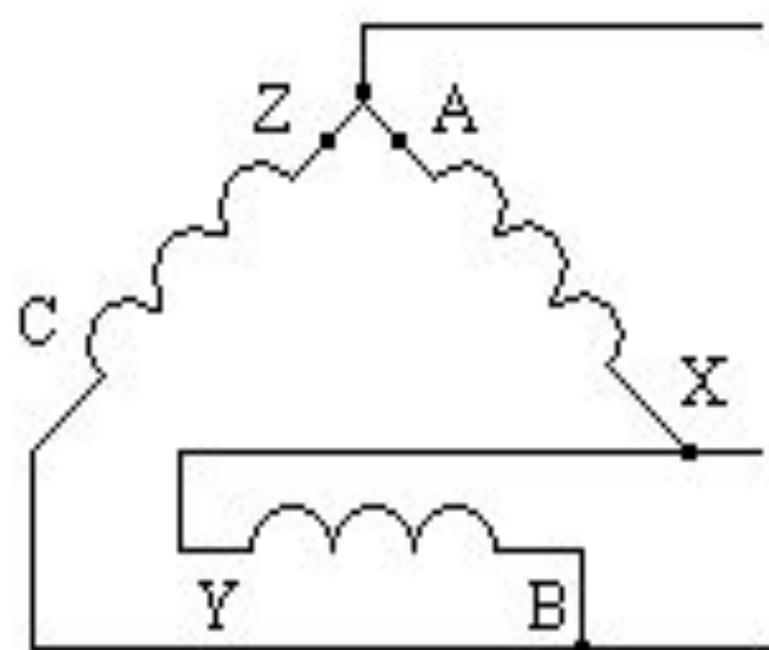


При соединении обмоток генератора треугольником трёхфазная цепь трёхпроводная.

Из схемы соединения обмоток треугольником следует, что линейное напряжение U_{AB} равно фазному напряжению U_A
 $U_{BC} = U_B, U_{CA} = U_C$
 т.е.

$$U_{л} = U_{ф}.$$

- При симметричной системе ЭДС и правильном соединении обмоток генератора треугольником геометрическая сумма ЭДС обмоток генератора, образующих замкнутый контур, равна нулю. Следовательно, и ток в замкнутом контуре обмоток, соединенных треугольником, также равен нулю при холостом ходе независимо от внутреннего сопротивления обмоток.
- Если обмотки симметричного генератора соединены «неправильным» треугольником, т.е. неправильно подключить начало и конец хотя бы одной из обмоток, то геометрическая сумма ЭДС в замкнутом контуре обмоток будет равна удвоенному значению ЭДС одной фазы. С учётом малого внутреннего сопротивления обмоток генератора ток в замкнутом контуре достигает катастрофической величины даже при отсутствии нагрузки (холостой ход), что равносильно короткому замыканию в замкнутом контуре обмоток.



4. Соединение потребителей звездой

При соединении звездой потребителя и генератора трёхфазная система представляет собой сложную цепь с двумя узловыми точками .

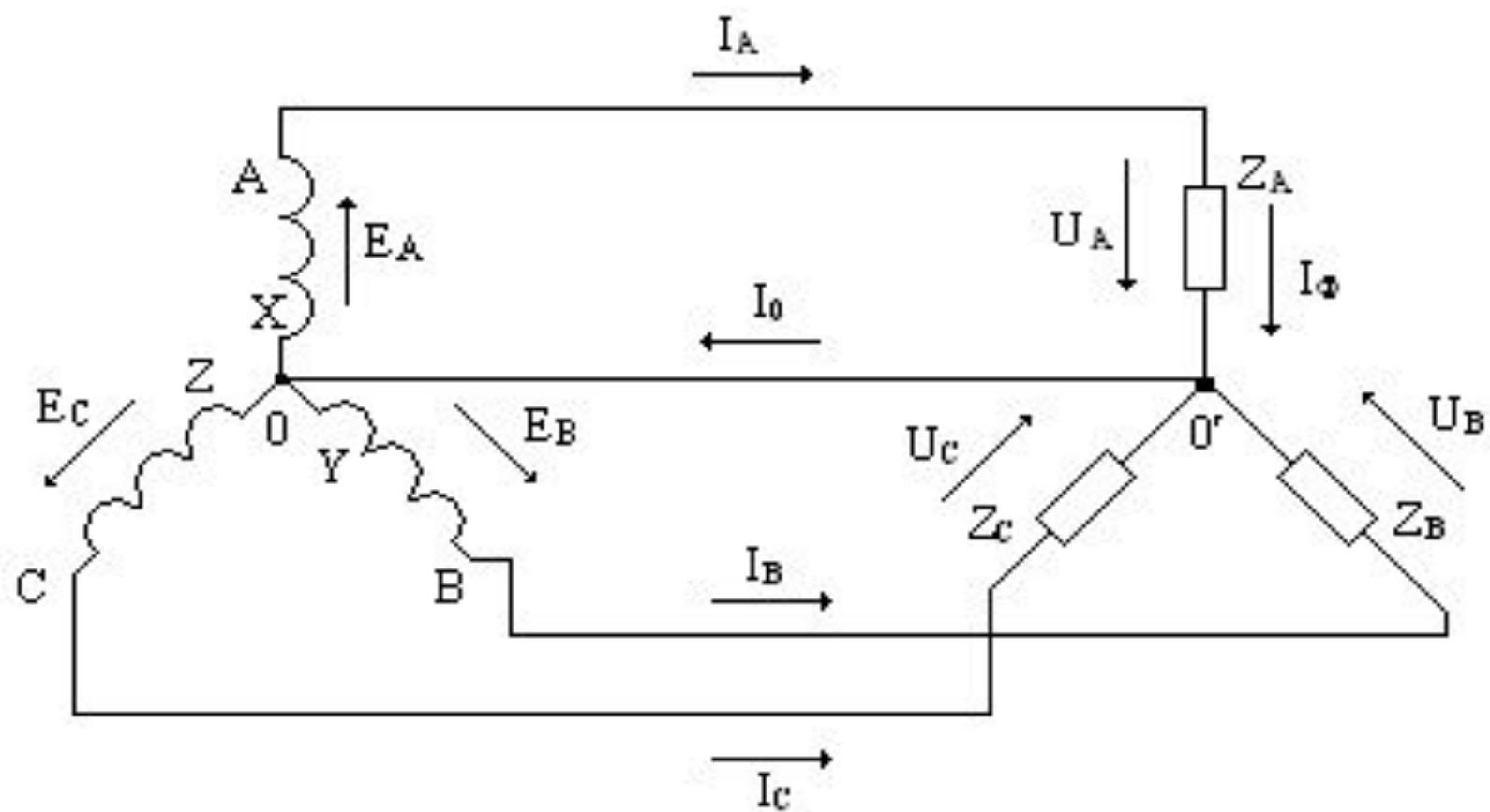
Соединение генератора и потребителя с нулевым проводом представляет собой четырёхпроводную схему. При этом потенциалы узловых точек одинаковы, и если сопротивления фаз одинаковы по величине

$$Z_A = Z_B = Z_C$$

и имеют одинаковый угол сдвига фаз

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C,$$

то такую нагрузку, подключенную к трёхфазному генератору, считают симметричной.



Величина напряжения на каждой фазе потребителя, соединенного звездой, в $\sqrt{3} = 1,73$ раза меньше линейного напряжения, т.е.

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

Ток в нулевом проводе при соединении потребителей звездой определяется геометрической суммой токов в фазах потребителя:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$$

Токи в фазах потребителя определяются по формулам

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A};$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B};$$

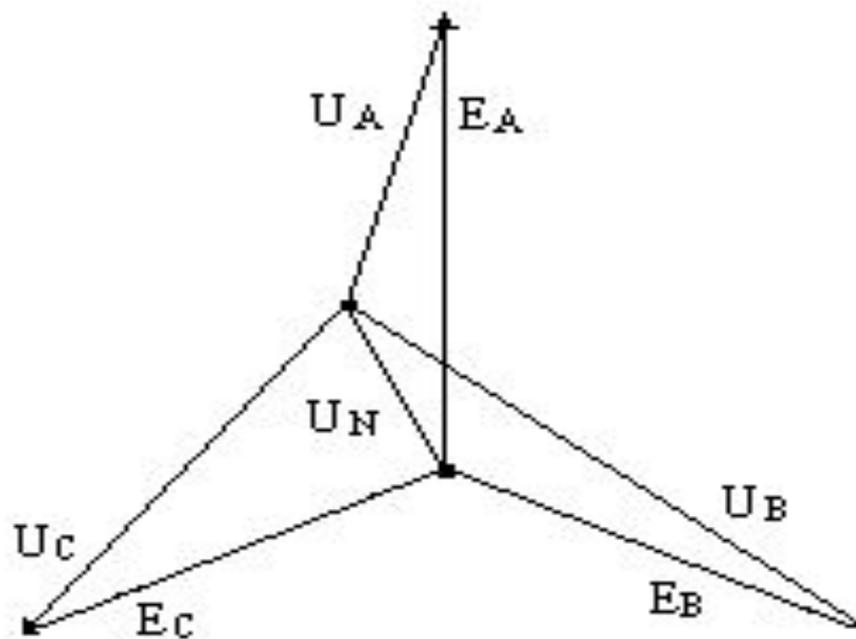
$$I_C = \frac{U_C}{Z_C}.$$

Очевидно, при равномерной нагрузке фаз $U_A = U_B = U_C$ и $Z_A = Z_B = Z_C$ токи в фазах равны по величине и сдвинуты, как и напряжения, по фазе на 120^0 . Следовательно, их геометрическая сумма

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$$

равна нулю, т.е. ток в нейтральном проводе отсутствует.

При неравномерной (несимметричной) нагрузке фаз отсутствие нулевого провода приводит к неодинаковым по величине напряжениям на каждой фазе потребителя. При этом на фазе с большим сопротивлением будет и большее напряжения.



Т.к. отсутствие нулевого провода при неравномерной нагрузке фаз потребителя, соединенного звездой, нарушает режим работы потребителей, то предохранитель в нулевом проводе не ставят.

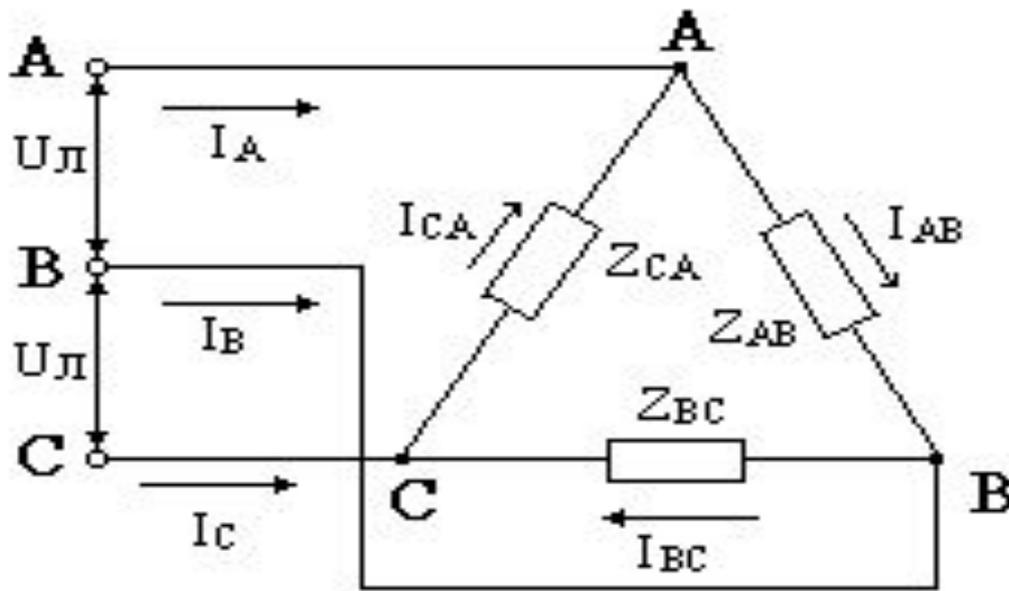
Следовательно, нулевой провод служит для выравнивания напряжений на фазах потребителя при неравномерной нагрузке фаз.

При соединении потребителя звездой ток каждой фазы потребителя равен линейному току трёхфазной цепи:

$$I_{\Phi} = I_{Л}.$$

5. Соединение потребителей треугольником

При соединении потребителя треугольником к каждой фазе потребителя приложено напряжение трёхфазной цепи



Т.к. при симметричной ЭДС все линейные напряжения равны по величине и сдвинуты на угол 120° по фазе, то и напряжения на каждой фазе потребителя, соединенного треугольником, равны по величине

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi}$$

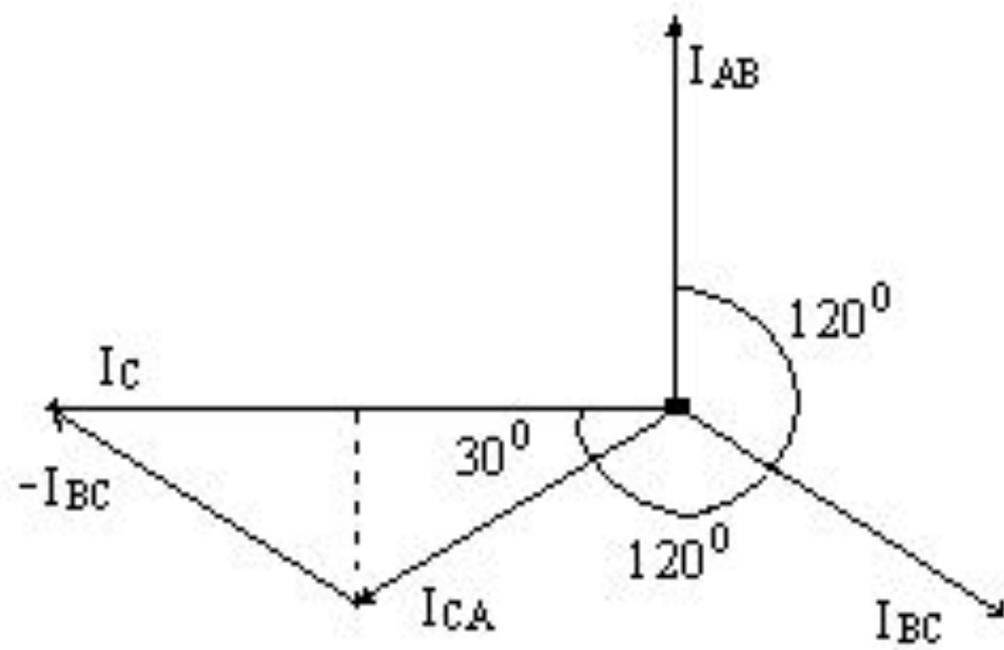
и сдвинуты по фазе на угол 120° независимо от нагрузки.

- В соответствии с первым законом Кирхгофа линейные токи можно определить выражениями:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

- Линейный ток при соединении потребителей треугольником определяется геометрической разностью двух фазных токов, сходящихся с линейным в одной узловой точке.
- Фазные токи потребителя, соединенного треугольником, определяются

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}}.$$



При симметричной системе ЭДС генератора () и равномерной нагрузке фаз потребителя () токи в фазах потребителя равны между собой по величине () и также как напряжения на фазах потребителя сдвинуты друг относительно друга по фазе на угол 120° .

$$I_C = 2I_{CA} \cos 30^\circ = 2I_{CA} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}I_{CA}.$$

Таким образом, при равномерной нагрузке фаз и симметричной системе ЭДС при соединении потребителей треугольником линейный ток в трёхфазной цепи в $\sqrt{3}$ раза больше фазного тока.

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

6. Мощность трёхфазного тока

- Активная мощность, отдаваемая трёхфазным генератором и потребляемая трёхфазным потребителем, определяется суммой активных мощностей каждой фазы потребителя:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

- Аналогично для реактивной мощности трёхфазного тока:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

- Полная мощность трёхфазного потребителя

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

На практике удобнее оперировать линейными величинами, т.к. доступными являются линейные провода, а не обмотки генератора или двигателя.

- При соединении потребителя звездой при равномерной нагрузке фаз

$$U_{\Phi} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}}, \quad I_{\Phi} = I_{Л}.$$

Тогда

$$P = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \cos \varphi = 3 \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} I_{Л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi.$$

При соединении потребителей треугольником при равномерной нагрузке фаз

$$U_{\phi} = U_{Л}, \quad \text{а} \quad I_{\phi} = \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}}.$$

Тогда

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} I_{Л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi.$$

Т.о., при равномерной нагрузке фаз при соединении потребителей звездой и треугольником мощности трёхфазного тока определяются выражениями:

$$P = \sqrt{3}U_{Л} I_{Л} \cos \varphi;$$

$$Q = \sqrt{3}U_{Л} I_{Л} \sin \varphi;$$

$$S = \sqrt{3}U_{Л} I_{Л} .$$