

Трехфазный ток

§1. Основные понятия

1.1. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА электрических цепей - состоит из *трех цепей*, в которых действуют переменные напряжения

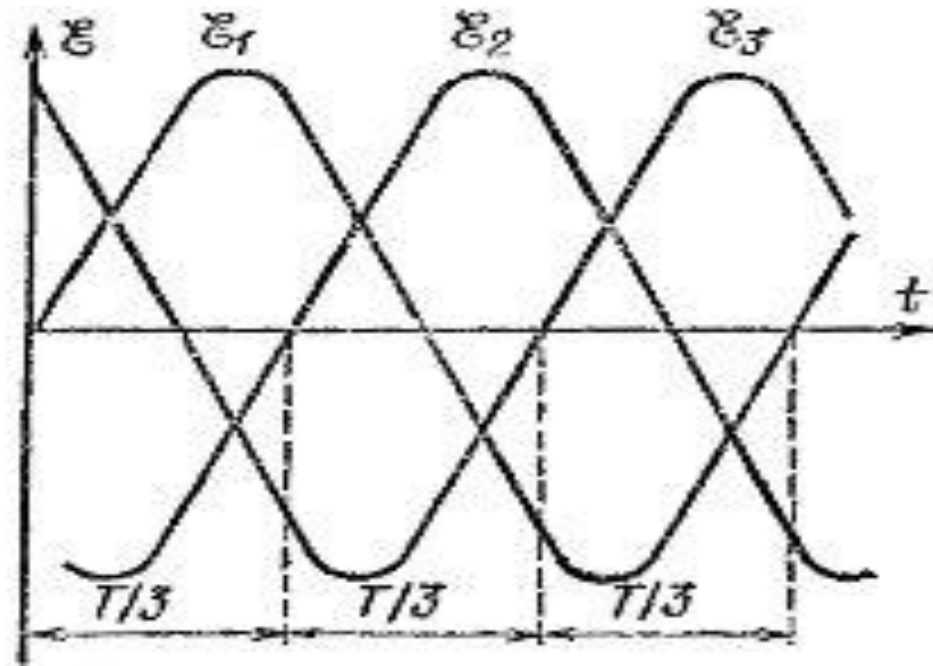
- *одной* и той же частоты,
- *сдвинутые* по фазе друг от друга на $1/3$ периода ($\varphi=2\pi/3$).

1.2. ФАЗА - каждая *отдельная цепь* такой системы

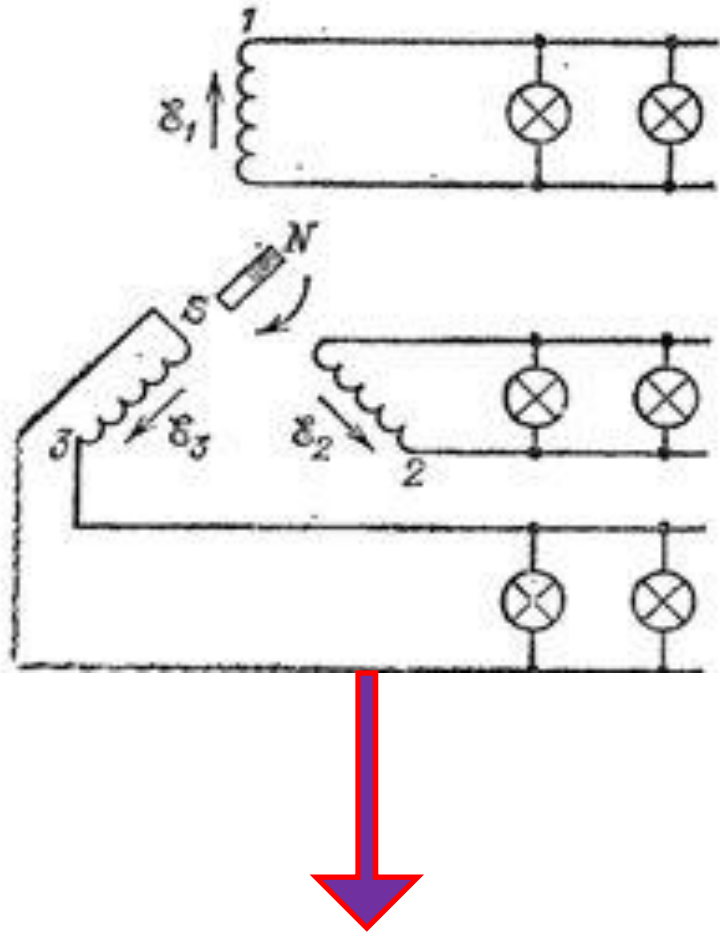
1.3. ГЕНЕРАТОР ТРЕХФАЗНОГО ТОКА - *соединение* в одной машине *трех генераторов* так, что *индуцированные* в них ЭДС *сдвинуты друг от друга* на $1/3$.



Почти все генераторы,
установленные на наших
электростанциях



§2. Работа 3-х фазного генератора



*3 самостоятельных катушки,
расположенных на статоре
смещенных на 120° .
В центре вращается общий для
всех катушек индуктор,
(например постоянный магнит).*

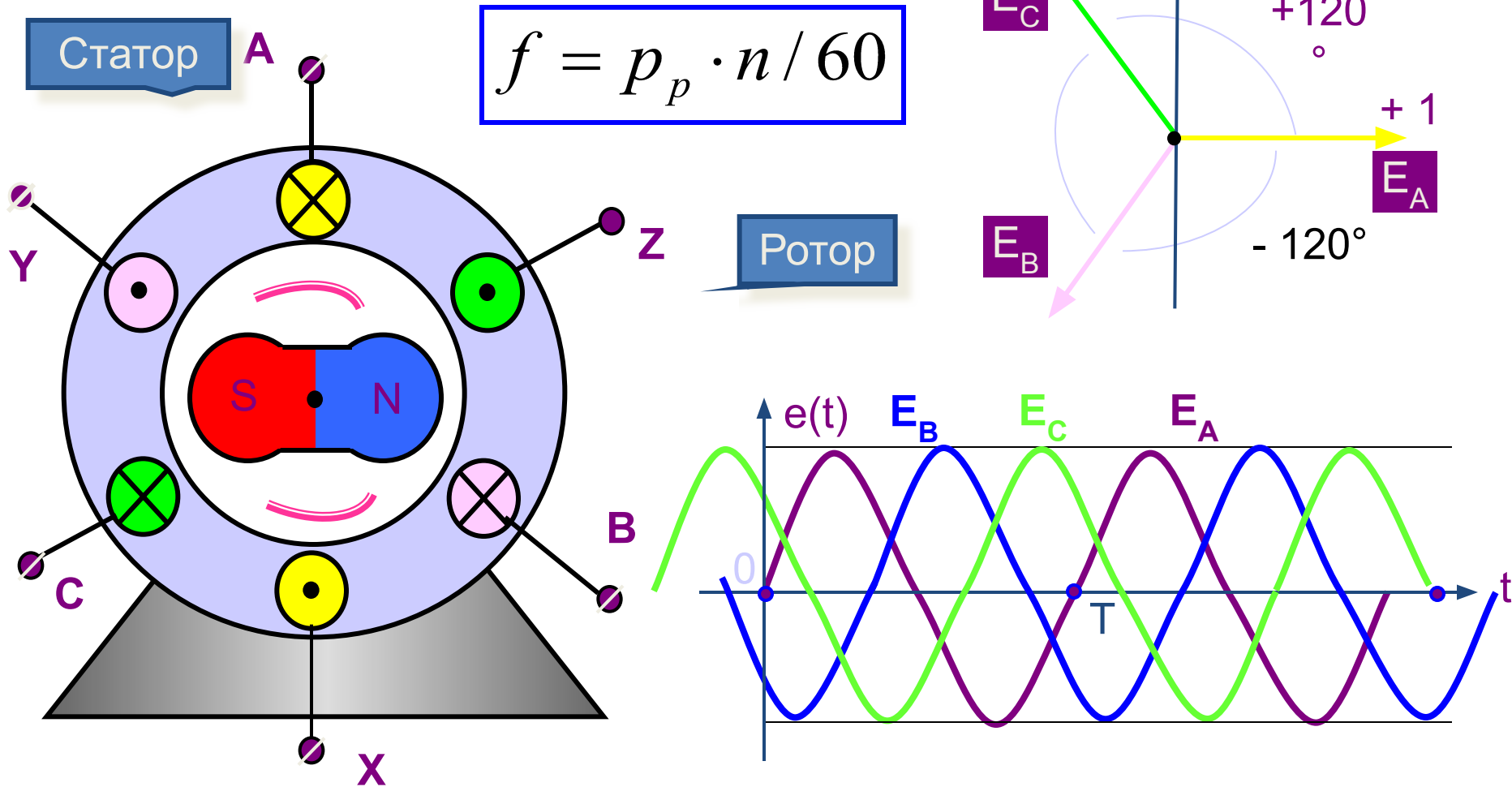
*Каждая обмотка -
самостоятельный генератор тока
и источник электроэнергии.*

*Провода к концам каждой из них
- три независимые цепи*

*Для передачи энергии электроприемникам (например
лампочкам), требовалось бы ШЕСТЬ проводов.*

*Можно так соединить между собой обмотки генератора, чтобы
было 4 или 3 провода (см. « Δ » и « Y »)*

ИТАК! Источником энергии в трехфазной системе служит трехфазный синхронный генератор.



**В пазах статора размещены изолированные друг от друга обмотки
– ФАЗНЫЕ ОБМОТКИ ГЕНЕРАТОРА.**

Фазы трехфазного генератора принято обозначать буквами латинского алфавита:

А-Х, В-У, С-З; (буква А обозначает начало фазной обмотки, Х – конец соответствующей фазной обмотки).

При прямой последовательности чередования фаз мгновенные значения ЭДС трех фазных обмоток будут равны:

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

$$e_B(t) = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = e_A(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C(t) = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = e_A(t) = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

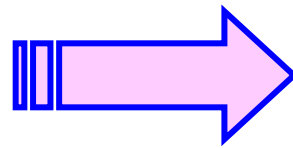
Комплексные значения ЭДС можно выразить как действующее значение E_Φ (одинаковое) и комплексный множитель.

$$\dot{E}_A = E_\Phi e^{-j0} = E_\Phi$$

$$\dot{E}_B = E_\Phi e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E_\Phi e^{-j120^\circ} = E_\Phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = E_\Phi (-0,5 - j0,867)$$

$$\dot{E}_C = E_\Phi e^{j\frac{2\pi}{3}} = E_\Phi e^{j120^\circ} = E_\Phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = E_\Phi (-0,5 + j0,867)$$

$$e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = a$$



Фазный множитель системы трехфазной системы

Таким образом

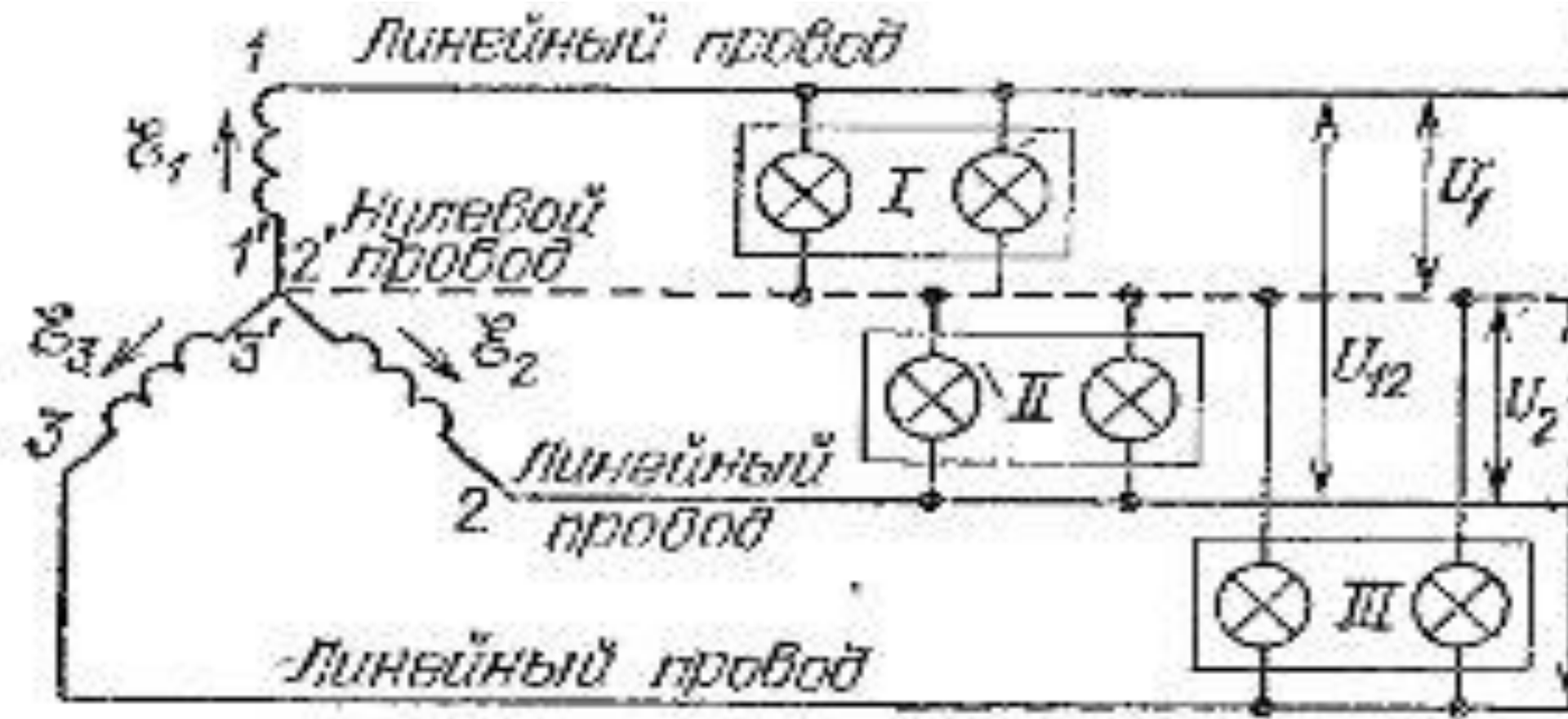
$$\dot{E}_A = E_\Phi$$

$$\dot{E}_B = E_\Phi \cdot a^2$$

$$\dot{E}_C = E_\Phi \cdot a$$

Для получения трехфазной системы необходимо определенным образом соединить фазы источника энергии и фазы приемника.

§3. Соединение звездой (четырёхпроводная)



Концы обмоток (1', 2', 3') - в одну точку генератора (нулевая точка или нейтраль) => ЧЕТЫРЕ провода:

- три линейных от начала обмоток (1, 2, 3),
- нулевым или нейтральным от нулевой точки.

Основные понятия трехфазной цепи (системы)

Фазное напряжение U_ϕ – напряжение между началом и концом фазы источника или приемника.

Фазный ток I_ϕ – ток в фазе трехфазной цепи.

Линейное напряжение U_Δ – напряжение между линейными проводами или между началами разных фаз.

Линейный ток I_Δ – ток в линейном проводе.

Симметричный приемник электрической энергии – трехфазный приемник, у которого комплексные сопротивления всех фаз одинаковы

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

Симметричный режим работы трехфазной цепи – при котором , трехфазные системы напряжений и токов симметричны.

Напряжения между нулевой точкой и началом каждой фазы – ФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

Фазные напряжения обычно обозначают U_1, U_2, U_3 или U_ϕ

Напряжения между началами обмоток (т.е. точками 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1) - ЛИНЕЙНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ U_{12}, U_{23}, U_{31} или U_L .

Между амплитудами или действующими значениями *фазных* и линейных напряжений *соотношение* $U_L = \sqrt{3}U_\phi \approx 1,73U_\phi$

Если *фазное напряжение* $U_\phi = 220 \text{ В}$, то при *соединении обмоток генератора звездой* линейное напряжение $U_L = 380 \text{ В}$.



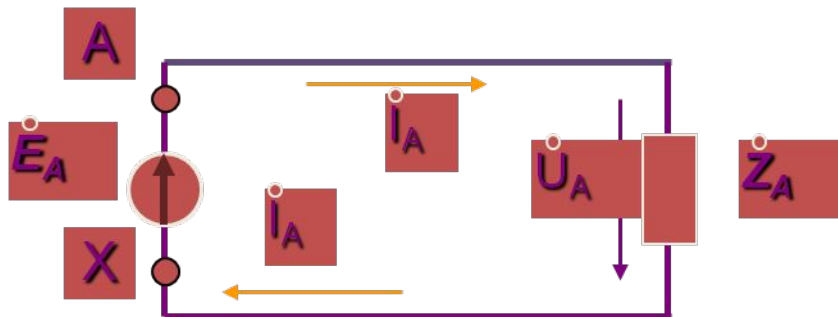
Нагрузки (электролампы I, II, III) питаются фазными напряжениями.

При эксплуатации трехфазного переменного тока стремятся нагрузку различных фаз сделать, по возможности, одинаковой.

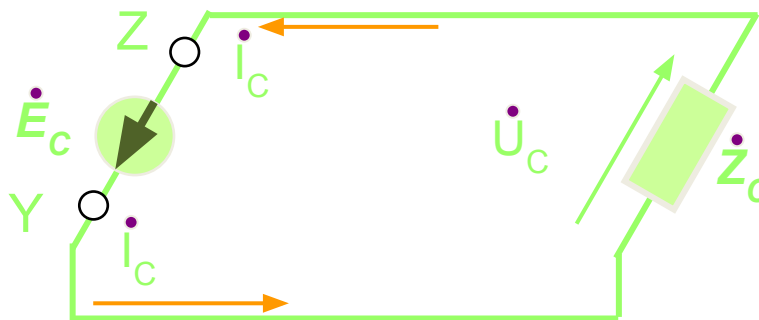
Поэтому, например, при устройстве осветительной сети большого дома при четырехпроводной системе в каждую квартиру вводят нулевой провод и один из линейных с таким расчетом, чтобы в среднем на каждую фазу приходилась примерно одинаковая нагрузка.

Дополнительные пояснения Соединение фаз источника энергии и приемника звездой.

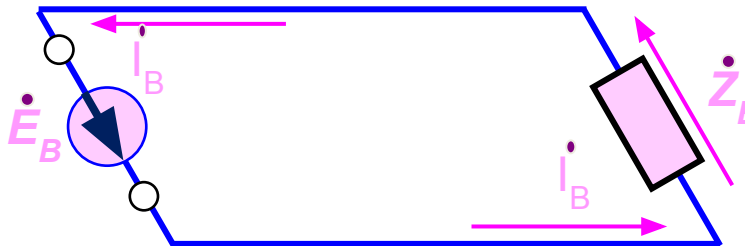
$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{\dot{Z}_A}$$

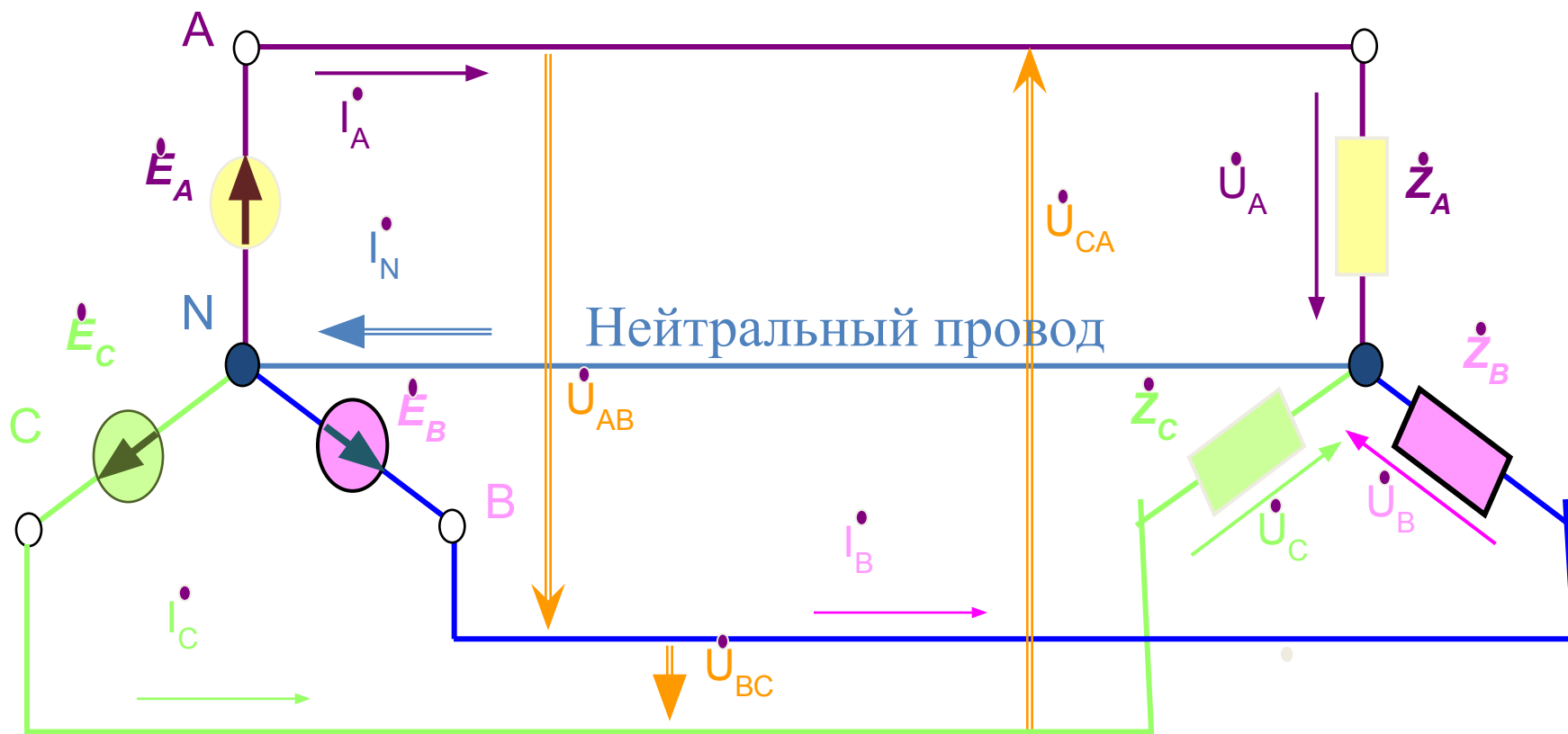


$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{\dot{Z}_C}$$



$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{\dot{Z}_B}$$





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

Фазные
напряжения

$$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$$

Фазные
токи

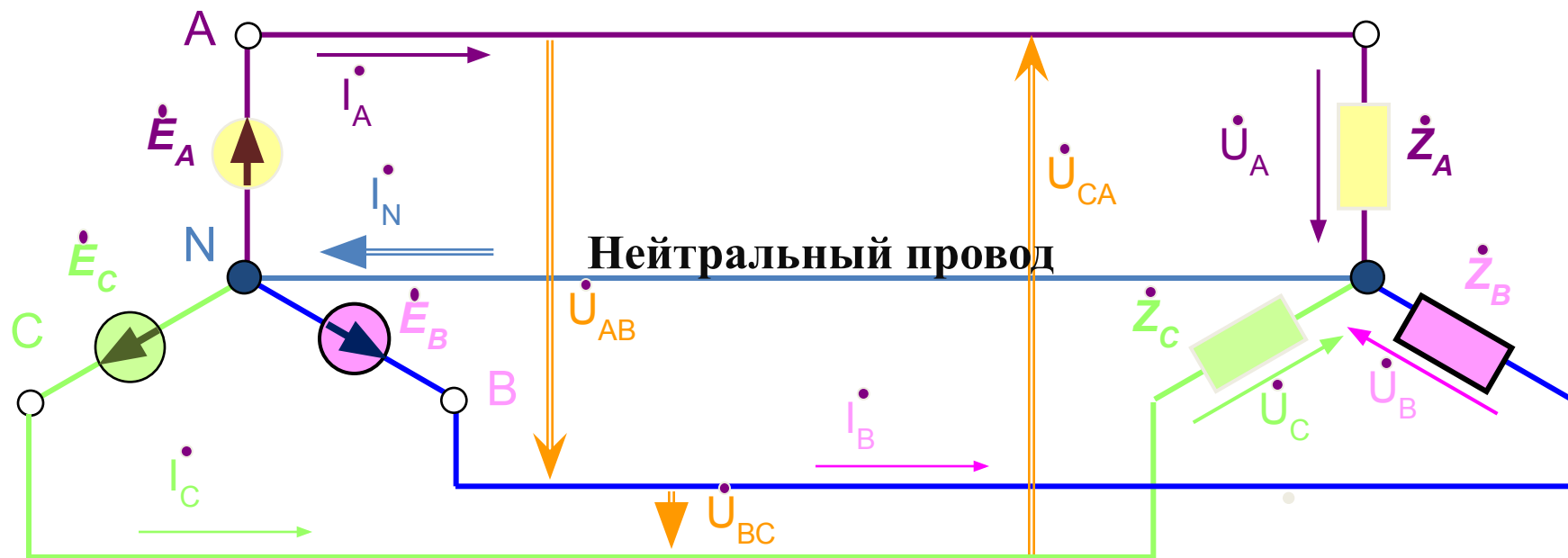
$$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$$

Линейные
напряжения

$$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$$

Линейные
токи

$$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$$



На основании второго закона Кирхгофа для контуров соответствующих ФАЗ:

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

$$\dot{E}_B = \dot{U}_B$$

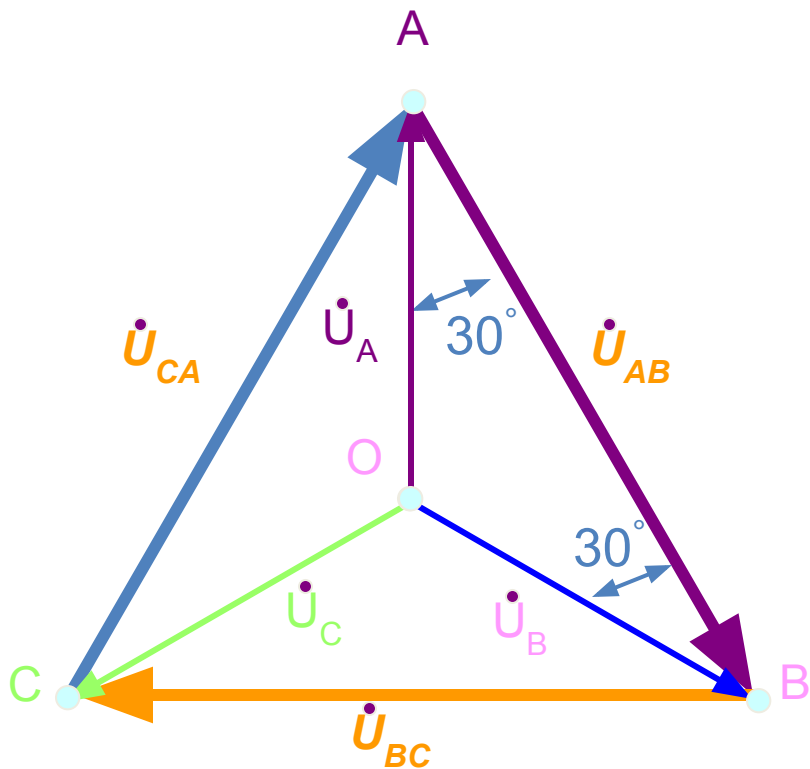
$$\dot{E}_C = \dot{U}_C$$

Для ЛИНЕЙНЫХ напряжений

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_L e^{j30^\circ}$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U_L e^{-j90^\circ}$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_L e^{j150^\circ}$$



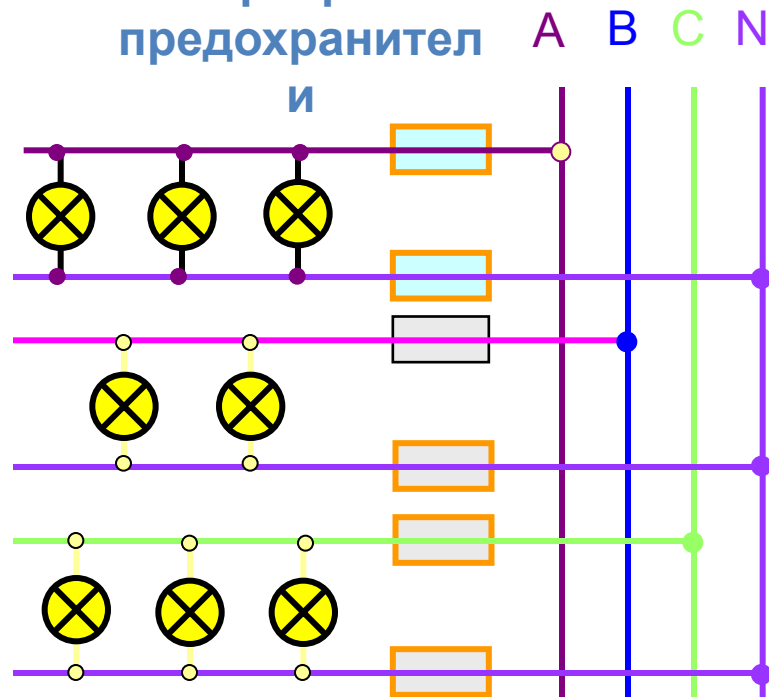
ΔAOB - равнобедренный

$$U_A = U_B = U_C = U_\Phi$$

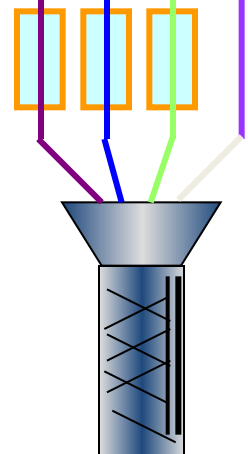
$$U_L = 2 \cdot U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$$

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$$

Квартирные
предохранители

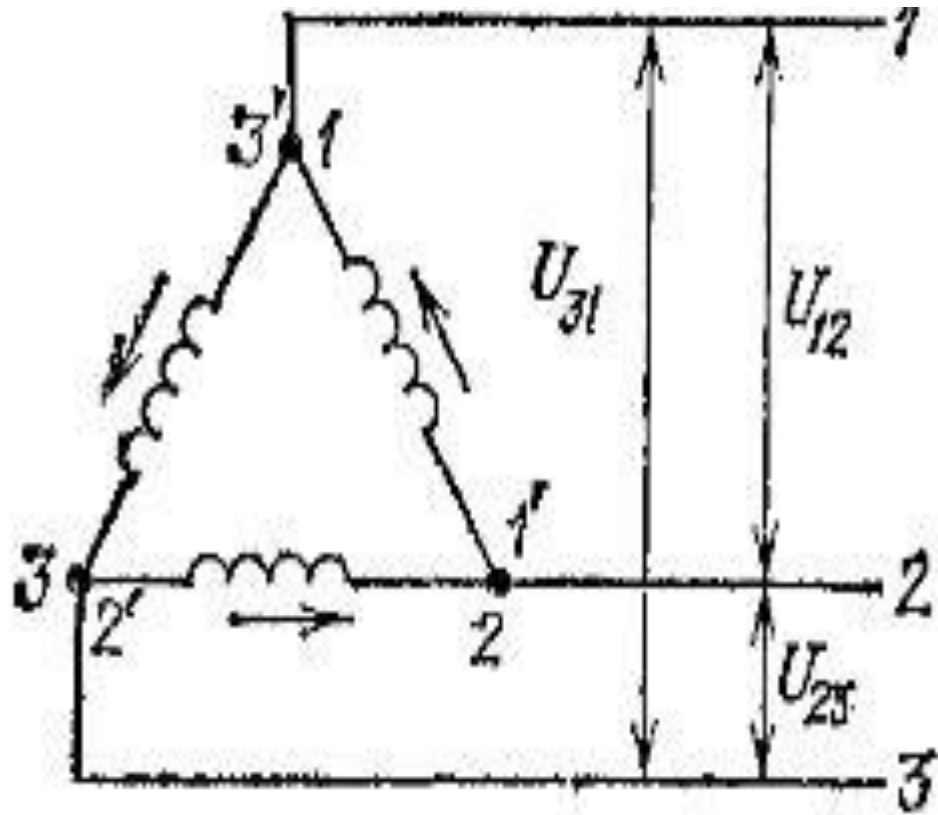


Магистральные
предохранители



$$I_L = I_\Phi$$

§4. Соединение треугольником



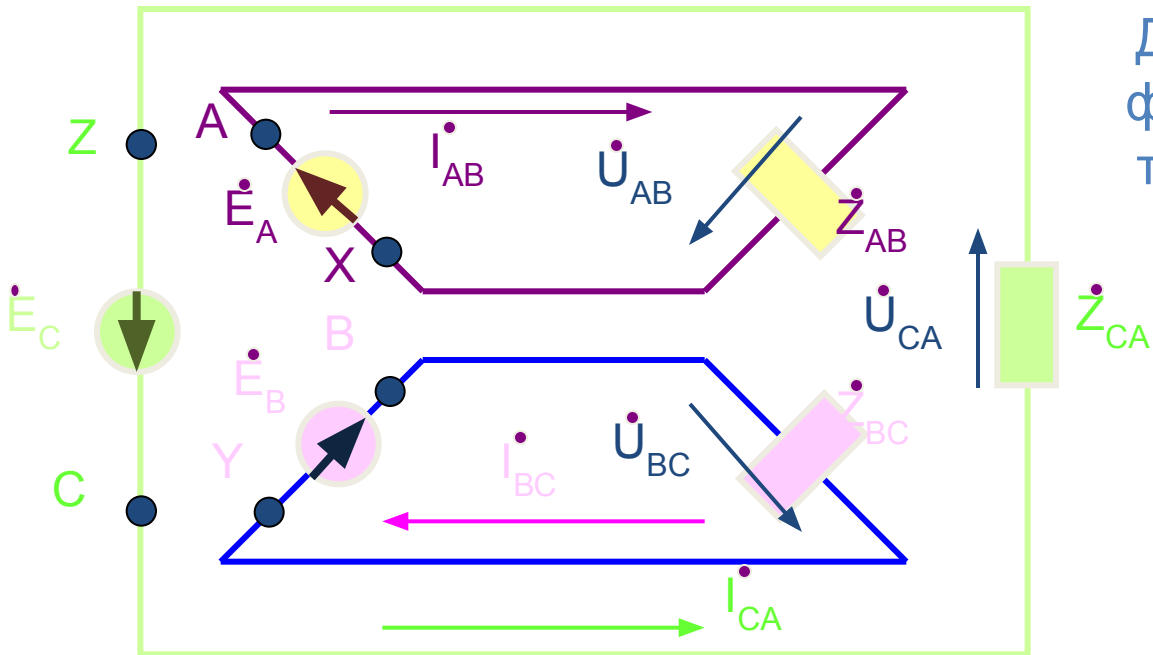
- Конец каждой обмотки соединен с началом следующей =>
- Образуется треугольник.
- Линейные провода присоединены к вершинам (точки 1, 2 и 3).

При соединении треугольником линейное напряжение генератора РАВНО его фазному напряжению: $U_{л} = U_{ф}$.

□ Соединение треугольником также допустимо лишь при *одинаковой* (или почти одинаковой) нагрузке фаз.

□ Иначе ток в замкнутом контуре обмоток будет слишком *велик*, что опасно для генератора

Дополнительно Соединение треугольником.

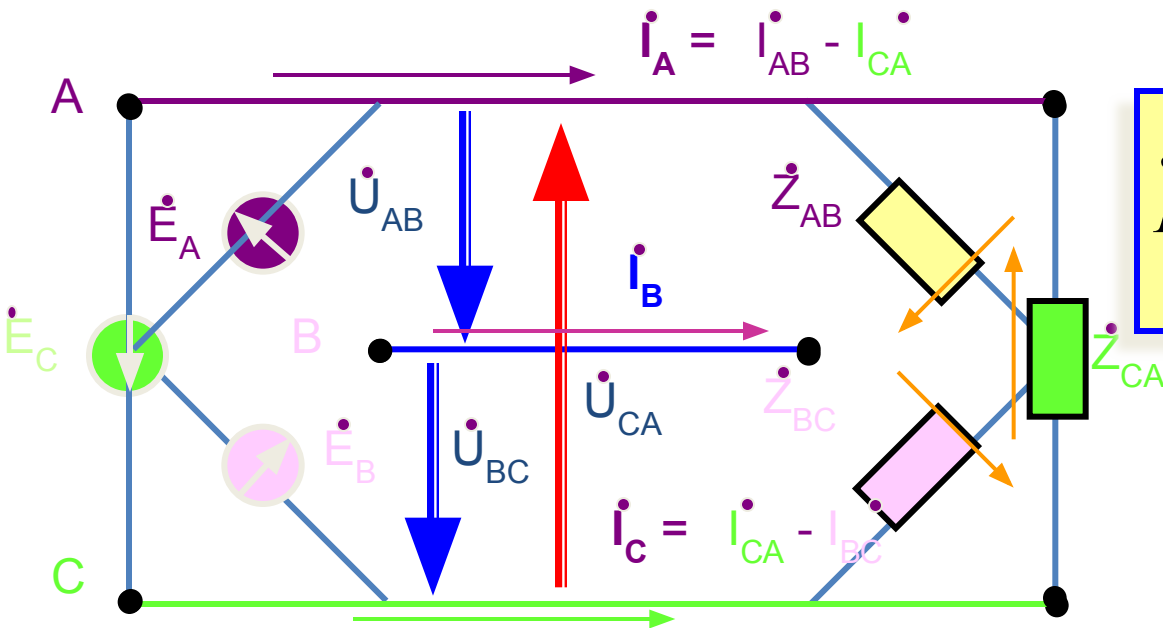


Для получения соединения фазных обмоток генератора треугольником необходимо подключить:

$$X \rightarrow B, Y \rightarrow C, Z \rightarrow A$$

Фазные напряжения одинаковы

Фазные токи



$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}}$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{BC}}$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}}$$

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}$$

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}$$

Фазные напряжения

Фазные токи

Линейные напряжения

$$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$$

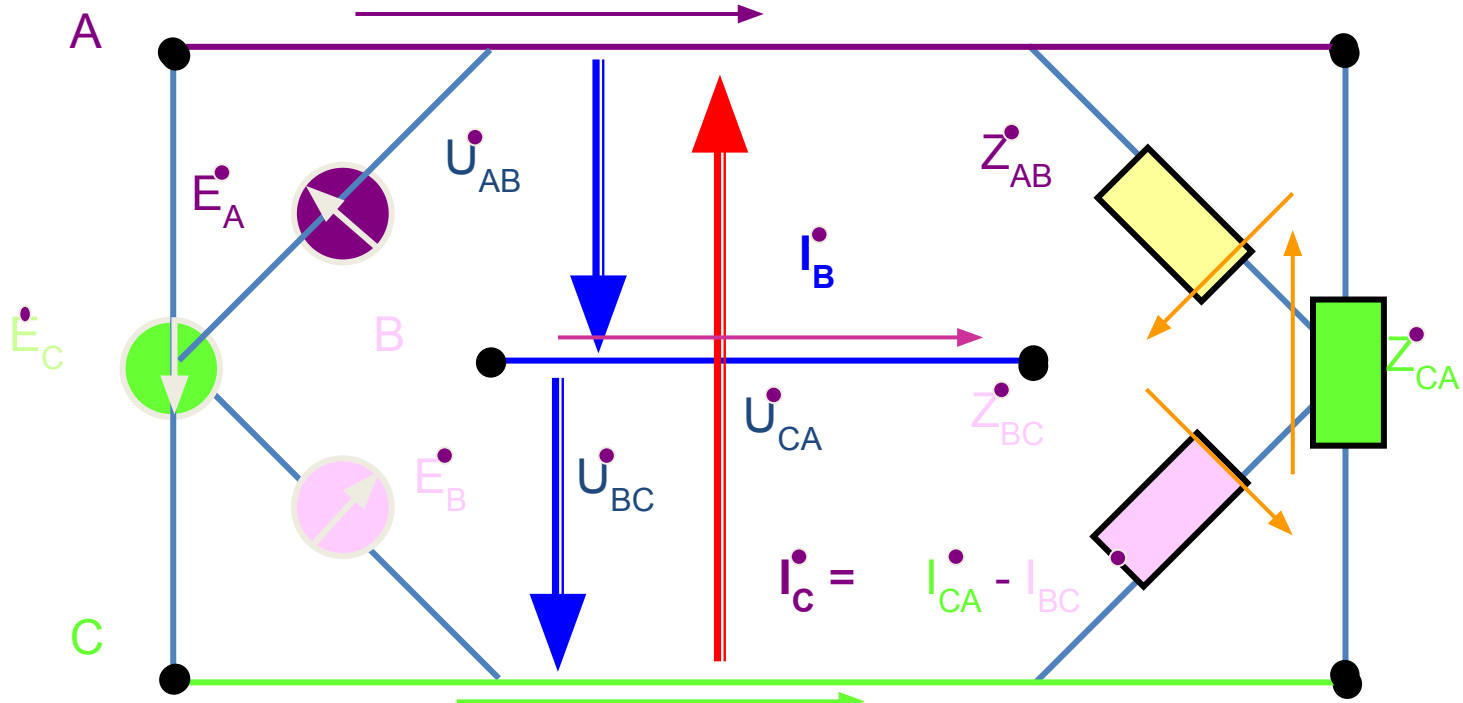
$$\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$$

$$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

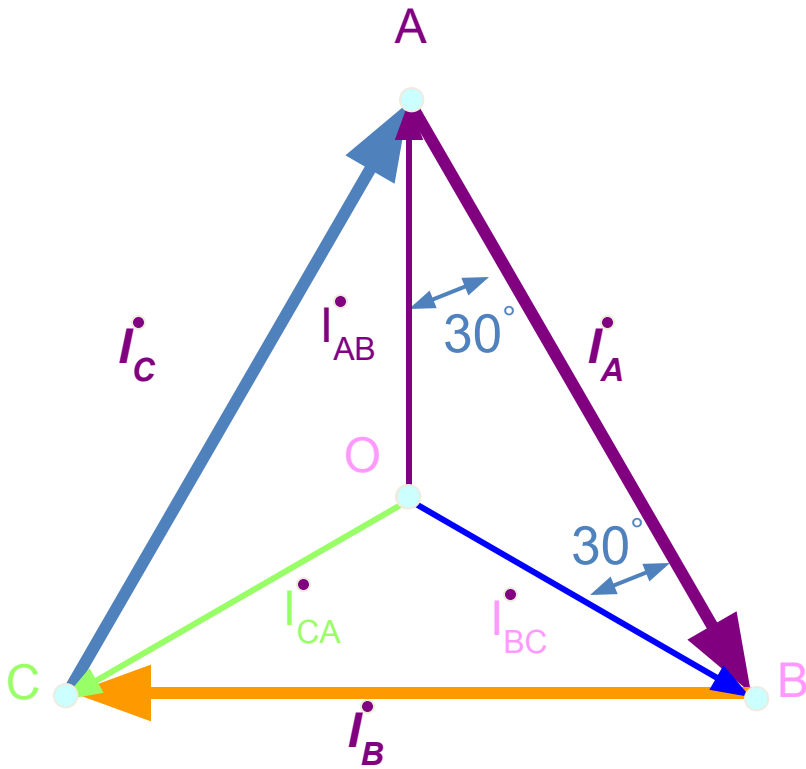


Для линейных токов

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$



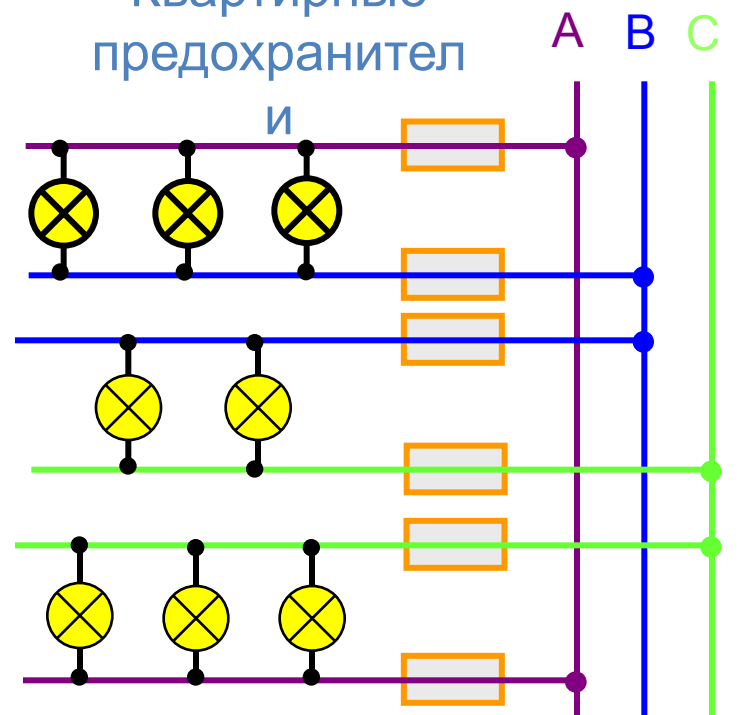
ΔAOB - равнобедренный

$$I_A = I_B = I_C = I_L$$

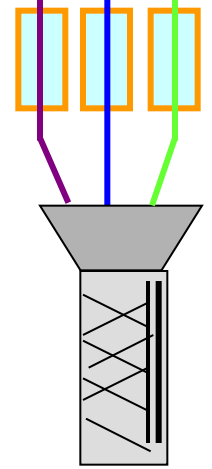
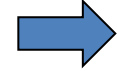
$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\Phi$$

$$I_L = 2 \cdot I_\Phi \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$$

Квартирные
предохранители



Магистральны
е
предохранители

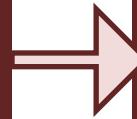


$$U_L = U_\Phi$$

§5. Нагрузки в трехфазных сетях

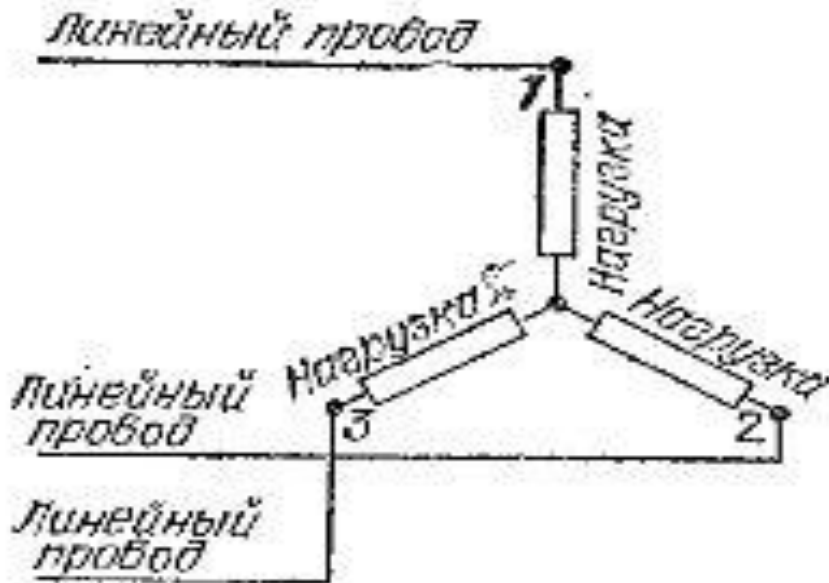
5.1. Соединение звездой

Нагрузки, питающиеся от отдельных пар проводов, также могут быть соединены звездой

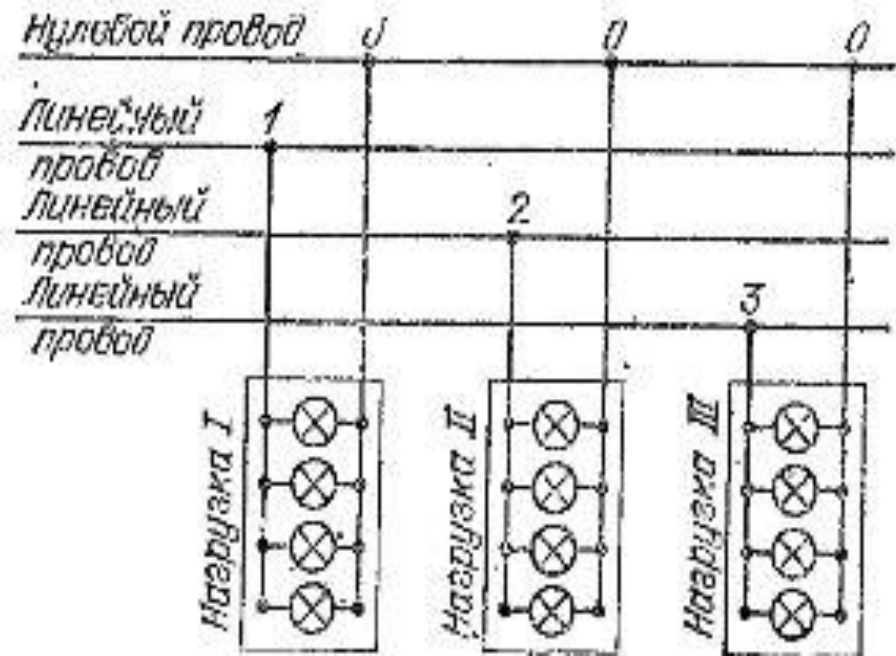


т. е. один конец их присоединен к общей точке, а оставшиеся три свободных конца к линейным проводам сети

Соединение нагрузок при 3-х проводной системе



При 4-х проводной системе



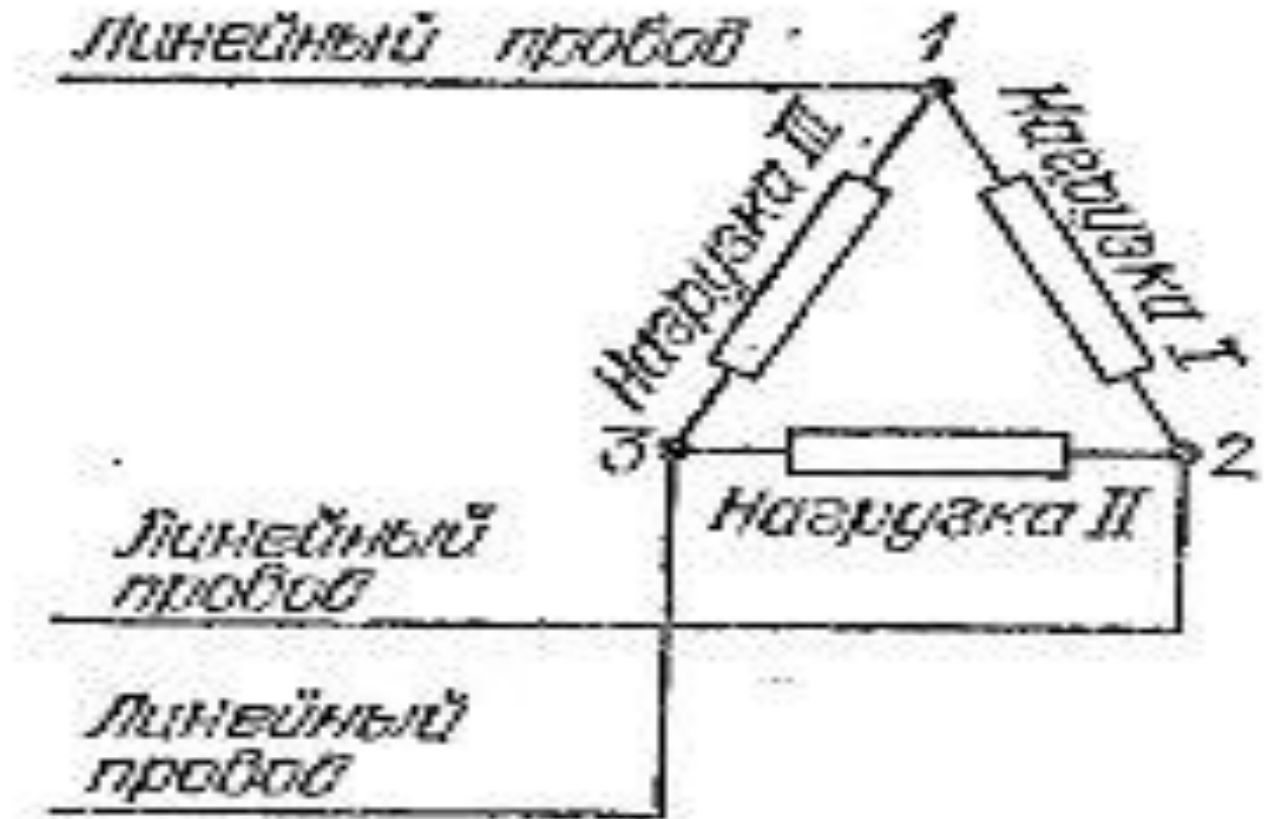
При соединении нагрузок ЗВЕЗДОЙ каждая нагрузка находится под напряжением, в $\sqrt{3}$ раз меньшим линейного

*Левый рисунок - между каждой парой линейных напряжений последовательно включены ДВЕ НАГРУЗКИ (токи в которых сдвинуты по фазе на $2\pi/3$).
Напряжение на каждой нагрузке равно соответствующему линейному напряжению, деленному на $\sqrt{3}$.*

Для четырехпроводной системы ясно из правого рисунка.

5.2. Соединение треугольником

Соединение нагрузок треугольником при 3-х проводной системе проводки



- Все нагрузки соединяются последовательно и образуют общий контур,
- К точкам 1, 2, 3 которого присоединяются линейные провода.

ПРАКТИЧЕСКИ.

- ◆ При соединении нагрузок треугольником каждая нагрузка находится под линейным напряжением,
- ◆ При соединении ЗВЕЗДОЙ - под напряжением, в $\sqrt{3}$ раз меньшим

При *переключении нагрузок со звезды на треугольник напряжения на каждой нагрузке, **ПОВЫШАЮТСЯ** в $\sqrt{3} \approx 1,73$ раза.*



Например, *линейное напряжение трехпроводной сети 380 В =>*

□ При соединении ЗВЕЗДОЙ *напряжение на каждой из нагрузок будет равно 220 В,*

□ При включении ТРЕУГОЛЬНИКОМ *равно 380 В.*

§6. Мощность трехфазной цепи.

Активную мощность, потребляемую в трехфазной цепи можно определить как сумму мощностей в отдельных фазах нагрузки:

$$P = P_{1\phi} + P_{2\phi} + P_{3\phi} = U_{1\phi} I_{1\phi} \cos \varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \cos \varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \cos \varphi_3$$

Аналогично м. б. определена и реактивная мощность

$$Q = Q_{1\phi} + Q_{2\phi} + Q_{3\phi} = U_{1\phi} I_{1\phi} \sin \varphi_1 + U_{2\phi} I_{2\phi} \sin \varphi_2 + U_{3\phi} I_{3\phi} \sin \varphi_3$$

6.1. Для симметричной нагрузки эти уравнения примут вид:

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

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

Полная мощность при симметричной нагрузке

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л}$$

6.2. Мгновенная мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке

$$p(t) = u_A(t)i_A(t) + u_B(t)i_B(t) + u_C(t)i_C(t) = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = P = \text{const}$$

Т.О. мгновенная мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке не зависит от времени (постоянна) и равна активной мощности системы.

Это свойство создает благоприятные условия для работы трехфазного генератора, так как вал генератора работает с постоянным моментом нагрузки.

Литература:

- 1. Зевеке Г.В., Ионкин А.В., Нетушил А.В., Страков С.В. Основы теории цепей: *Учебник для вузов*, - М.: Энергоатомиздат, 1999 г, с. 169 –187.**
- 2. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники: *Учебник для вузов*, - М.: Радио и связь, 1999 г, с. 79 –86.**
- 3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: *Учебник для вузов*, - М.: Высшая школа, 2003 г, с. 104 –116, 417-426**