

ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

1. Система трехфазного тока

При трехфазном токе используются трехфазные цепи.

Трехфазная цепь представляет собой совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют одинаковые синусоидальные э.д.с., сдвинутые друг относительно друга во времени на $1/3$ периода.

Однофазная цепь, входящая в трехфазную систему называют фазой.

ПРЕИМУЩЕСТВА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПЕРЕД ОДНФАЗНЫМ

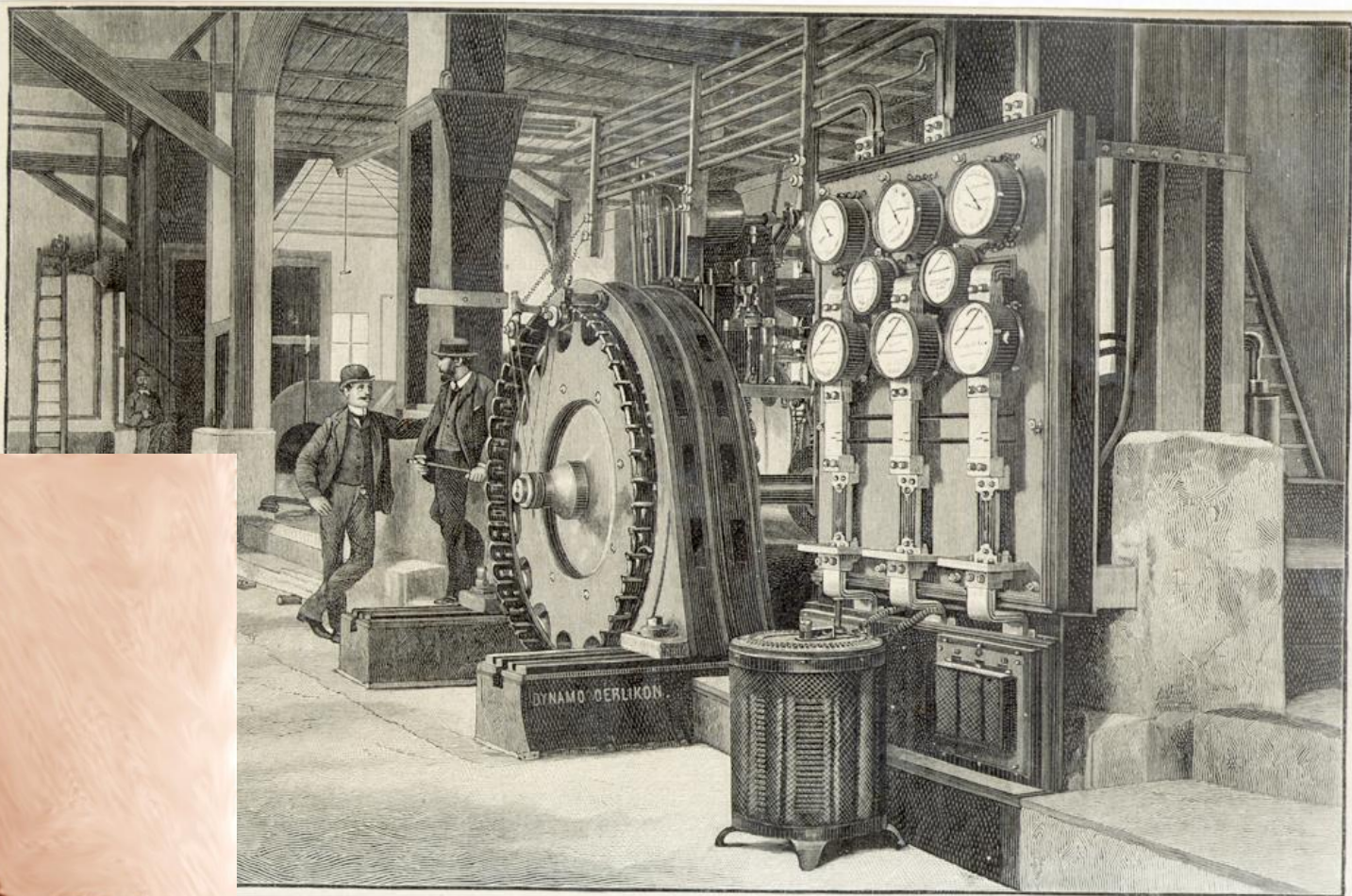
1. Более экономичные производство и передача электроэнергии переменного тока.
2. Возможность получения вращающегося магнитного поля.
3. Возможность получения в одной системе двух эксплуатационных напряжений:
- фазного и линейного.

*Трехфазную систему изобрел и разработал во всех деталях,
включая трехфазный асинхронный двигатель (АД),*

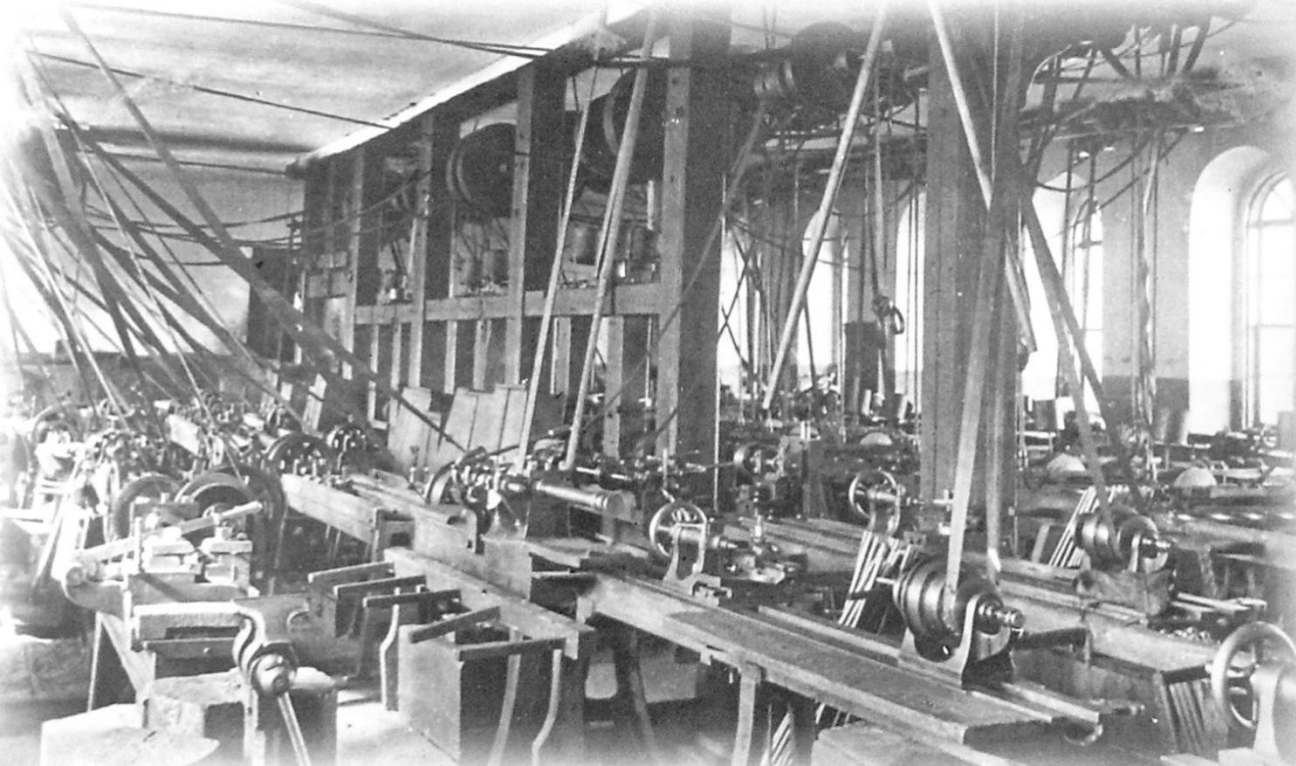
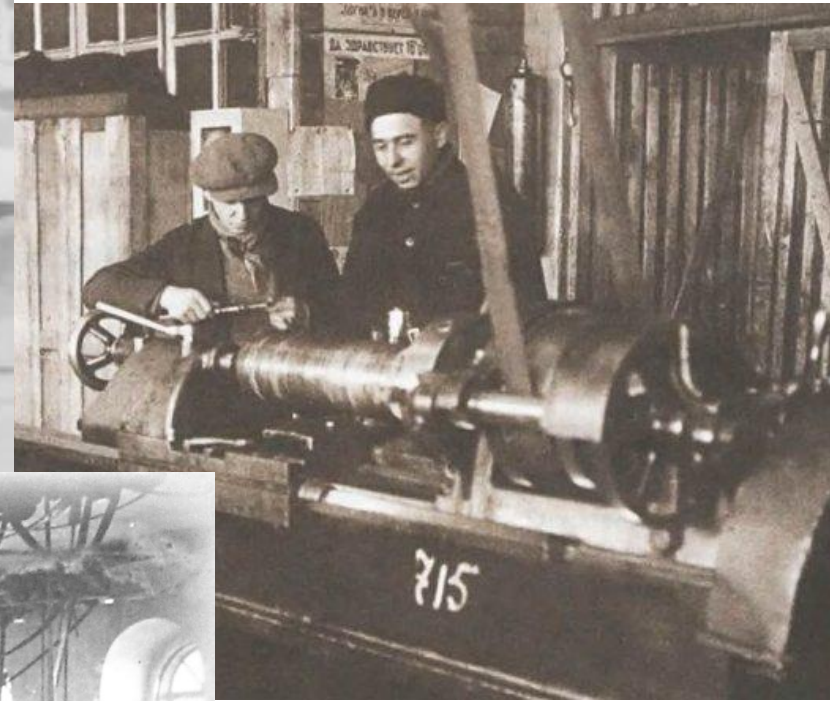
Российский инженер

Доливо-Добровольский Михаил Осипович

в 1891 году.



**Михаил Осипович
Доливо-Добровольский
1861 - 1919**

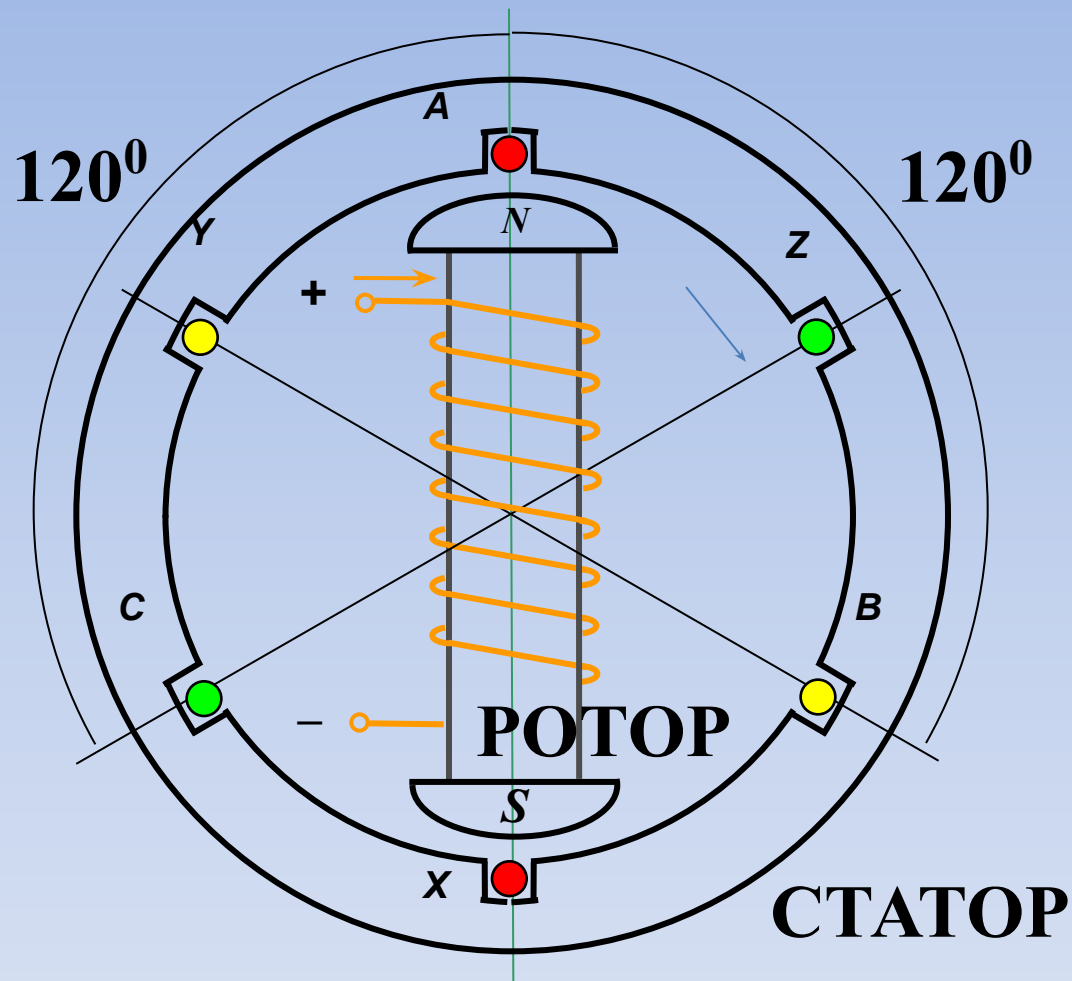


2. Получение трехфазного тока

Получают с помощью электромашинных генераторов, которые называются Синхронными Генераторами (СГ).

Состоит из двух основных частей:

неподвижной - СТАТОР
вращающейся – РОТОР.



УСТРОЙСТВО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Статор представляет собой полый ферромагнитный цилиндр, в пазах которого размещается трехфазная обмотка, состоящая из трех частей – трех фаз. Магнитные оси этих витков *сдвинуты* относительно друг друга *на треть пространственного периода* (в двухполюсном генераторе - на 120 геометрических градусов).

Для простоты анализа считаем, что каждая фаза состоит из одного витка.

Ротор представляет собой вращающийся электромагнит постоянного тока.

Наименование выводов фаз

Наименование	Начало	Конец
1 фаза	A	X
2 фаза	B	Y
3 фаза	C	Z

Принцип действия Синхронного Генератора

При вращении ротора с угловой частотой ω , в каждой фазе обмотки статора по закону ЭМИ будут индуцироваться синусоидальные э.д.с. одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутые во времени на одну треть периода.

Такая система ЭДС называется симметричной.

Ее основное свойство – *алгебраическая сумма* мгновенных значений синусоид в любой момент времени равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

Мгновенные ЭДС

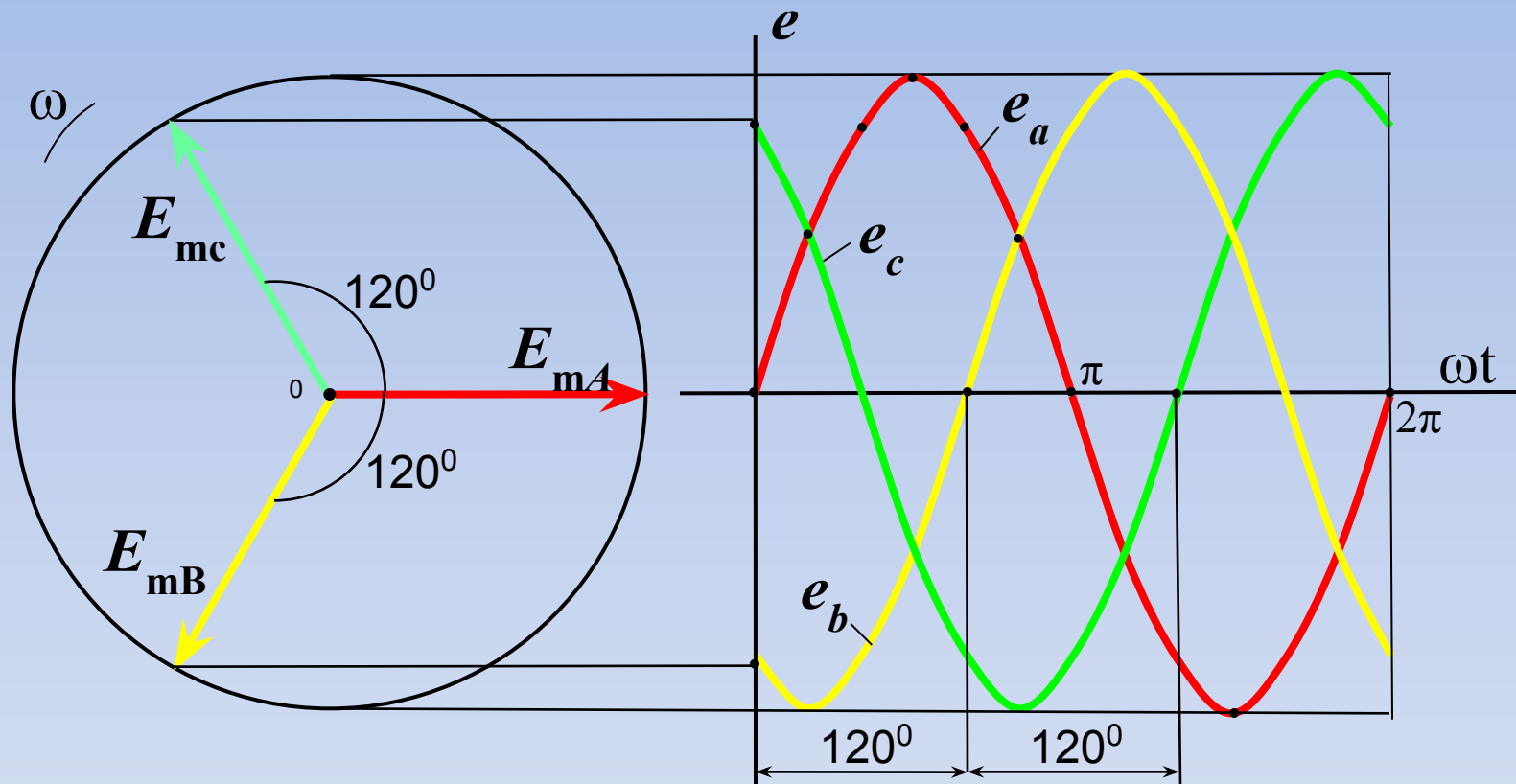
$$\begin{aligned}e_A &= E_m \sin \omega t; \\e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\e_C &= E_m \sin(\omega t + 2\pi/3).\end{aligned}$$

В символическом виде (показательная форма)

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

$$\dot{E}_B = E \cdot e^{-j \cdot 120^\circ};$$

$$\dot{E}_C = E \cdot e^{j \cdot 120^\circ};$$



ТРЕХФАЗНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЭДС

Векторная диаграмма представляет собой вращающуюся трехлучевую звезду

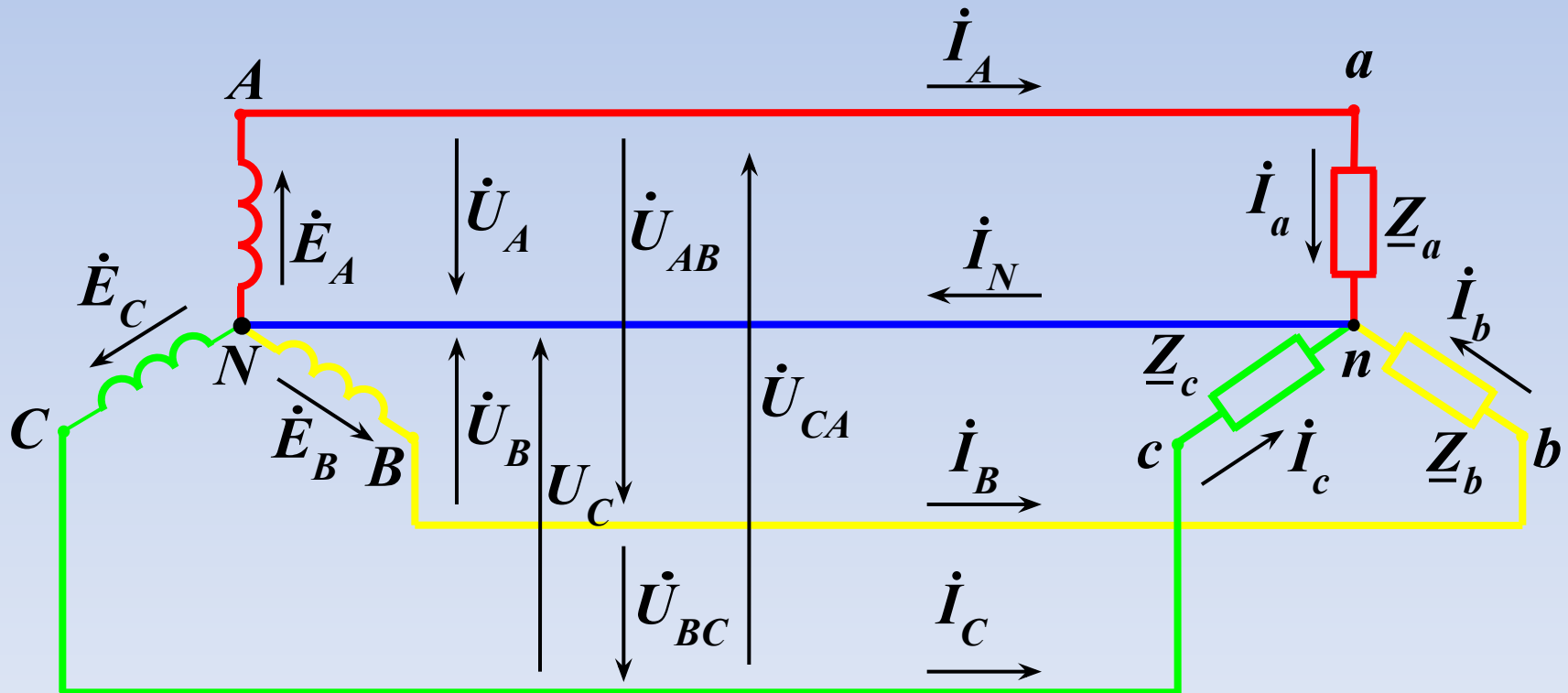
Каждая фаза обмотки трехфазного генератора может являться самостоятельным источником электроэнергии и работать на свой потребитель. Такая система называется несвязанной. Она не получила применение, т.к. требуется 6 проводов.

На практике получили применение связанные системы, при которых фазы генераторов и потребителей соединяются по схеме «звезда» или «треугольник».

3. Соединение фаз генератора и потребителя «звездой»

При таком соединении концы фаз X, Y, Z соединяются в одну точку, называемую нейтральной N.

Аналогично для потребителя – x, y, z соединяются в «n».



Начала фаз генератора соединяется с помощью проводов с началами фаз потребителя.

Такая система трехфазного тока называется Четырехпроводной, а соединение – Звезда с нейтральным проводом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ: Провода, соединяющие начала фаз генератора и потребителя называются линейными.

$(A-a, B-b, C-c)$ – линейные провода

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и потребителя называется нейтральным

$N-n$ – нейтральный провод

Фазным напряжением генератора (или приёмника) называется напряжение между началом и концом одной и той же фазы генератора (или приёмника).

\dot{U}_A \dot{U}_B \dot{U}_C – комплексы фазных напряжений генератора

Линейным напряжением называется напряжение между началами двух разных фаз генератора (или приёмника).

\dot{U}_{AB} \dot{U}_{BC} \dot{U}_{CA} – комплексы линейных напряжений генератора

Для комплексов линейных и фазных напряжений по II закону Кирхгофа справедливы следующие соотношения:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A;$$

Токи, протекающие по фазам генератора и фазам потребителя называются фазными токами.

$\dot{I}_a; \dot{I}_b; \dot{I}_c$ — Комплексы фазных токов

Токи, протекающие по линейным проводам, называются линейными токами.

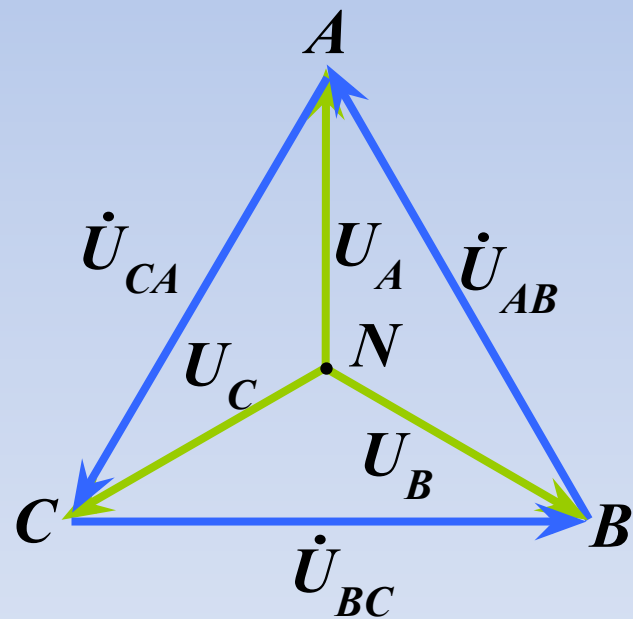
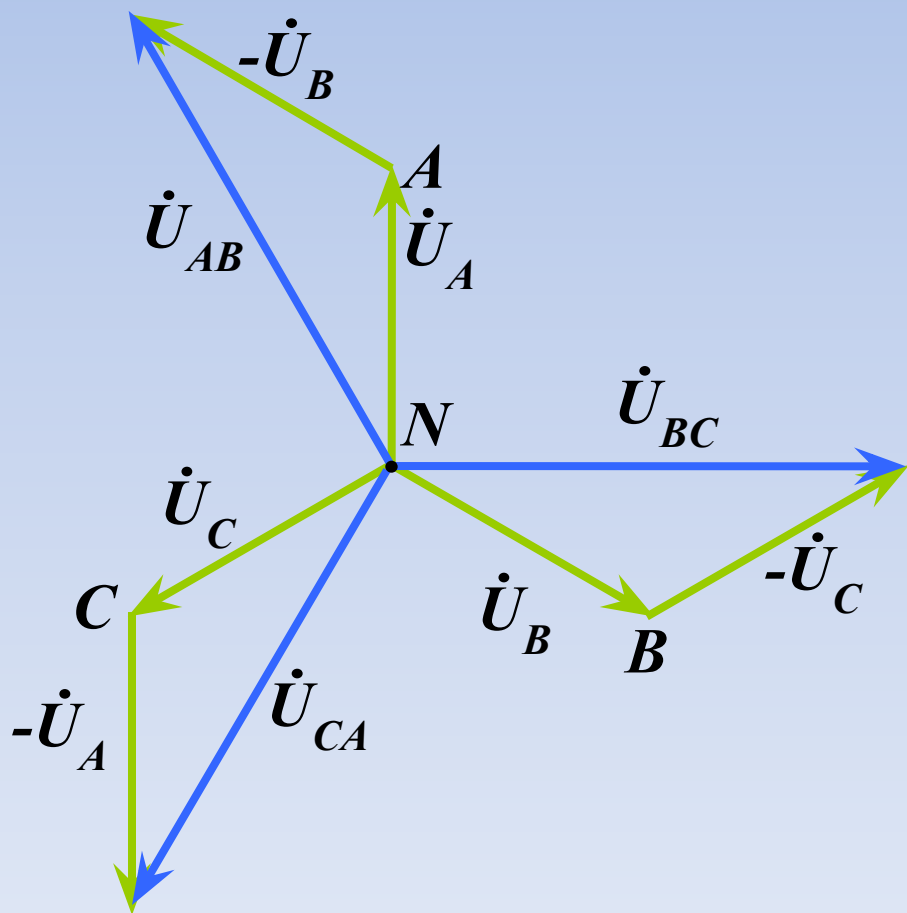
$\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$ — Комплексы линейных токов

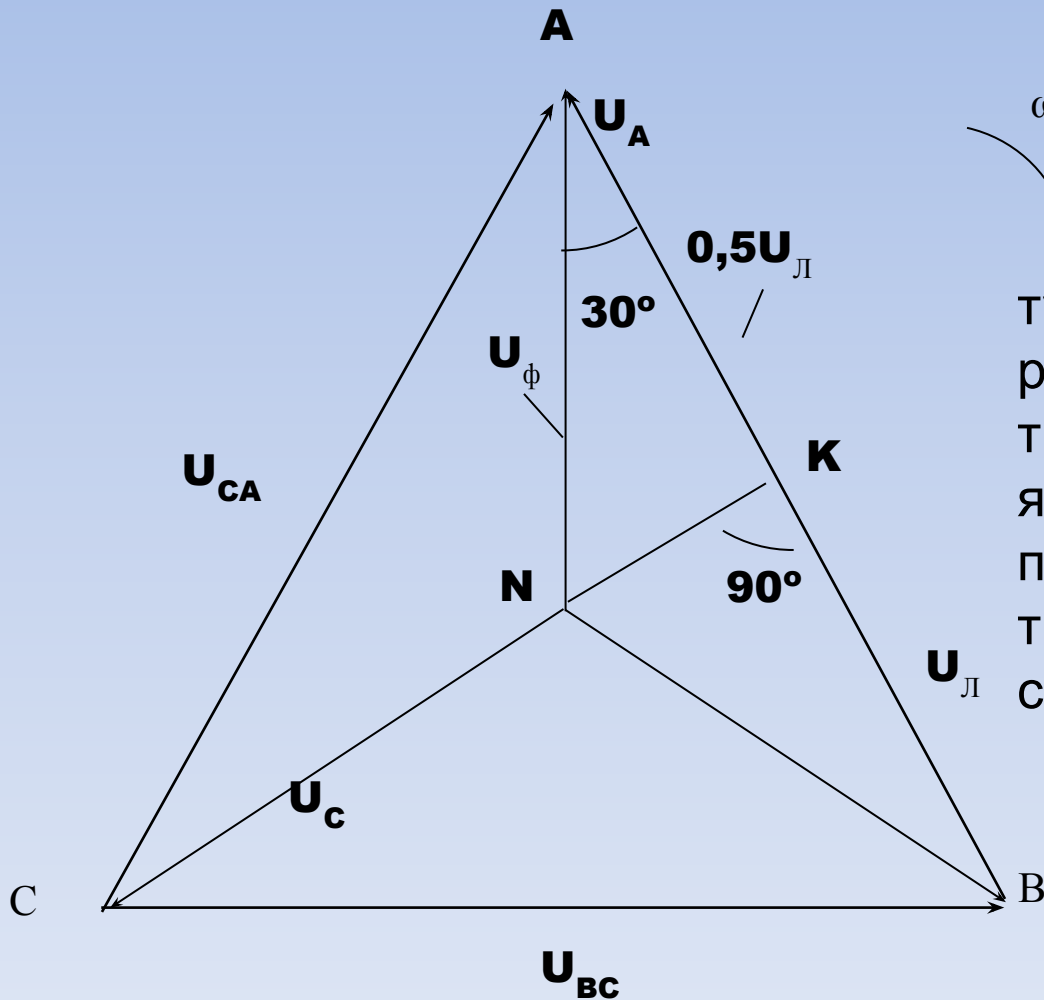
Ток, протекающий по нейтральному проводу, называется нейтральным током \dot{I}_N

Ток в нейтральном проводе \dot{I}_N согласно первому закону Кирхгофа равен алгебраической сумме комплексов фазных (линейных) токов.

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

4. Соотношения между фазными и линейными напряжениями при соединении фаз «звездой»





ω
 Опустив из вершины тупого угла одного из равнобедренных треугольников высоту (которая является и медианой), получим прямоугольный треугольник ΔANK , из которого следуют соотношения

$$AK = \frac{U_L}{2} =$$

$$U_\phi \cdot \cos 30^\circ = U_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$U_{Л} = \sqrt{3} \cdot U_{\Phi}; \quad I_{Л} = I_{\Phi};$$

*ВЫВОДЫ: 1) При соединении фаз генератора звездой и симметричной нагрузке линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного.
2) Линейные токи равны фазным.*

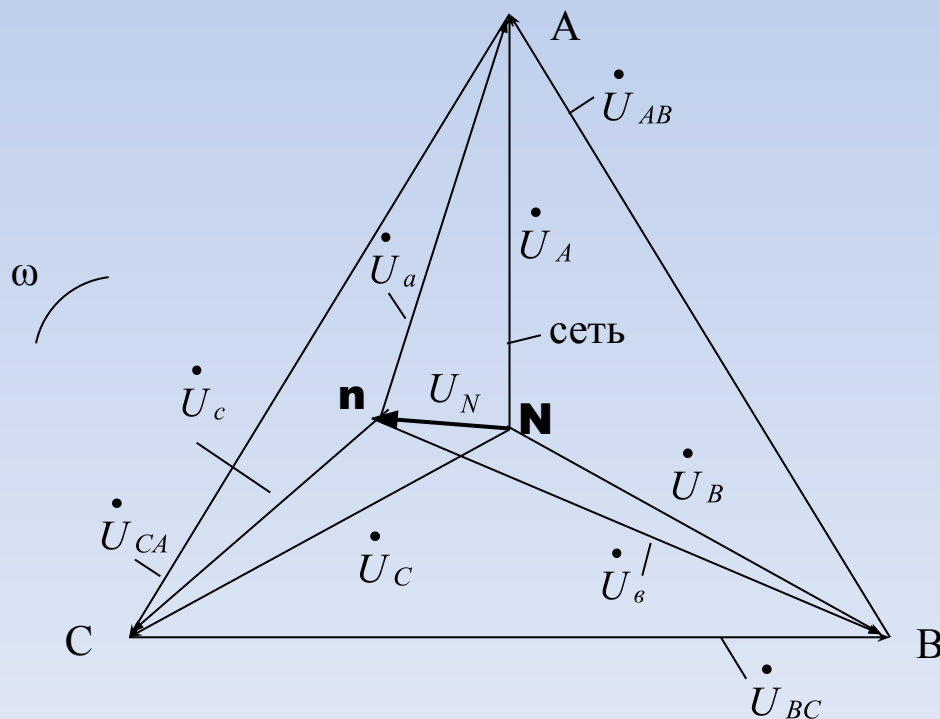
Если пренебречь сопротивлением проводов, то векторная диаграмма напряжений для потребителя и генератора совпадут.

5. Соединение потребителей звездой без нейтрального провода при несимметричной нагрузке

При несимметричной нагрузке

$$\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c;$$

На векторной диаграмме вектора напряжения на фазах потребителя изменятся как по величине, так и по направлению.



Нейтральная точка звезды потребителя n

сместится по отношению к N

Это явление называется смещением нейтрали.

Между точками N и n

возникает напряжение смещения нейтрали \dot{U}_N

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} \quad \text{– напряжение смещение нейтрали}$$

$$\dot{U}_A = U_\phi;$$

$$\dot{U}_B = U_\phi \cdot (-0,5 - j0,87); \quad \text{– комплексы фазных напряжений источника}$$

$$\dot{U}_C = U_\phi \cdot (-0,5 + j0,87);$$

$$\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c \quad \text{– комплексы проводимости фаз потребителя.}$$

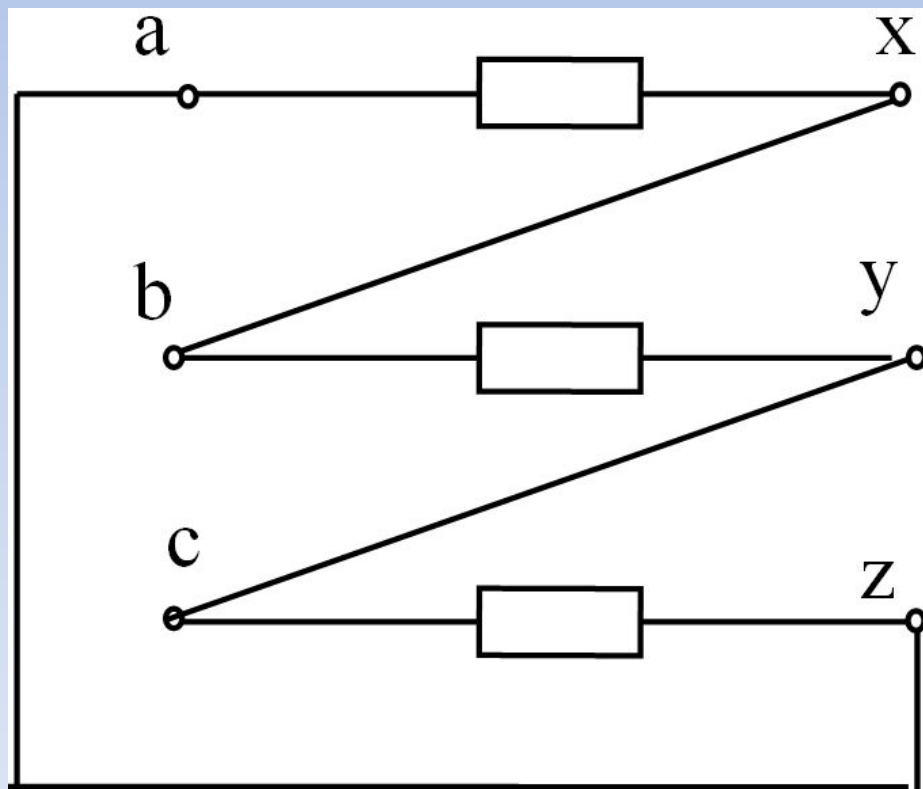
При несимметричной нагрузке могут иметь место перенапряжения на фазах потребителя.

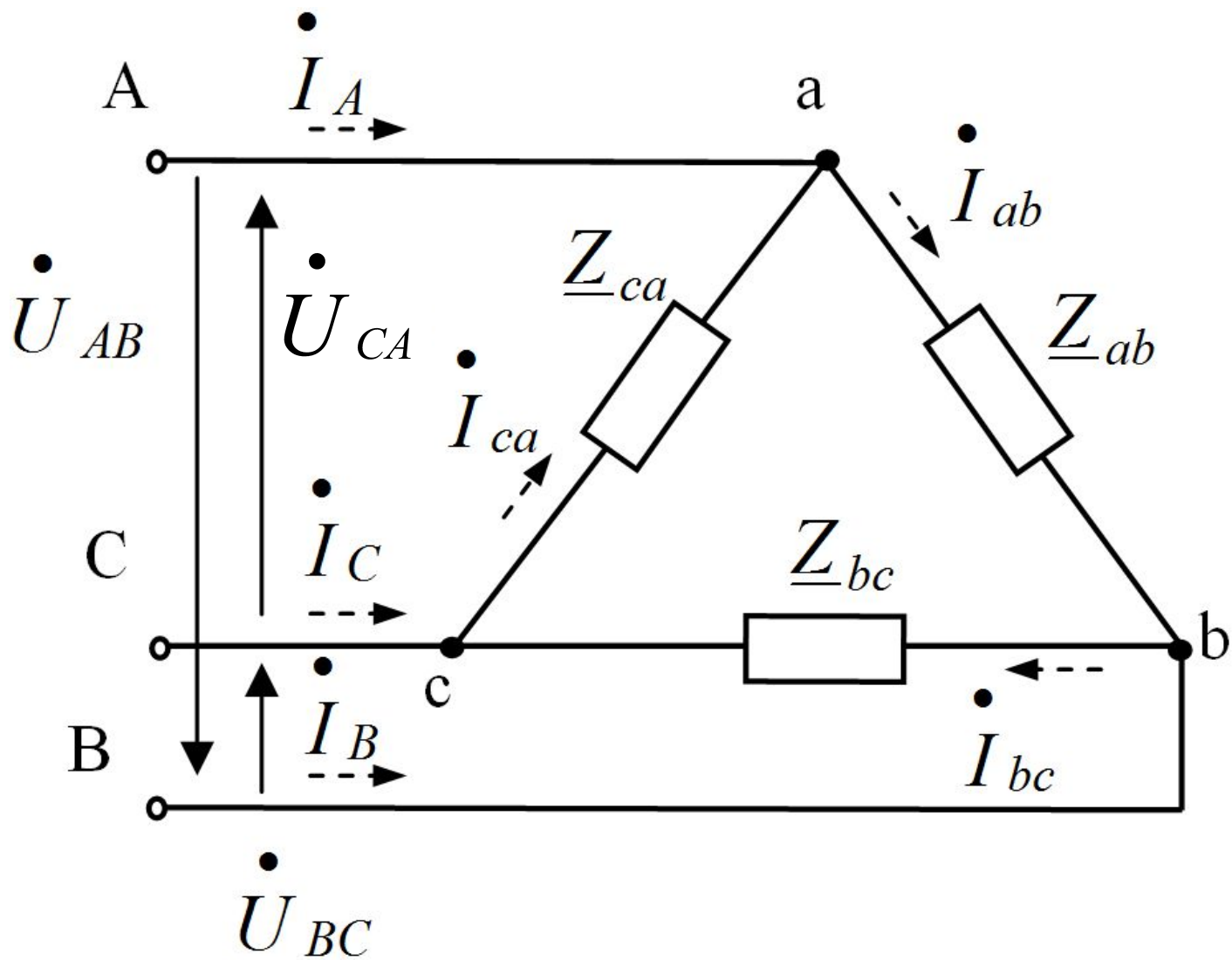
Поэтому соединение звездой без нейтрального провода используют только при симметричной нагрузке, причем номинальное рабочее напряжение на фазах потребителя должно быть в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения питающей сети.

.

6. Соединение потребителей трехфазного тока треугольником

При таком соединении конец одной фазы присоединяется к началу другой.





Если пренебречь сопротивлением линейных проводов, то напряжения на фазах равны линейным напряжениям питающей сети, которая образует симметричную систему.

$$\dot{U}_{AB} = U_{Л};$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{Л} \cdot (-0,5 - j0,87);$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{Л} \cdot (-0,5 + j0,87);$$

Соединение треугольником обеспечивает независимую работу фаз, как и в случае соединения звездой с нейтральным проводом. Связь между комплексами линейных и фазных токов устанавливается для каждого узла по I-му закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}; \quad - \text{ комплексы линейных токов}$$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}; \quad - \text{ комплексы фазных токов}$$

Пользуясь этими формулами можно рассчитать токи при несимметричной нагрузке, так и симметричной нагрузке.

Симметричная нагрузка:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\Phi = z_\Phi e^{j\varphi} = r_\Phi + jx_\Phi.$$

Если пользуясь формулами (*) построить векторную диаграмму токов, она окажется подобной векторной диаграмме при соединении звездой.

Из этой векторной диаграммы следует:

$$\boxed{I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi}; \quad \boxed{U_L = U_\Phi}; \quad I_\Phi = \frac{U_\Phi}{Z_\Phi}; \quad Z_\Phi = \sqrt{r_\Phi^2 + X_\Phi^2};$$

ВЫВОДЫ: 1) При соединении потребителей треугольником номинальное напряжение в каждой фазе выбирают равным номинальному линейному напряжению питающей сети.

2) Соединение треугольником может использоваться при симметричной и несимметричной нагрузках, перенапряжений на фазах потребителя не возникает.

8. Мощность трехфазного тока

При использовании трехфазных цепей, как в однофазных, пользуются понятием активной, реактивной и полной мощностей.

НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА

– Активная мощность каждой фазы определяется:

$$P_a = U_a \cdot I_a \cdot \cos\varphi_a; \quad P_b = U_b \cdot I_b \cdot \cos\varphi_b; \quad P_c = U_c \cdot I_c \cdot \cos\varphi_c;$$

$$U_a; \quad U_b; \quad U_c;$$

– напряжения на фазах потребителя;

$$I_a; \quad I_b; \quad I_c;$$

– фазные токи потребителя;

$\varphi_a; \quad \varphi_b; \quad \varphi_c$ – углы сдвига фаз между соответствующими напряжениями и токами.

Суммарная активная мощность потребителя трехфазного тока равна арифметической сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_a + P_b + P_c; \quad [\text{Вт}]$$

– Реактивная мощность каждой фазы определяется:

$$Q_a = U_a \cdot I_a \cdot \sin \varphi_a; \quad Q_b = U_b \cdot I_b \cdot \sin \varphi_b; \quad Q_c = U_c \cdot I_c \cdot \sin \varphi_c;$$

Суммарная реактивная мощность потребителя трехфазного тока равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c; \quad [\text{ВАр}]$$

Суммарная полная мощность потребителя трехфазного тока равна арифметической сумме полных мощностей отдельных фаз:

$$S = S_a + S_b + S_c; \quad [\text{ВА}]$$

СИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА

$$U_a = U_b = U_c = U_\phi;$$

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi;$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_\phi;$$

– Активная мощность потребителя трехфазного тока равна

$$P = P_a + P_b + P_c = 3 \cdot P_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi_\phi;$$

– Реактивная мощность потребителя трехфазного тока равна

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 3 \cdot Q_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi_\phi;$$

– Полная мощность потребителя трехфазного тока равна

$$S = S_a + S_b + S_c = 3 \cdot S_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi;$$

На практике часто приходится определять мощности не через фазные значения, а используя линейные значения напряжений и токов. Но соотношения между фазными и линейными значениями зависят от схемы соединения – звезда или треугольник.

Звезда $U_{Л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}; \quad I_{Л} = I_{\phi};$

$$P_Y = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi_{\phi} = 3 \cdot \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} \cdot I_{Л} \cdot \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos \varphi_{\phi};$$

Треугольник $U_{Л} = U_{\phi}; \quad I_{Л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi};$

$$P_{\Delta} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi_{\phi} = 3 \cdot U_{Л} \cdot \frac{I_{Л}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos \varphi_{\phi};$$

ВЫВОД: При симметричной нагрузке формулы для определения активной мощности через линейные значения напряжения и тока не зависят от схемы соединения потребителей.

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi_\phi;$$

Аналогично реактивная и полная мощности равны:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi_\phi;$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L;$$