

Трехфазные цепи

1. Достоинства трехфазных цепей
2. Трехфазный генератор
3. Классификация и способы включения в трехфазную цепь приемников

Наличие вращающегося магнитного поля, на основе которого построен асинхронный двигатель.

При передаче энергии на расстояние в трехфазных цепях по сравнению с однофазными достигается существенная экономия материала проводов.

Возможность иметь два эксплуатационных напряжения.

Трехфазные цепи – это частный случай многофазных систем.

Многофазной системой называют совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся одна от другой по фазе и индуктируемые в одном источнике питания.

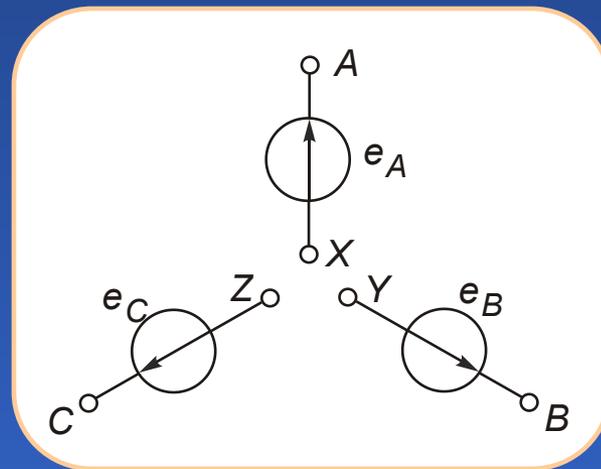
Каждую из цепей, входящих в многофазную систему, называют **фазой**.

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: генератора, линии передачи и приемника.

Принцип действия и разметка зажимов фаз обмотки

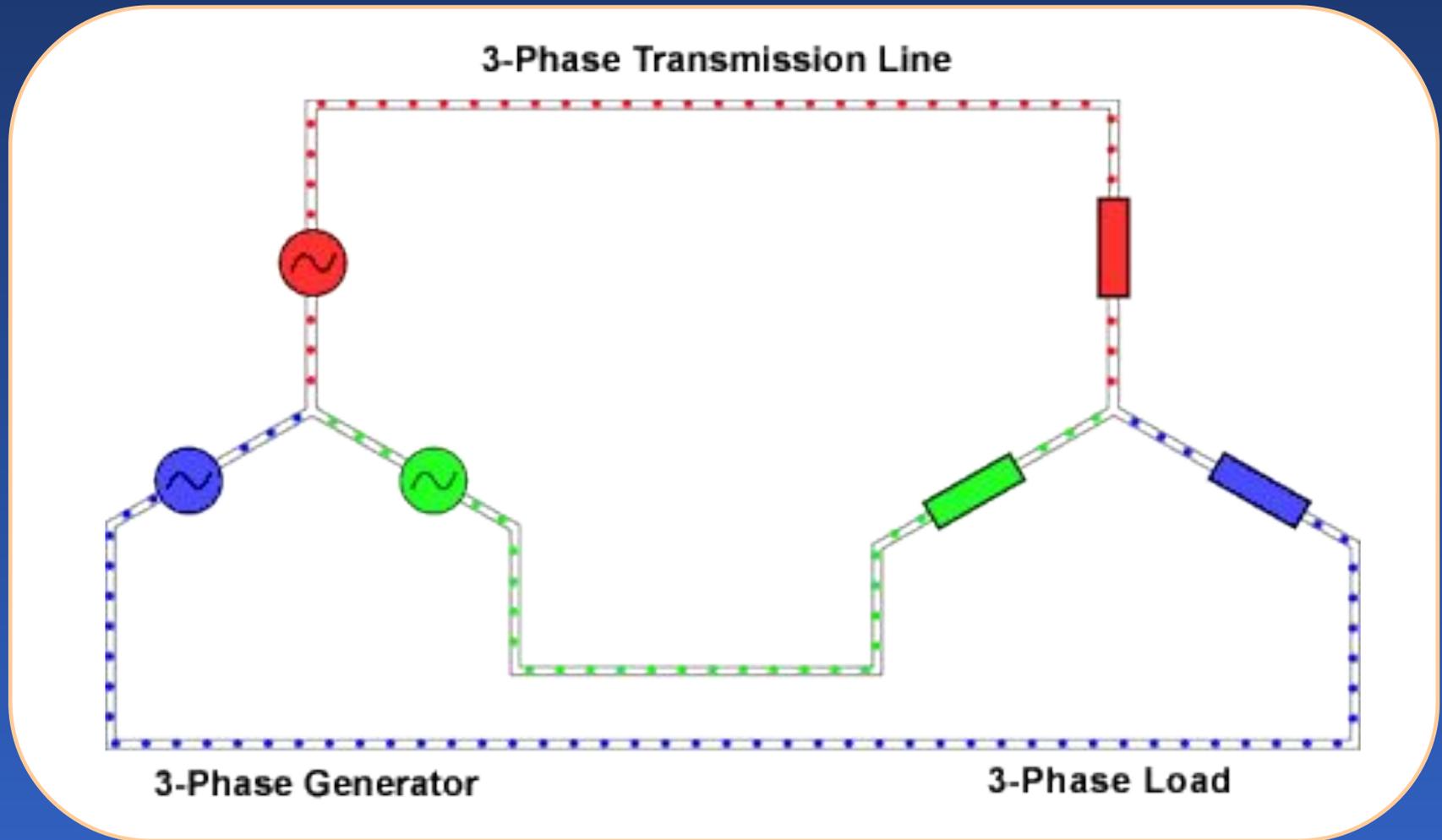
Простейший трехфазный генератор состоит из неподвижной (статора) и подвижной (ротора) частей. Статор – это полый цилиндр, набранный из листов электротехнической стали. Ротор является электромагнитом. Его необходимо принудительно вращать.

При пересечении магнитными силовыми линиями поля ротора обмоток статора в последних наводятся ЭДС одинаковой величины с фазовым сдвигом 120° . Такую систему называют **симметричной**.



Буквами A, B, C обозначают начала фаз обмоток; X, Y, Z – их концы

Анимация трёхфазной системы



Способы изображения симметричной системы ЭДС

Графический

Симметричная система ЭДС – это три синусоиды.

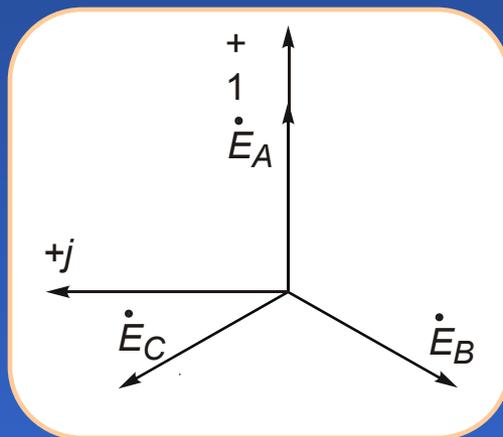
Тригонометрический

ЭДС можно записать как синусоидальные функции времени следующим образом:

$$e_A = E_m \sin, \quad t \quad e_B = E_m \sin(120^\circ), \quad e_C = E_m \sin(120^\circ).$$

Вращающимися векторами в декартовой системе координат

Комплексными числами

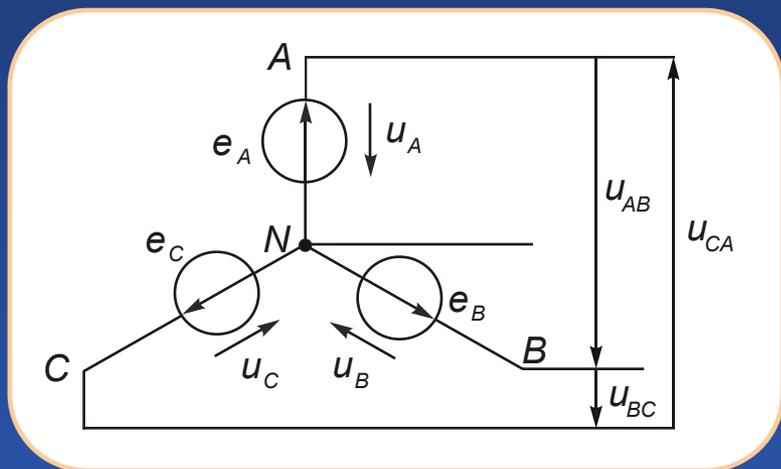


$$\dot{E}_A = E, \quad \dot{E}_B = E e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E e^{-j120^\circ} = a^2 E,$$

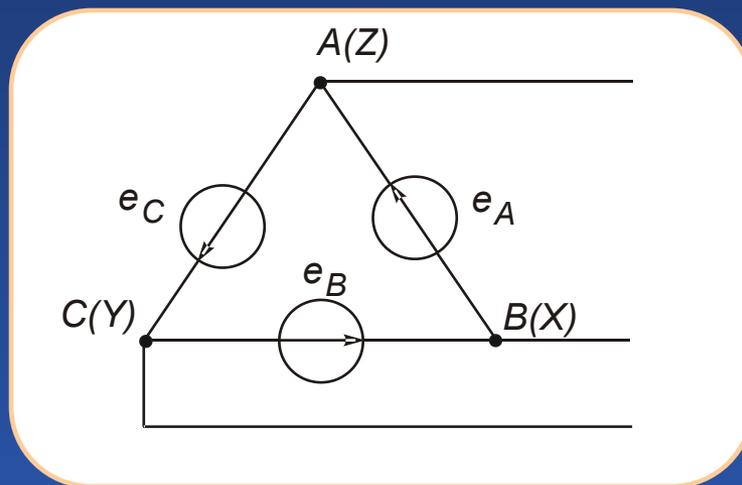
$$\dot{E}_C = E e^{j\frac{2\pi}{3}} = E e^{j120^\circ} = E e^{-j\frac{4\pi}{3}} = a E.$$

Способы соединения фаз обмоток генератора

Соединение звездой



Соединение треугольником



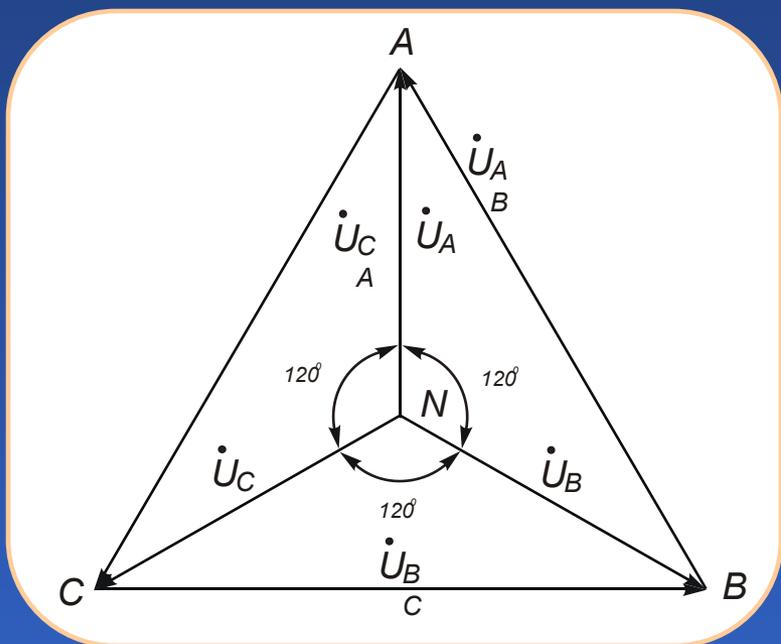
Получается при объединении концов фаз обмоток X , Y , Z в нейтральную точку N . Условное обозначение Y .

Получается при соединении начала одной фазы с концом другой. Условное обозначение Δ .

Условные положительные направления фазных и линейных напряжений и соотношения между ними

Обычно обмотки генератора соединяют звездой. Напряжения между началом и концом фазы называют **фазными**, а напряжения между началами фаз генератора –**линейными**.

Топографическая диаграмма фазных и линейных напряжений



$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Трехфазные цепи бывают четырех- и трехпроводные. Фазы генератора и фазы приемника могут быть соединены по-разному.

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть однофазными и трехфазными. Начала и концы фаз трехфазных приемников обозначают соответственно буквами $a, x; b, y; c, z$.

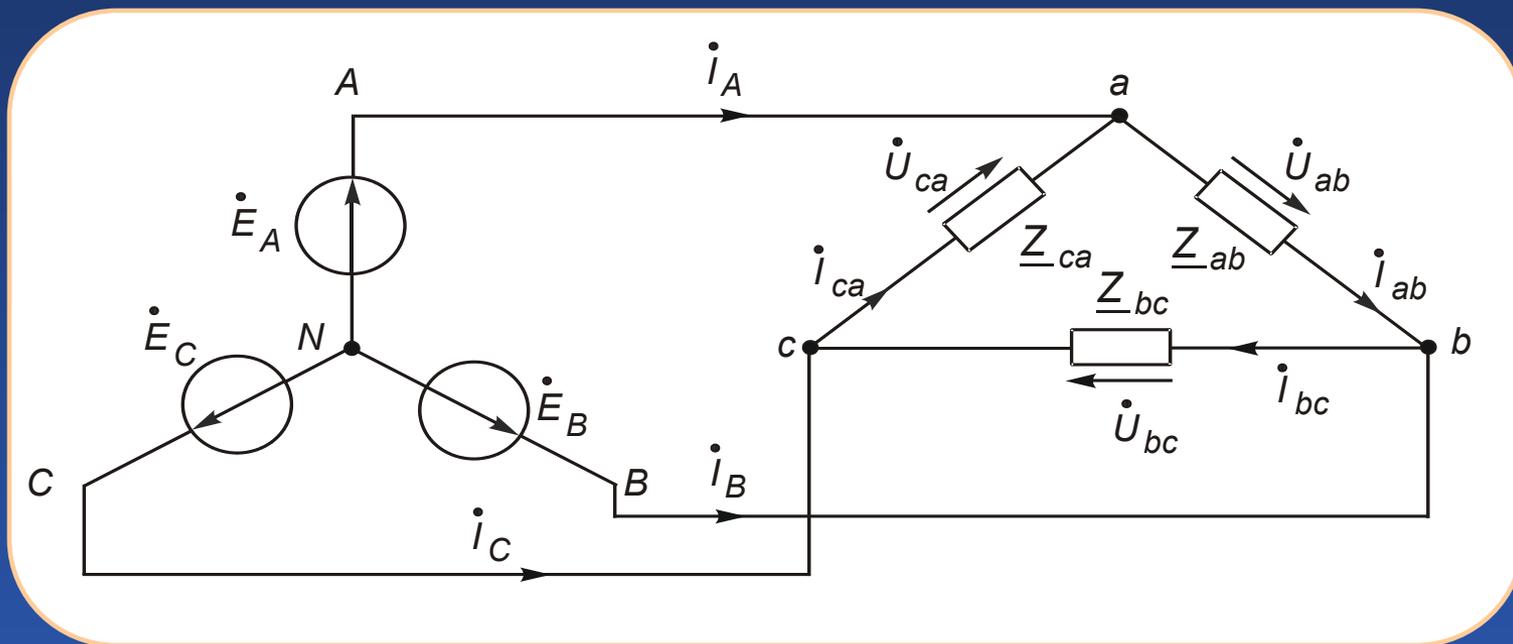
Трехфазные приемники могут быть симметричными и несимметричными. У **симметричных** приемников равны между собой комплексные сопротивления фаз:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c.$$

У несимметричного приемника нагрузка может быть равномерной, если сопротивления фаз равны между собой по величине (по модулю), или однородной, если

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c.$$

Приемник несимметричный

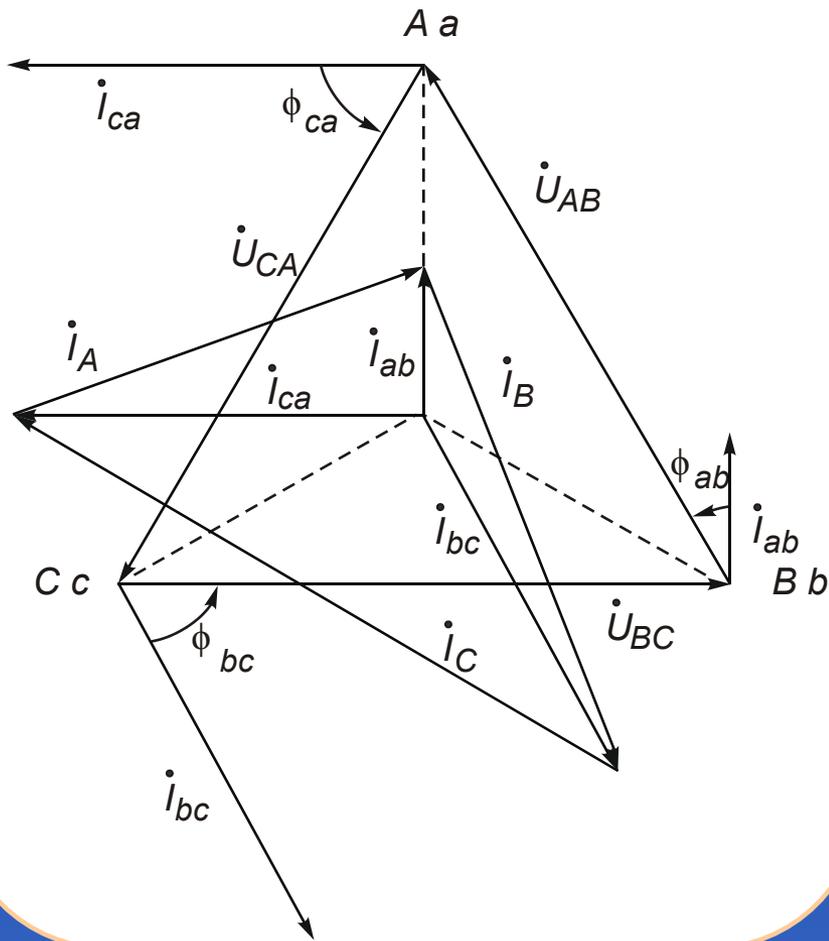


$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}, \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}, \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}},$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \quad \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов



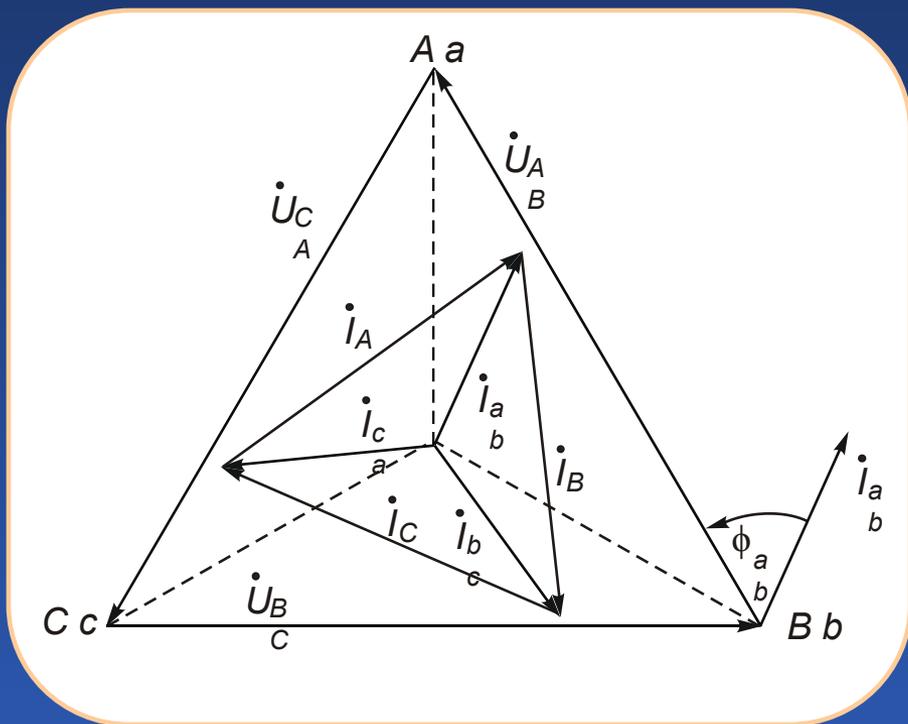
Построение начинают с топографической диаграммы напряжений генератора. Далее строят топографическую диаграмму напряжений приемника. Затем проводят векторы фазных токов под соответствующими углами к векторам фазных напряжений.

Векторы фазных токов переносят в центр треугольника напряжений. Векторы линейных токов получают как геометрические разности соответствующих фазных токов.

Приемник симметричный

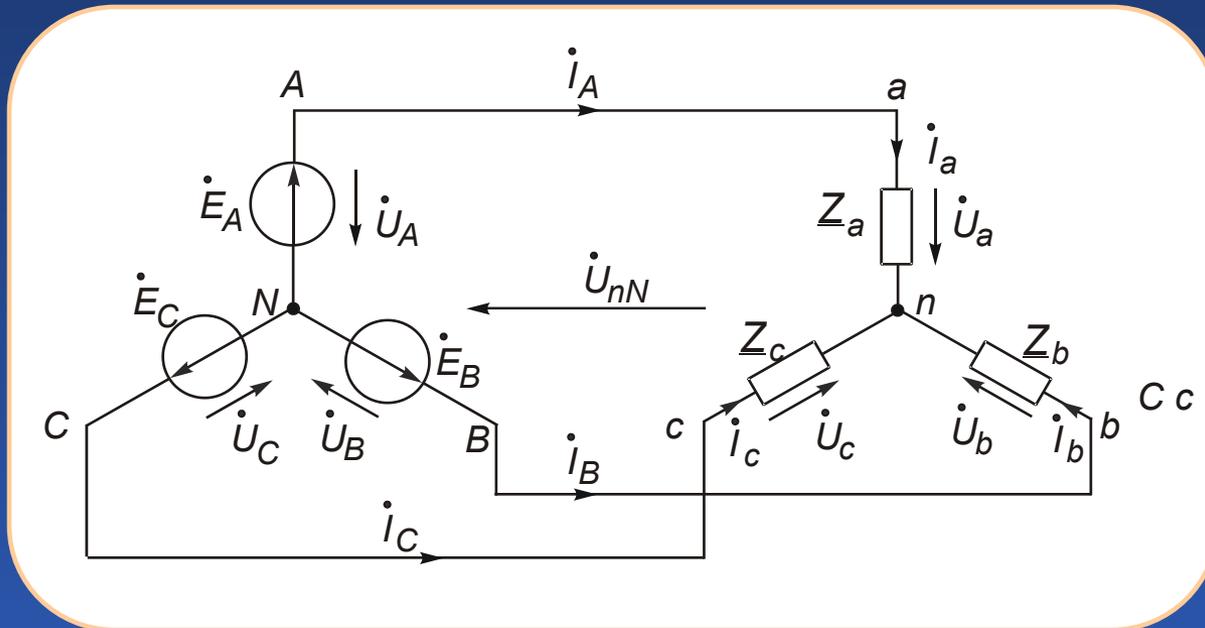
У симметричного приемника комплексные сопротивления фаз равны между собой

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}.$$



$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{ab} e^{-j30^\circ}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120^\circ}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120^\circ}.$$

Соединение звездой трехпроводной



Приемник несимметричный

Напряжение между нейтральными точками генератора и приемника можно вычислить по формуле

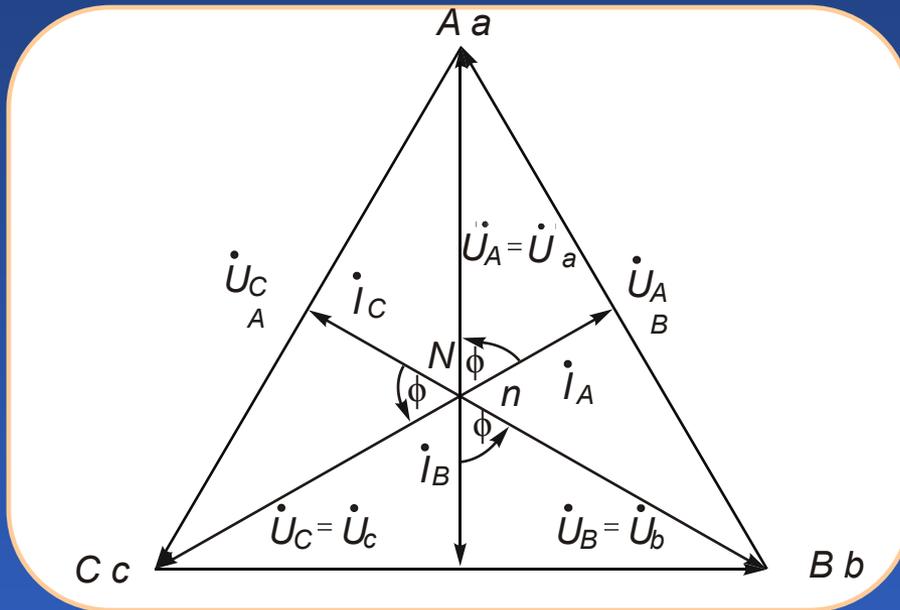
$$\dot{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_B + \underline{Y}_c \dot{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}.$$

Линейные и равные им соответственно фазные токи можно определить по закону Ома для активной ветви:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \underline{Y}_a (\dot{U}_A - \dot{U}_{nN}), \quad \dot{I}_B = \dot{I}_b = \underline{Y}_b (\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}), \quad \dot{I}_C = \dot{I}_c = \underline{Y}_c (\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}).$$

Приемник симметричный

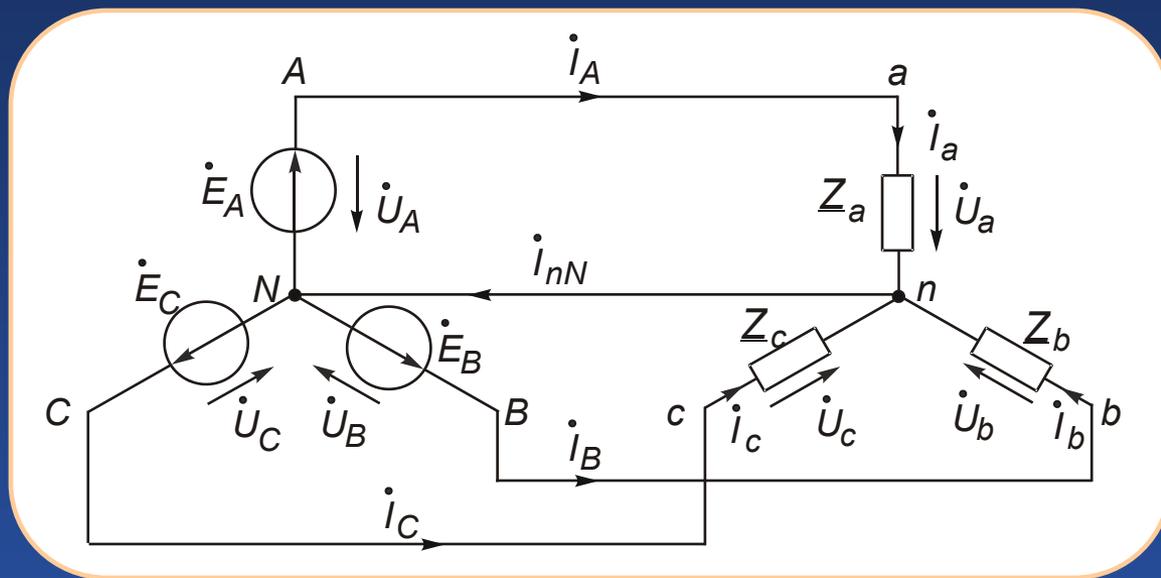
Если приемник симметричный ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$, $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}$), напряжение между нейтральными точками генератора и приемника не возникает.



$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120^\circ},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120^\circ}.$$



Приемник несимметричный

Линейные и фазные токи определяют по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_c}.$$

Ток в нейтральном проводе: $\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$

Приемник симметричный

Если приемник симметричный, токи в фазах и линиях равны между собой по величине и сдвинуты относительно друг друга по фазе на 120° .
Достаточно вычислить только один ток:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_a}$$

Тогда

$$\dot{I}_B = \dot{I}_b = \dot{I}_a e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{I}_A, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_c = \dot{I}_a e^{j120^\circ} = a \dot{I}_A.$$

Ток в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_{nN} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

Мощности p , P и Q находят как суммы мощностей трех фаз:

$$p = \sum p_{\phi}, \quad P = \sum P_{\phi}, \quad Q = \sum Q_{\phi}.$$

Потребляемой является активная мощность. Активную мощность фазы проще всего определить по формуле

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = R_{\phi} I_{\phi}^2.$$

Реактивную мощность фазы ищут следующим образом:

$$Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = X_{\phi} I_{\phi}^2.$$

Полную мощность трехфазной цепи вычисляют как гипотенузу суммарного треугольника мощностей:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{\left(\sum P_{\phi}\right)^2 + \left(\sum Q_{\phi}\right)^2}.$$

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi}, \quad Q = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \sin \varphi_{\phi}, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda}.$$

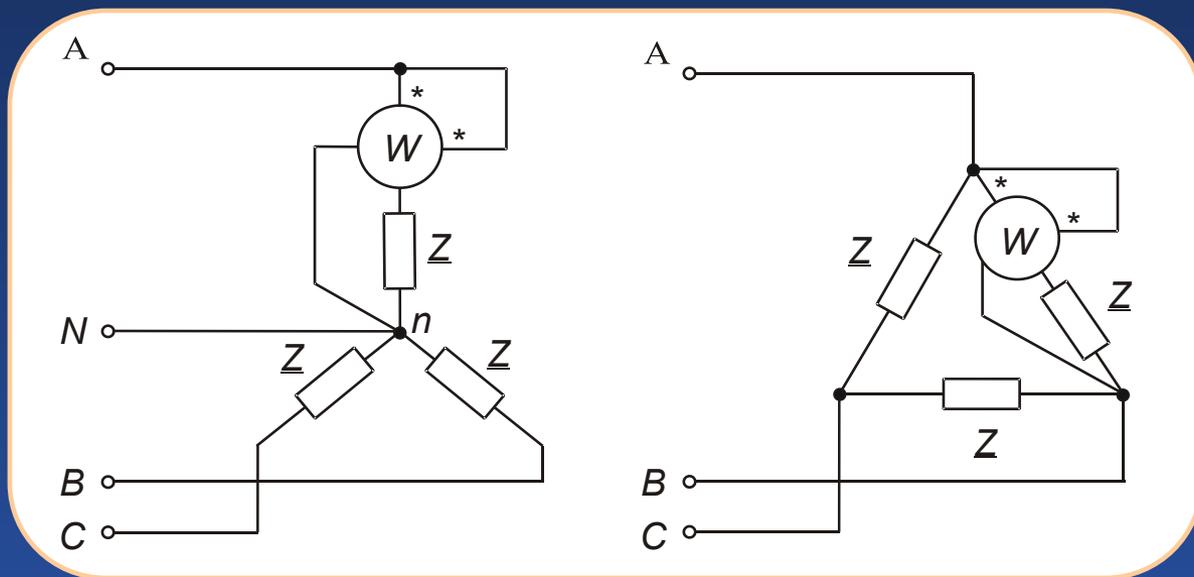
Для измерения активной мощности используют ваттметры. Число ваттметров и способ их включения зависят от способа соединения фаз приемника и от их параметров.

Ваттметр показывает активную мощность, которую вычисляют по формуле

$$P_W = U_W \cdot I_W \cos \left(\overset{\cdot}{U}_W \overset{\cdot}{\wedge} I_W \right) = \operatorname{Re}(\underline{S}_W) = \operatorname{Re} \left(\overset{\cdot}{U}_W \cdot \overset{*}{I}_W \right).$$

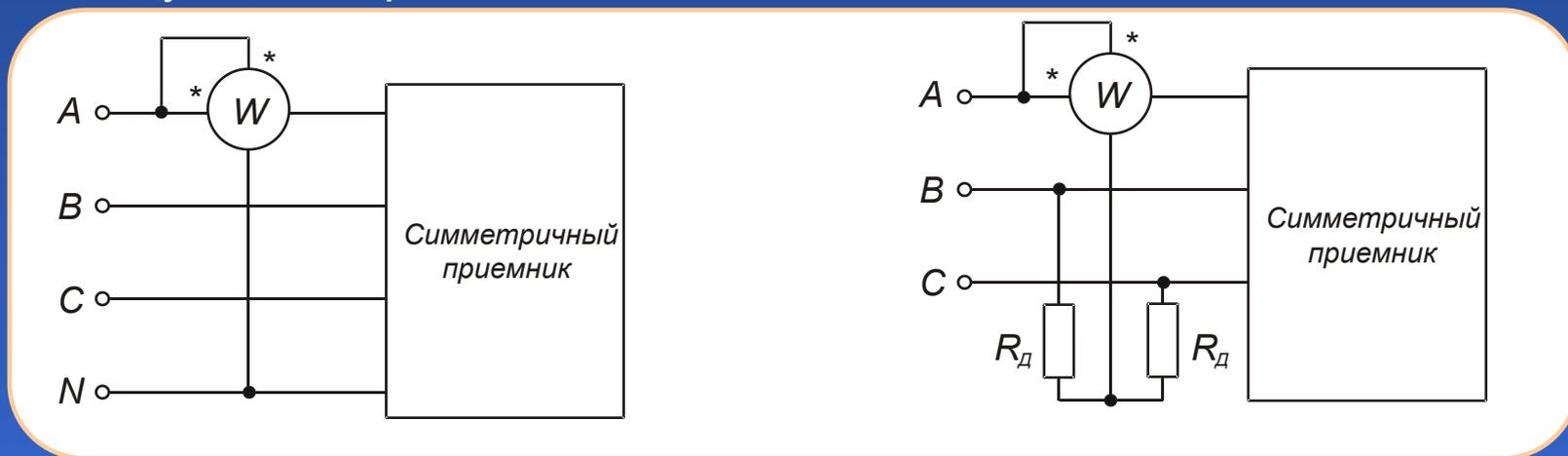
Угол сдвига фаз между ними соответствует одинаковым положительным направлениям, отмеченным звездочками.

Способ одного ваттметра

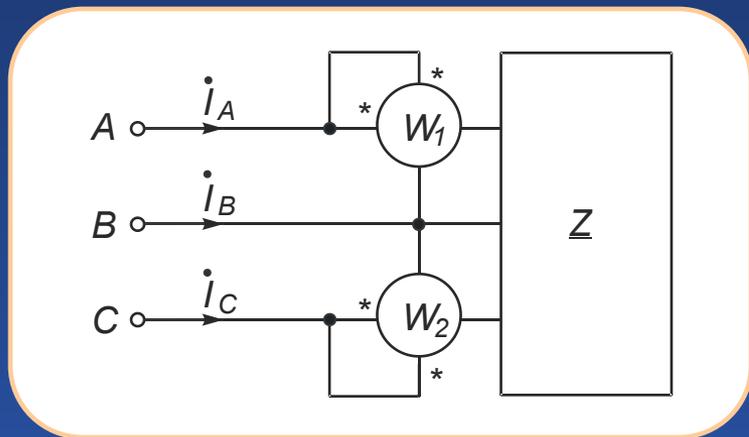


Применяют при симметричной нагрузке

Если фаза приемника недоступна, можно подключить следующим образом:



Способ двух ваттметров



Применяют в трехпроводной цепи при несимметричной нагрузке.

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= \underline{S}_{W_1} + \underline{S}_{W_2} = \dot{U}_{AB} \cdot \dot{I}_A + \dot{U}_{CB} \cdot \dot{I}_C = \\
 &= (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \dot{I}_A + (\dot{U}_C - \dot{U}_B) \dot{I}_C = \\
 &= \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B (-\dot{I}_A - \dot{I}_C) + \dot{U}_C \dot{I}_C = \\
 &= \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C.
 \end{aligned}$$

Способ трех ваттметров

Применяют в четырехпроводной цепи при несимметричной нагрузке. Каждый ваттметр измеряет активную мощность одной фазы. Мощность системы определяют как сумму показаний ваттметров. Метод громоздкий и неудобный.

Измерение трехфазным ваттметром

Представляет из себя конструктивное сочетание трех однофазных ваттметров. Суммирование их показаний происходит автоматически.

Применение измерительных комплексов

Представляется наиболее удобным. Измерительные комплексы снабжены амперметром, вольтметром и ваттметром. При переключении тумблера происходит подключение измерительных приборов на разные фазы.