

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Понятия и определения

- **Трехфазная цепь** - совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на **120°** , создаваемые общим источником.
- **Фаза** – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.³

Состав трехфазной цепи

- ❑ трехфазный генератор,
- ❑ соединительные провода,
- ❑ приемников или нагрузки, которые могут быть однофазными или трехфазными

Мгновенные значения и комплексы действующих значений ЭДС

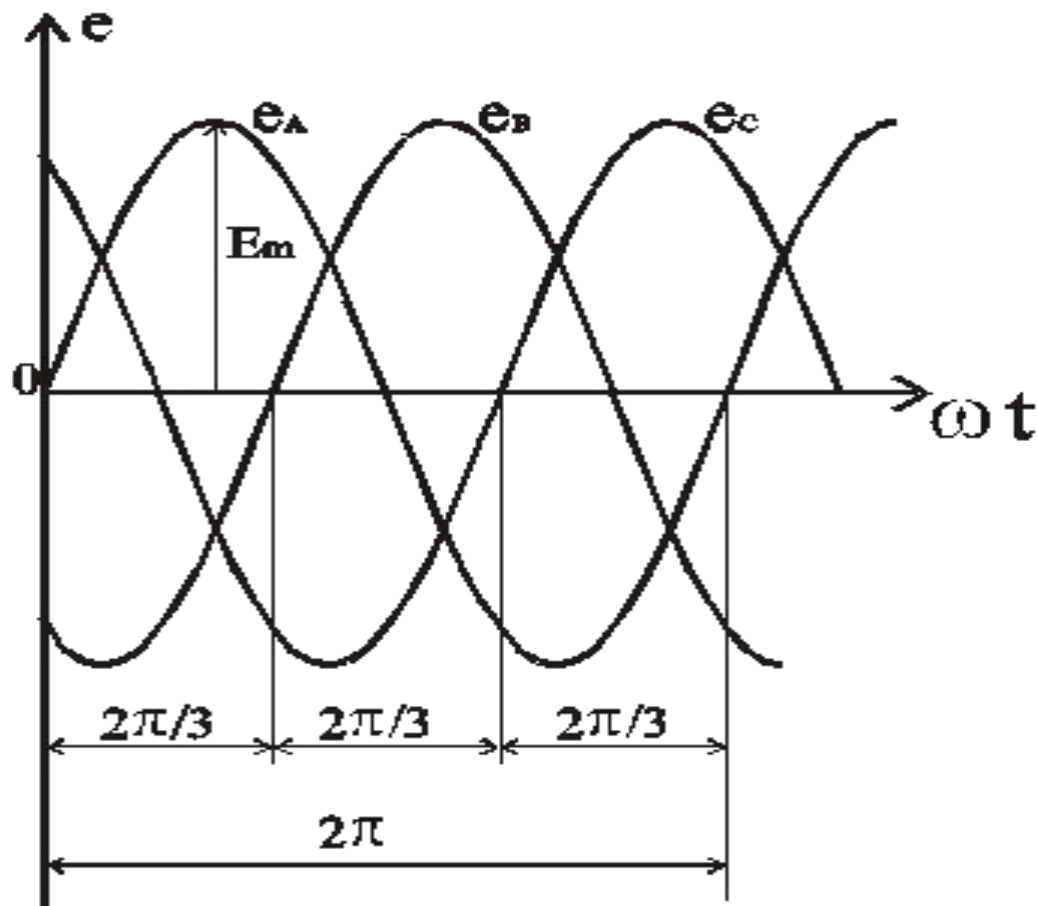
$$\bullet e_A = E_m \cdot \sin(\omega t)$$

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

$$\bullet e_C = E_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$\dot{E}_A = E ; \quad \dot{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ} ; \quad \dot{E}_C = E \cdot e^{j120^\circ} .$$

Мгновенные значения и комплексы действующих значений ЭДС

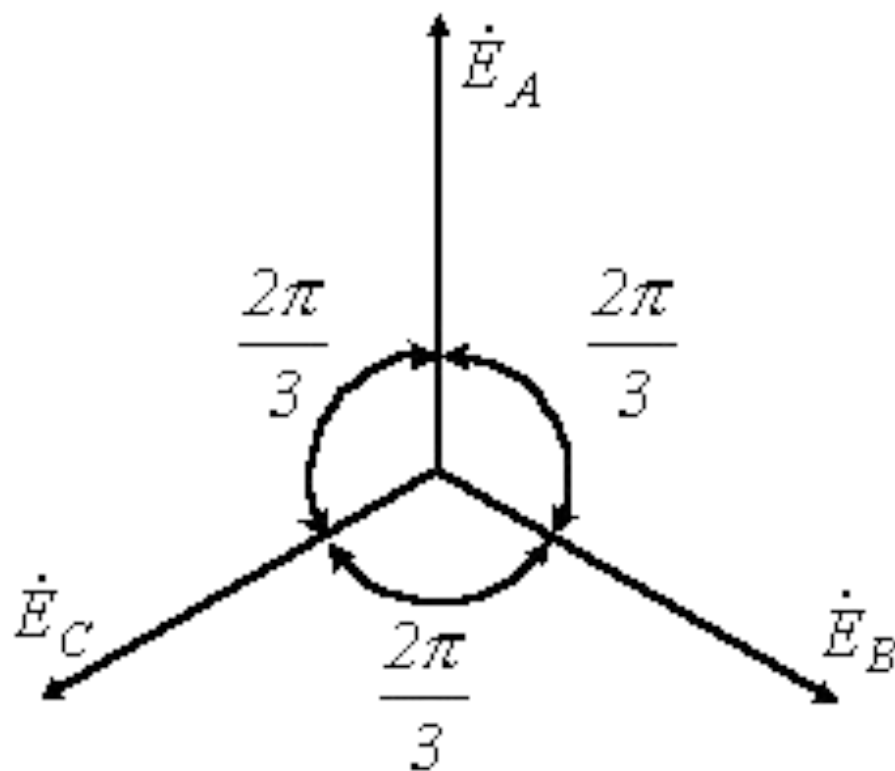


Мгновенные значения и комплексы действующих значений ЭДС

$$\begin{aligned}\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C &= E(1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = \\ &= E(1 + \cos 120^\circ - j \cdot \sin 120^\circ + \cos 120^\circ + j \cdot \sin 120^\circ) = E\left(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) = 0.\end{aligned}$$

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

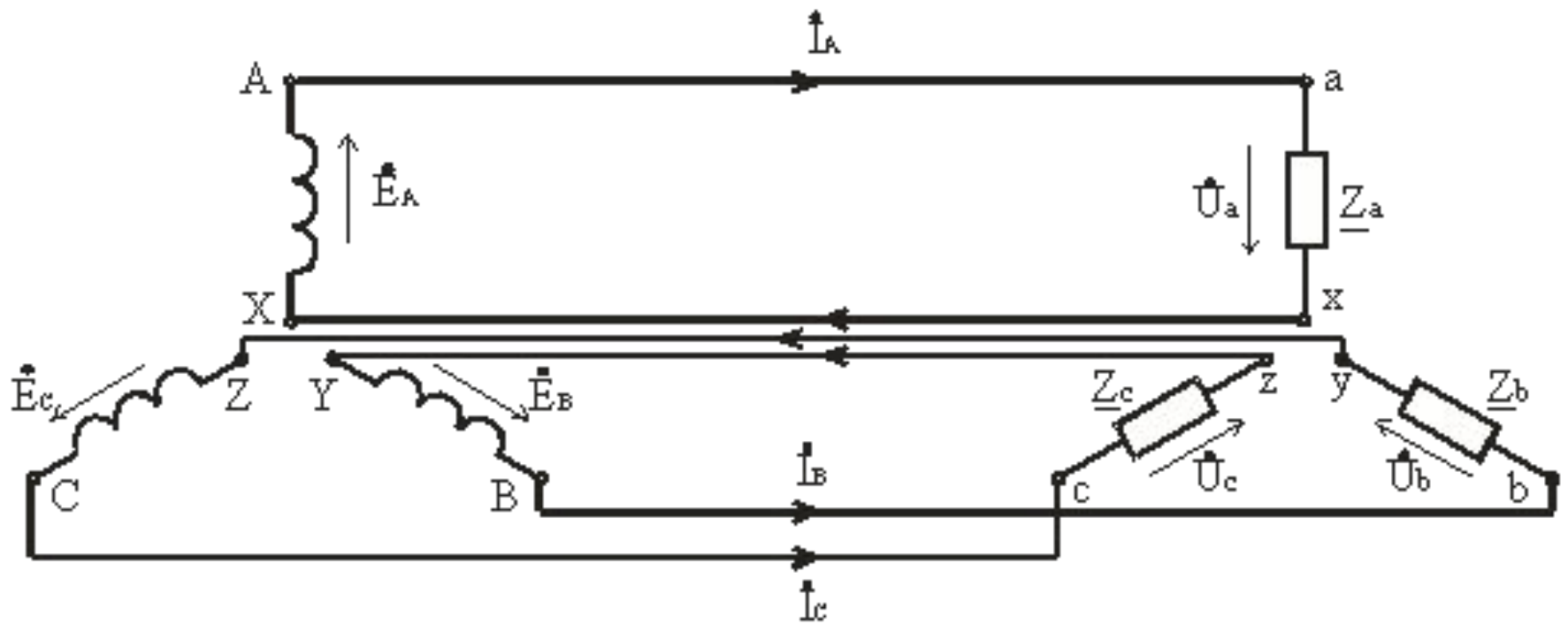
Векторная диаграмма ЭДС трехфазного генератора



Обозначения на схемах

- ❑ начала фаз - первыми буквами латинского алфавита (*A, B, C*),
- ❑ концы фаз - последними буквами (*X, Y, Z*),
- ❑ направления ЭДС указывают от конца фазы обмотки генератора к ее началу.

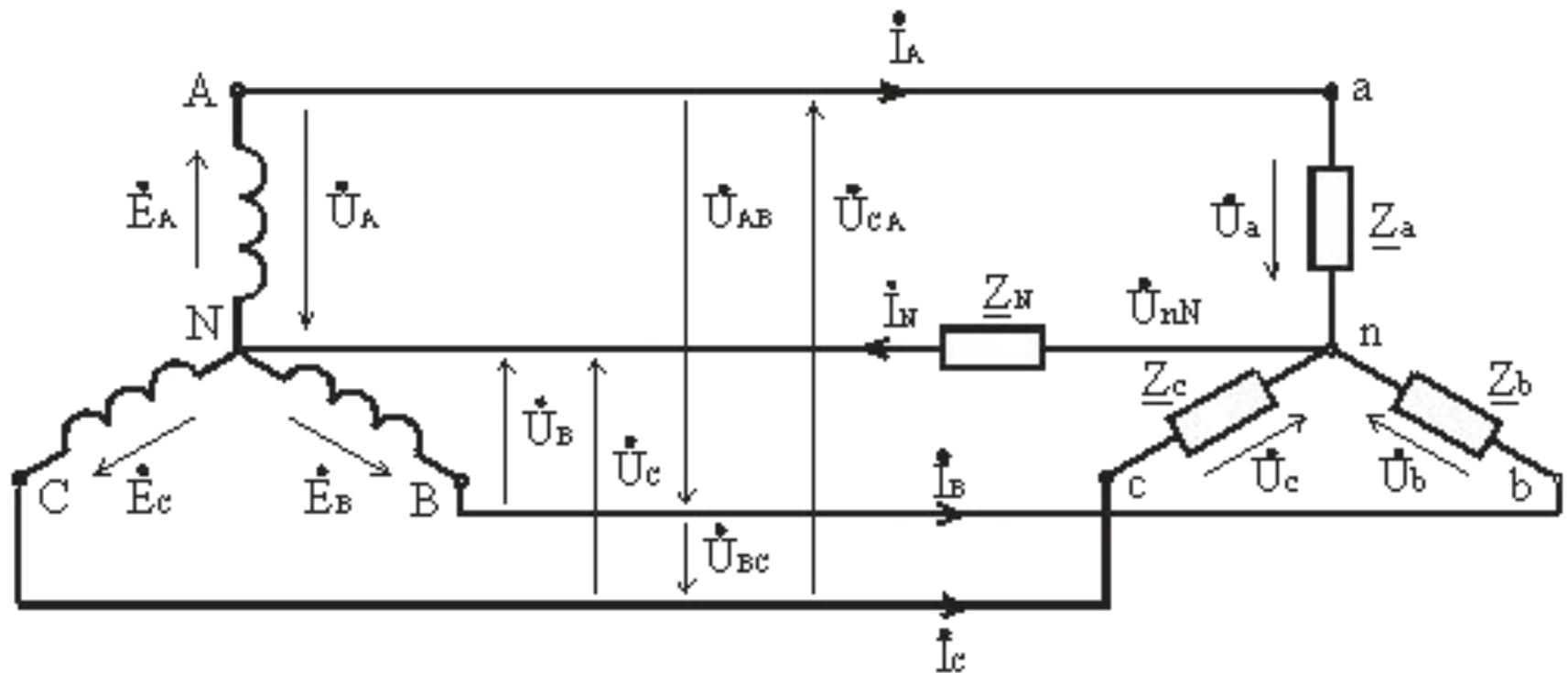
Несвязанная трехфазная система



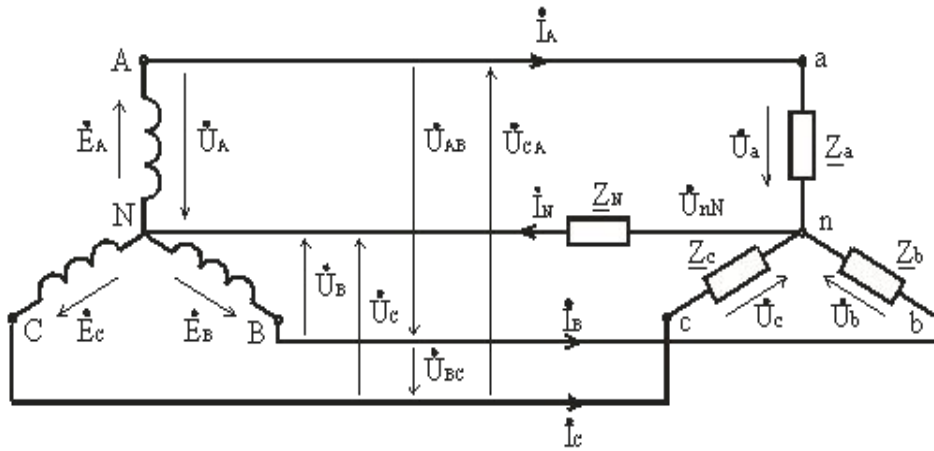
Соединение в звезду. Схема, определения

- Если концы всех фаз генератора соединить в общий узел, а начала фаз соединить с нагрузкой, образующей трехлучевую звезду сопротивлений, получится трехфазная цепь, соединенная **звездой**.
- При этом три обратных провода сливаются в один, называемый **нулевым** или **нейтральным**.

Соединение в звезду. Схема, определения

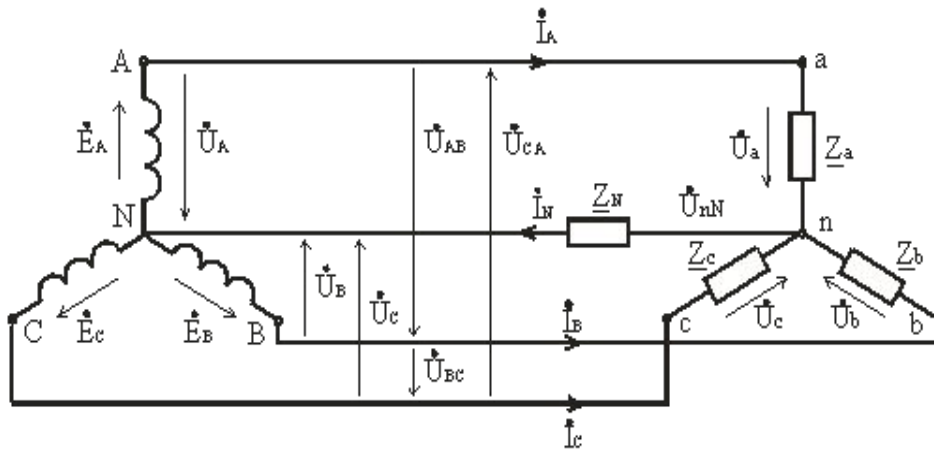


Соединение в звезду. Схема, определения



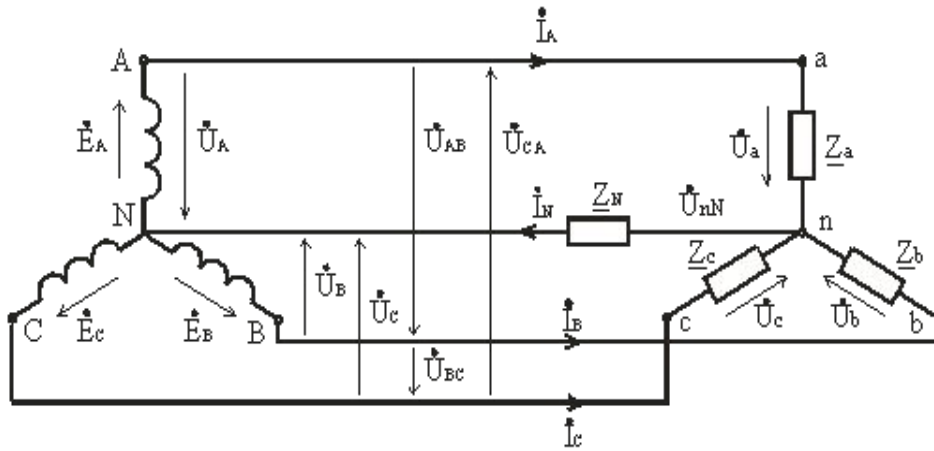
- провода, идущие от источника к нагрузке называют **линейными** проводами
- провод, соединяющий нейтральные точки источника N и приемника N' называют **нейтральным (нулевым) проводом**

Соединение в звезду. Схема, определения



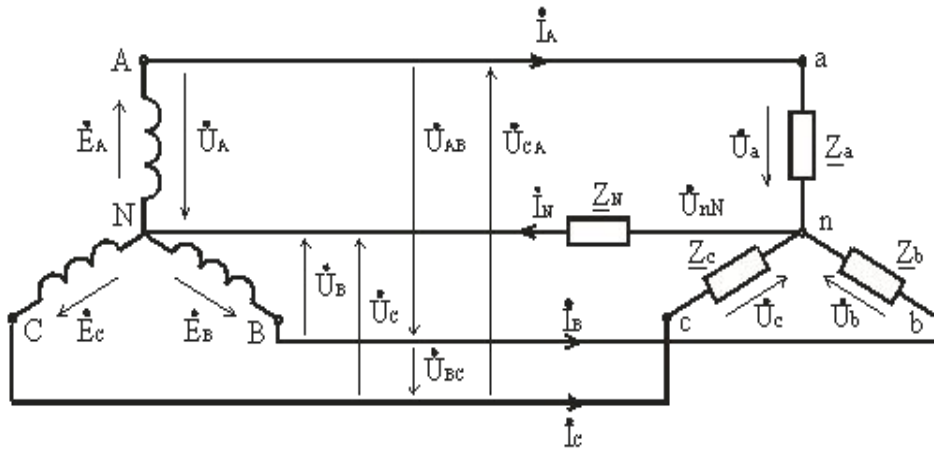
Напряжения между началами фаз или между линейными проводами называют **линейными напряжениями** (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA})

Соединение в звезду. Схема, определения



Напряжения между началом и концом фазы или между линейным и нейтральным проводами называются **фазными напряжениями** ($U_{A'}$, $U_{B'}$, $U_{C'}$ у источника; U_a , U_b , U_c у приемника).

Соединение в звезду. Схема, определения



- токи в фазах приемника или источника называют **фазными** токами,
- токи в линейных проводах называются **линейными** токами

Соединение генератора с нагрузкой

- ❑ Трехфазный генератор соединяется с нагрузкой четырьмя линейными проводами либо тремя.
- ❑ Общие точки генератора O и потребителя O' называют нулевыми (нейтральными).
- ❑ Провод oo' — нулевой (O) или нейтральный (N) провод.

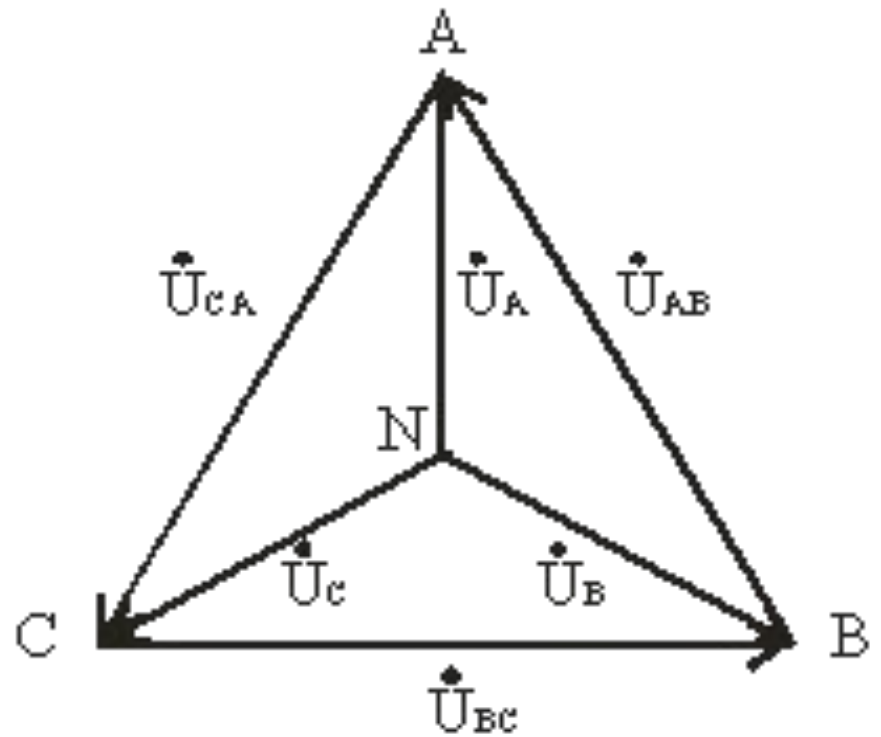
Соединение в звезду. Фазные и линейные напряжения

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

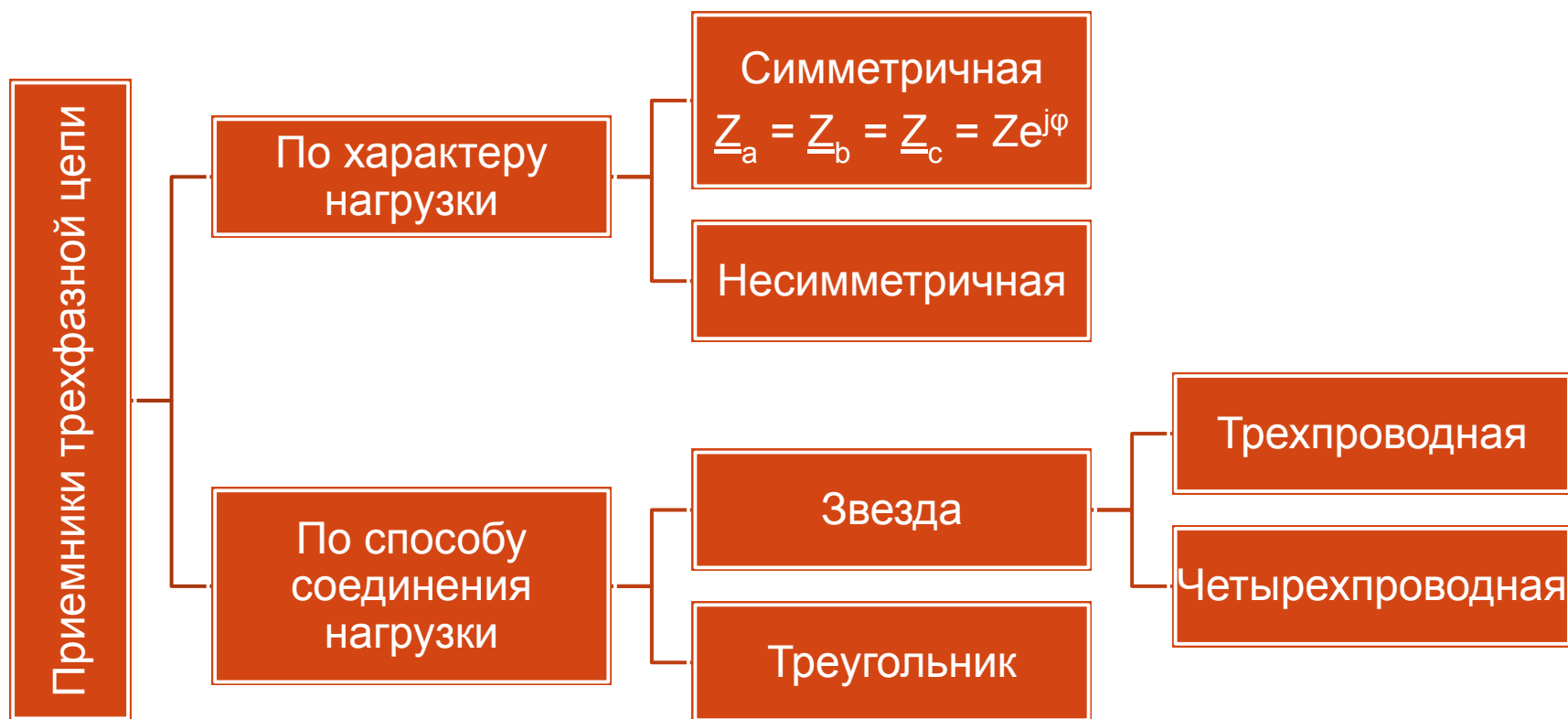
$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$

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

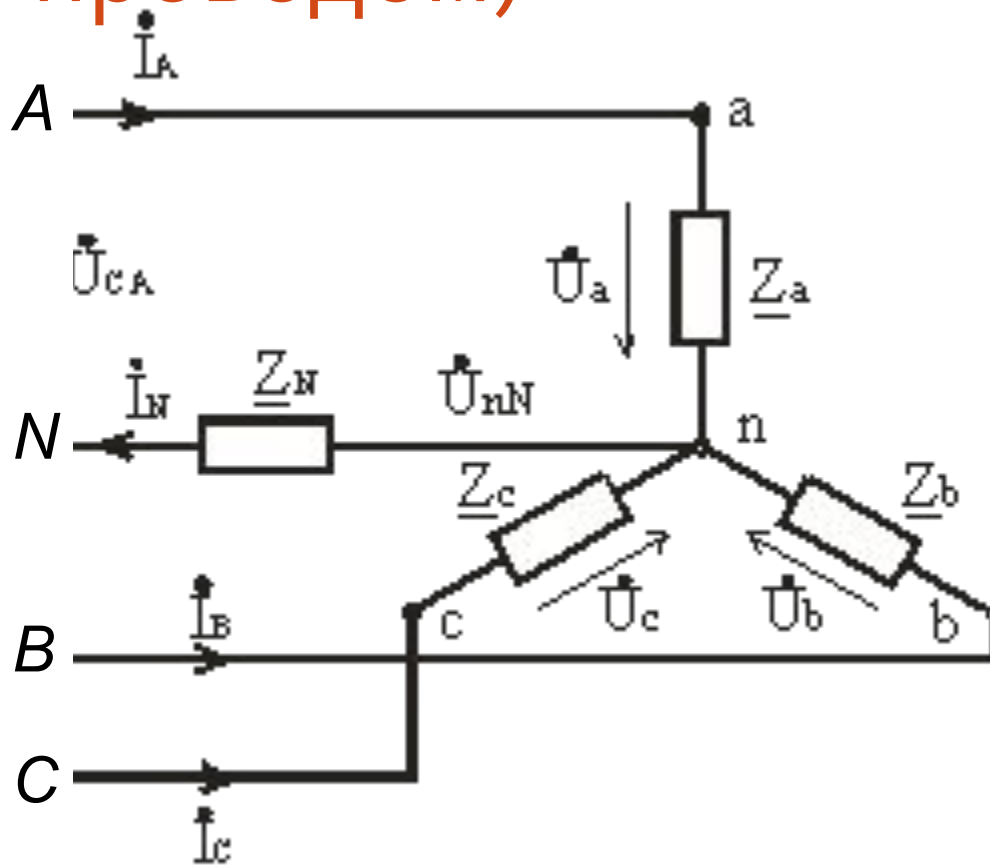
$$\begin{aligned} U_L &= 2U_\phi \cdot \cos 30^\circ = \\ &= 2U_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = U_\phi \sqrt{3} \end{aligned}$$



Классификация приемников в трехфазной цепи



Четырехпроводная звезда (звезда с нейтральным проводом)

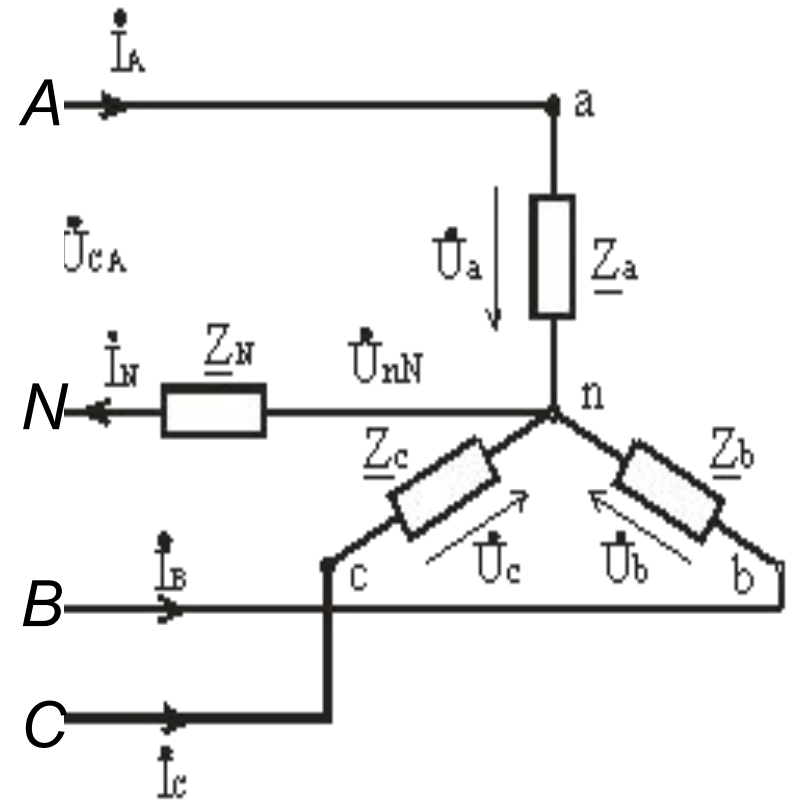


$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \\ \dot{I}_b &= \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \\ \dot{I}_c &= \dot{U}_c / \underline{Z}_c \end{aligned}$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

Четырехпроводная звезда (звезда с нейтральным проводом)

В четырехпроводной трехфазной цепи возможно дать потребителю два различных напряжения — линейное или фазное.



Четырехпроводная звезда. Симметричная нагрузка приемника

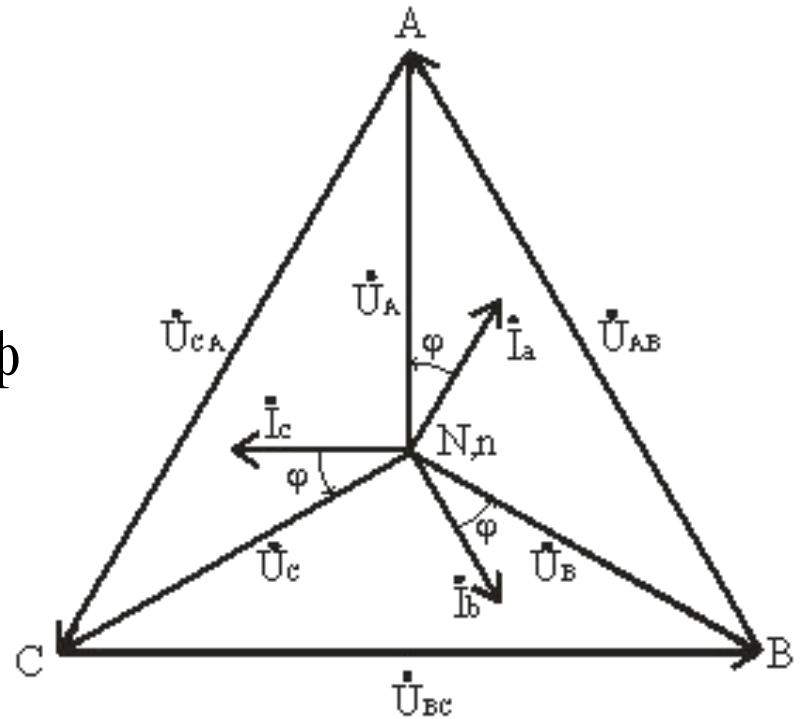
$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$$

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = U_\phi / Z_\phi$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$$

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

$$I_N = 0$$



Четырехпроводная звезда. Несимметричная нагрузка приемника

$$Z_a \neq Z_b \neq Z_c$$

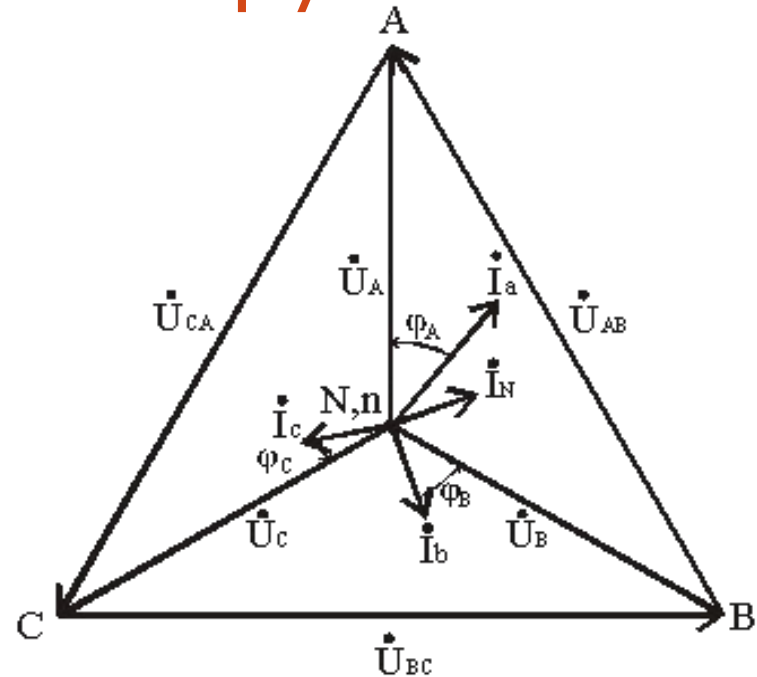
$$\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$$

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a;$$

$$\dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b;$$

$$\dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$



$$U_a = U_A; U_b = U_B;$$

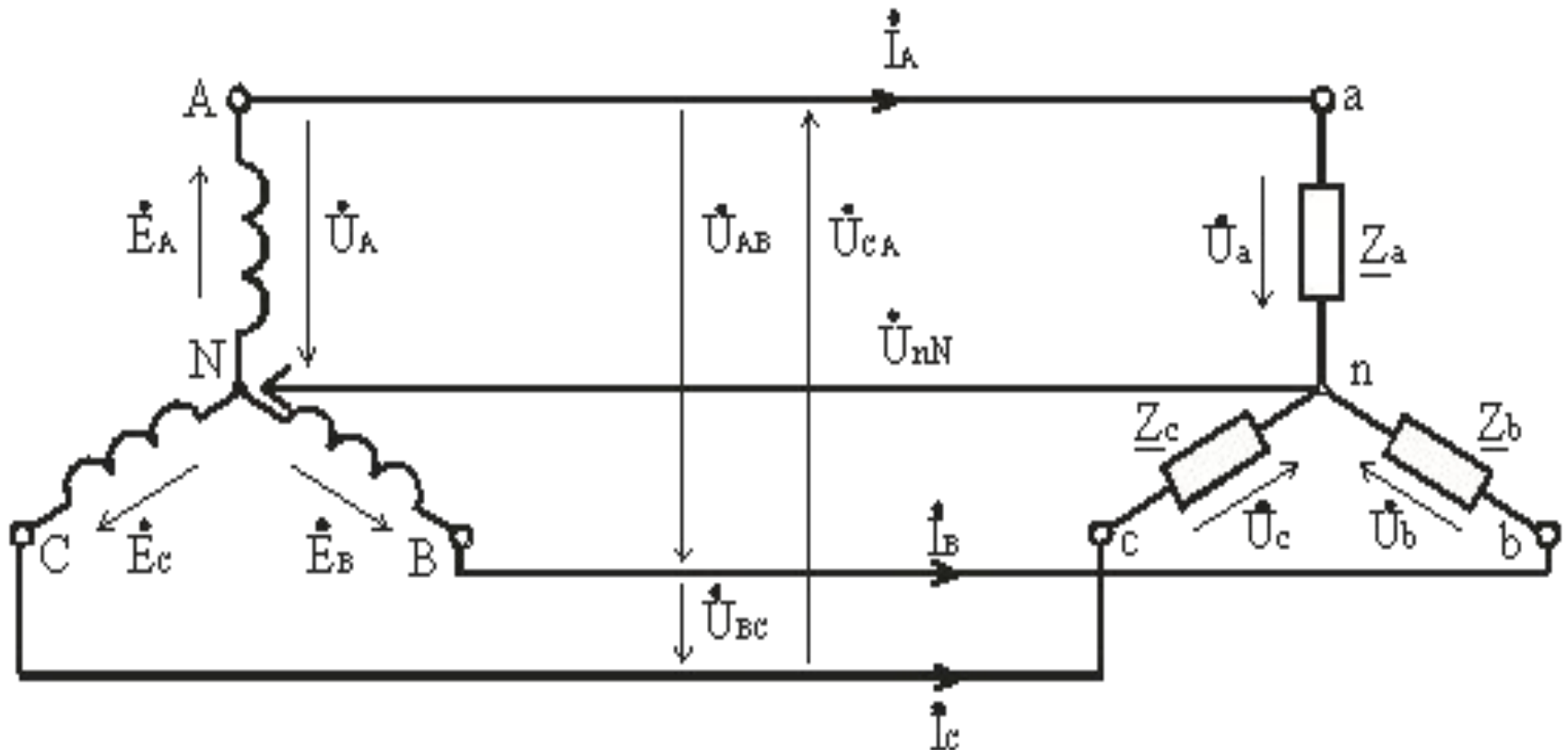
$$U_c = U_C,$$

$$U_\Phi = U_L / \sqrt{3}$$

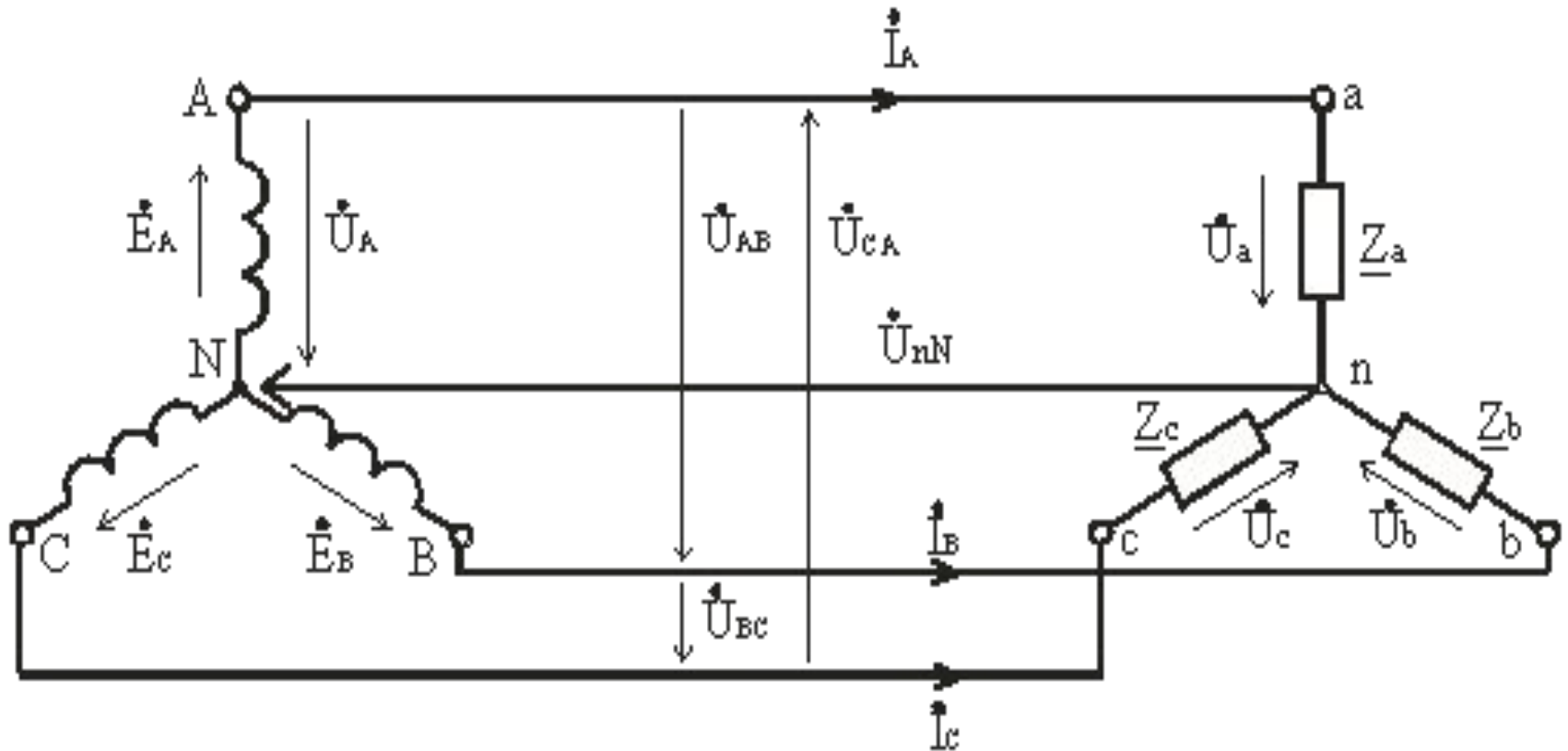
Четырехпроводная звезда. Несимметричная нагрузка приемника

- Нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке
- Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз

Трехпроводная звезда (звезда без нейтрального провода)



Трехпроводная звезда (звезда без нейтрального провода)



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

Трехпроводная звезда. Симметричная нагрузка

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

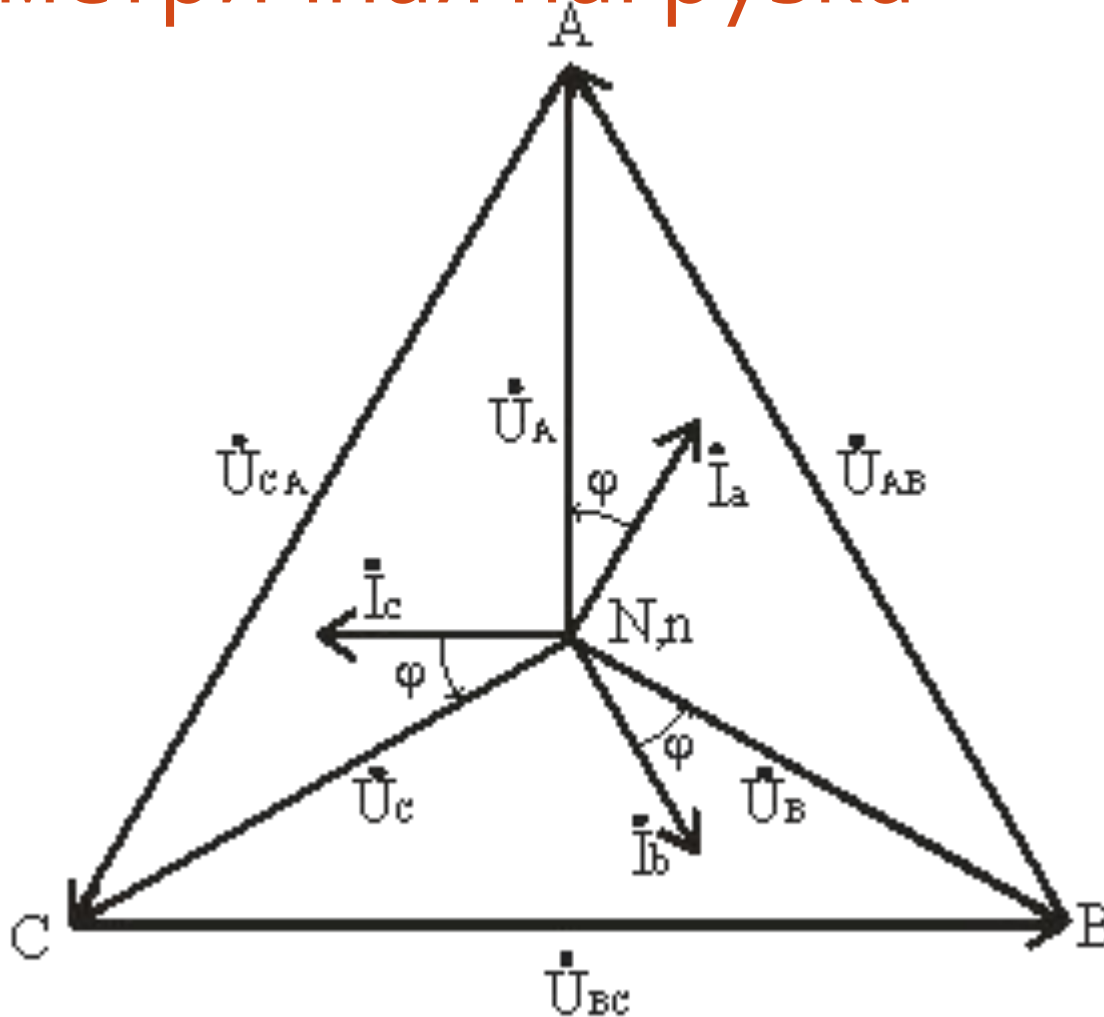
$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = U_\phi / Z_\phi$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$$

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 \quad \text{нейтрального провода нет}$$

$$\dot{U}_{nN} = 0$$

Трехпроводная звезда. Симметричная нагрузка



Трехпроводная звезда. Несимметричная нагрузка

$$Z_a \neq Z_b \neq Z_c$$

$$\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$$

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

напряжение
смещения
нейтрали

$$\underline{Y}_a = 1 / \underline{Z}_a;$$

$$\underline{Y}_b = 1 / \underline{Z}_b;$$

$$\underline{Y}_c = 1 / \underline{Z}_c$$

комплексы
проводимостей фаз

Трехпроводная звезда. Несимметричная нагрузка

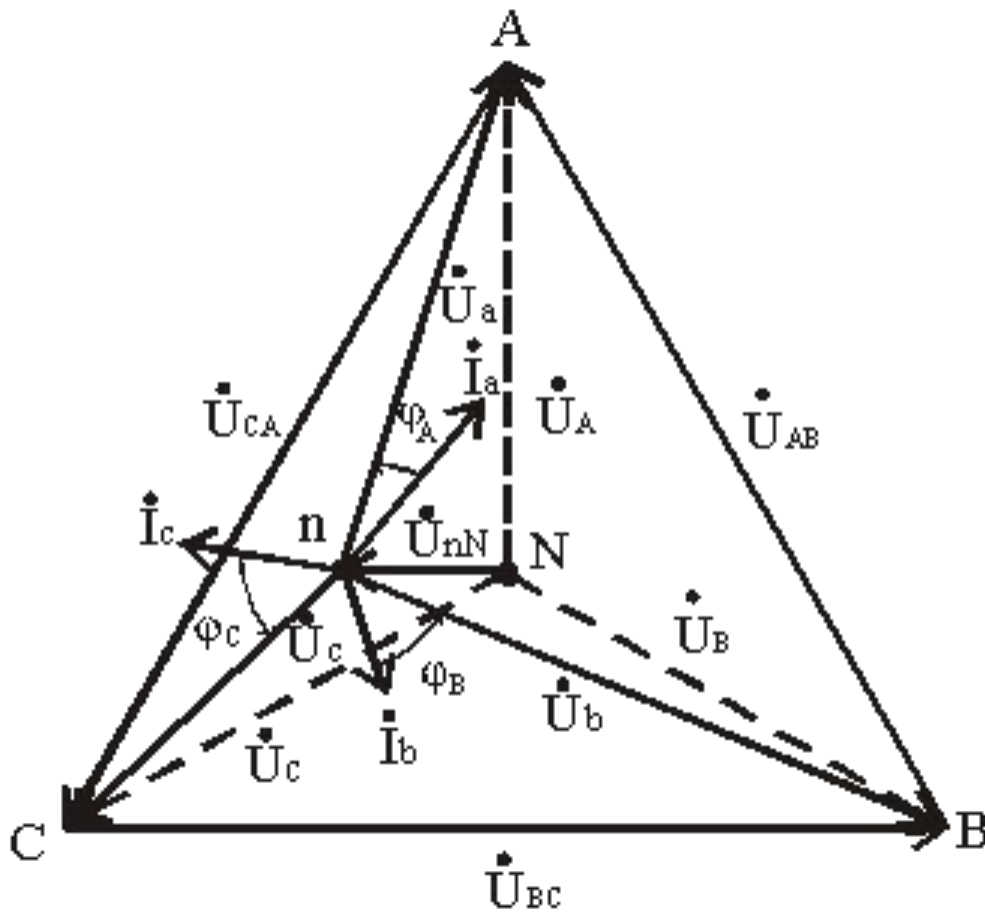
По второму
закону Кирхгофа

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}\end{aligned}$$

По закону Ома

$$\begin{aligned}\dot{i}_a &= \dot{U}_a / \underline{Z}_a = \underline{Y}_a \dot{U}_a; \\ \dot{i}_b &= \dot{U}_b / \underline{Z}_b = \underline{Y}_b \dot{U}_b; \\ \dot{i}_c &= \dot{U}_c / \underline{Z}_c = \underline{Y}_c \dot{U}_c\end{aligned}$$

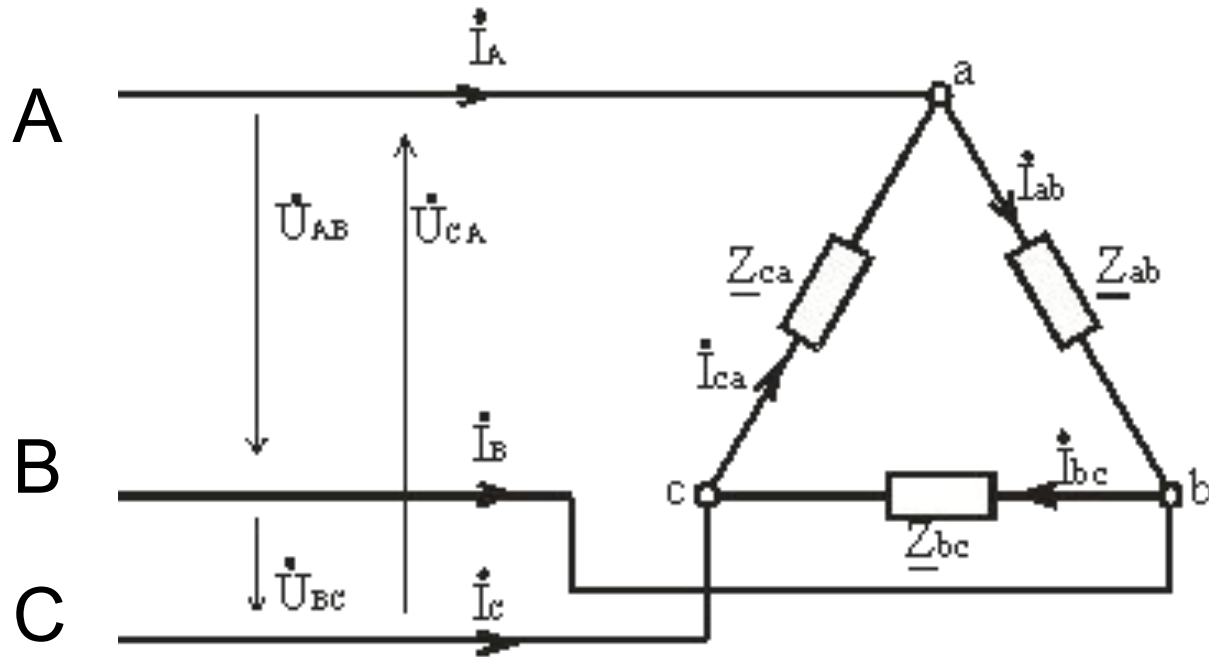
Трехпроводная звезда. Несимметричная нагрузка



Соединение нагрузки звездой. Роль нейтрального провода

- ❑ выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;
- ❑ подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети

Соединение фаз приемника треугольником



$$U_{ab} = U_{AB}, U_{bc} = U_{BC}, U_{ca} = U_{CA}$$

Соединение фаз генератора и приемника треугольником

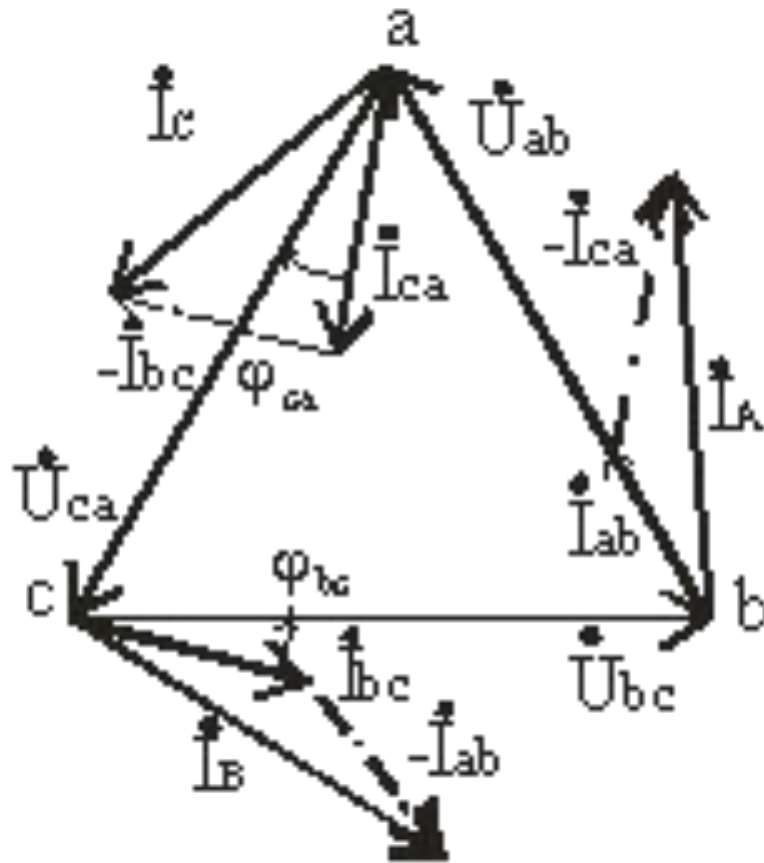
$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ фазные токи

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

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}\end{aligned}$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

Соединение фаз приемника треугольником



МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Трёхфазные электрические цепи

Активная мощность трехфазной цепи

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей фаз,

- где U, I — действующие напряжения и ток в фазах; ϕ — сдвиг фаз между напряжением и током в фазах.

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

Активная мощность в симметричной трехфазной цепи

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}.$$

$$P = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cos \varphi_{\phi},$$

Реактивная мощность трехфазной цепи

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

- В симметричной трехфазной цепи суммарная реактивная мощность равна утроенной реактивной мощности одной фазы:

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi_L .$$

Измерение активной мощности в трехфазных цепях

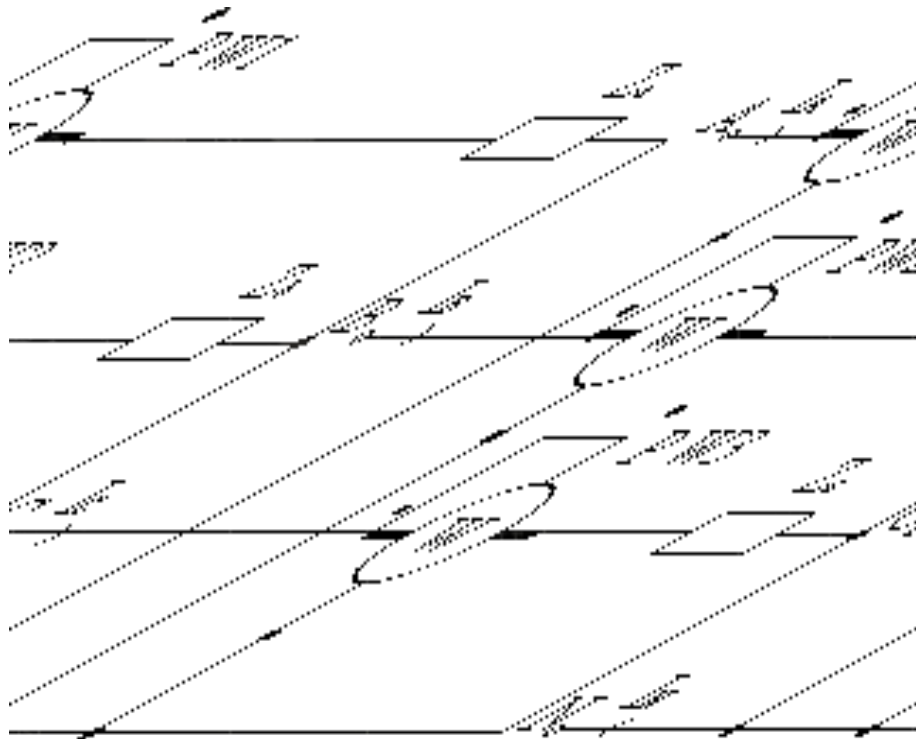
- С помощью трех, двух или одного ваттметров
- Зависит от многих параметров

Измерение активной мощности в трехфазных цепях

Схема включения ваттметров для измерения активной мощности определяется

- схемой сети (трех- или четырехпроводная),
- схемой соединения фаз приемника (звезда или треугольник),
- характером нагрузки (симметричная или несимметричная),
- доступностью нейтральной точки.

Несимметричная нагрузка в четырёхпроводной цепи



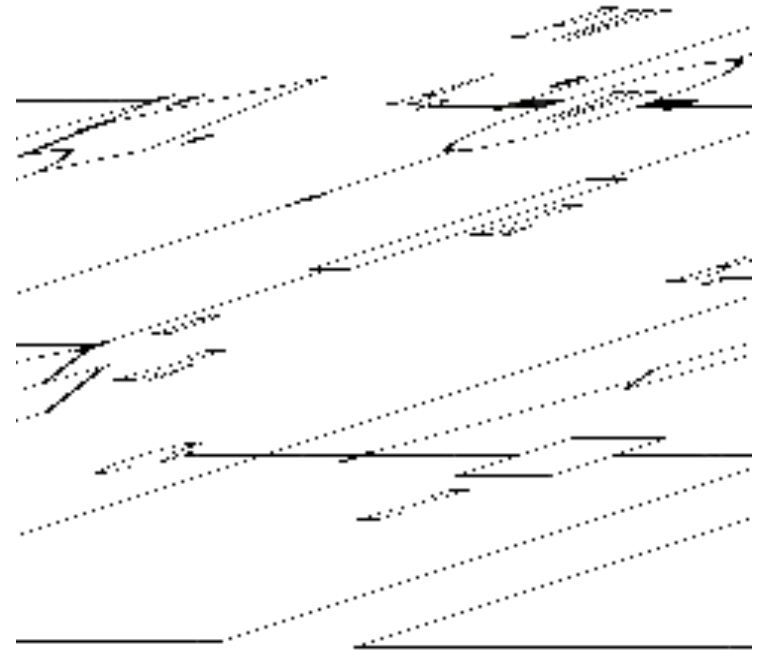
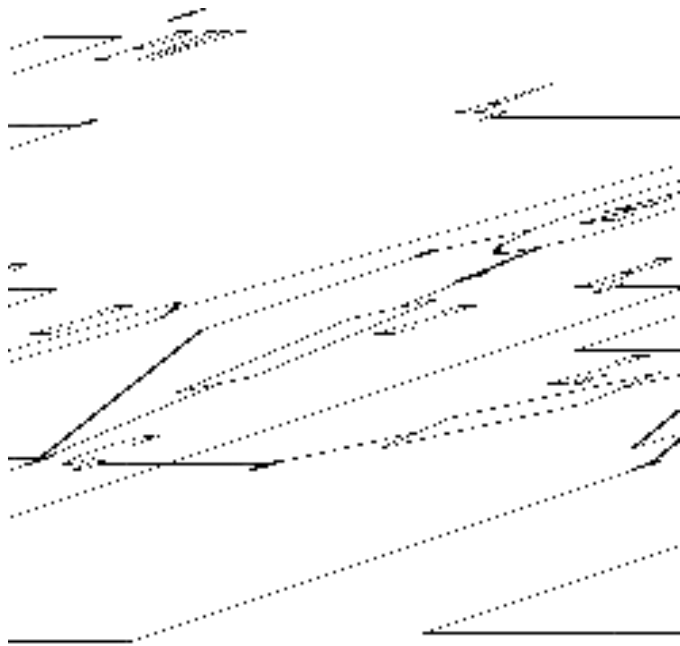
$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_1 = U_A I_A \cos \varphi_A;$$

$$P_2 = U_B I_B \cos \varphi_B;$$

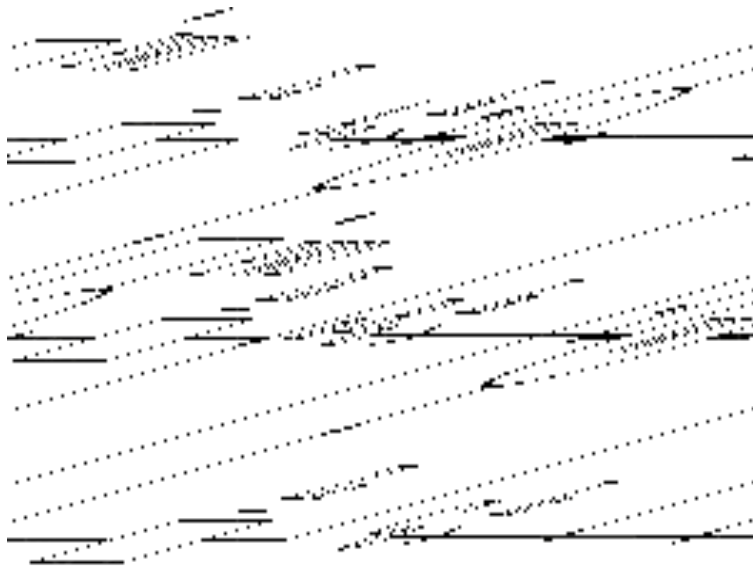
$$P_3 = U_C I_C \cos \varphi_C$$

Симметричный приемник



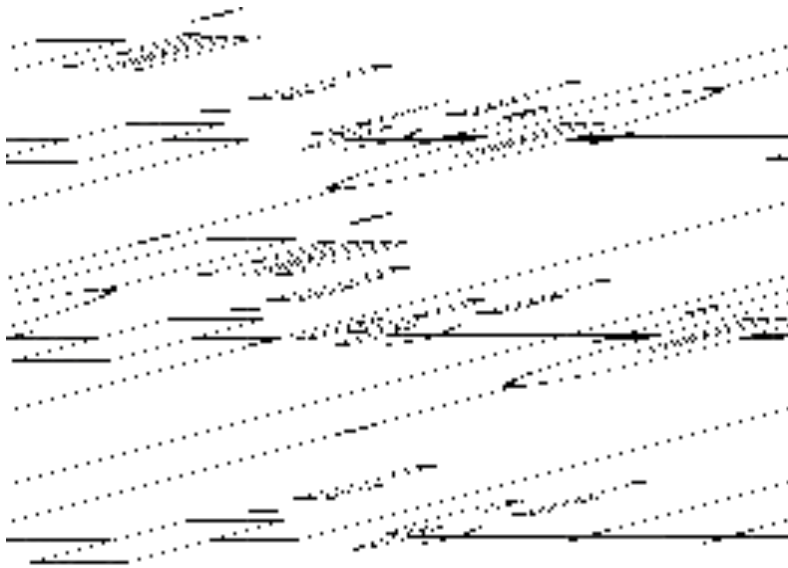
$$P = 3 P_{\Phi}$$

Измерение активной мощности двумя ваттметрами



$$P = P_1 + P_2$$

Измерение активной мощности двумя ваттметрами



$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$$

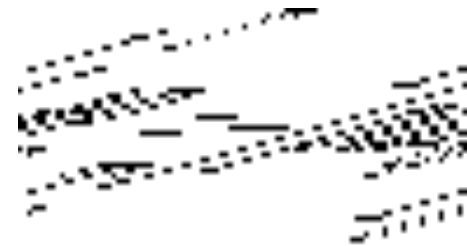
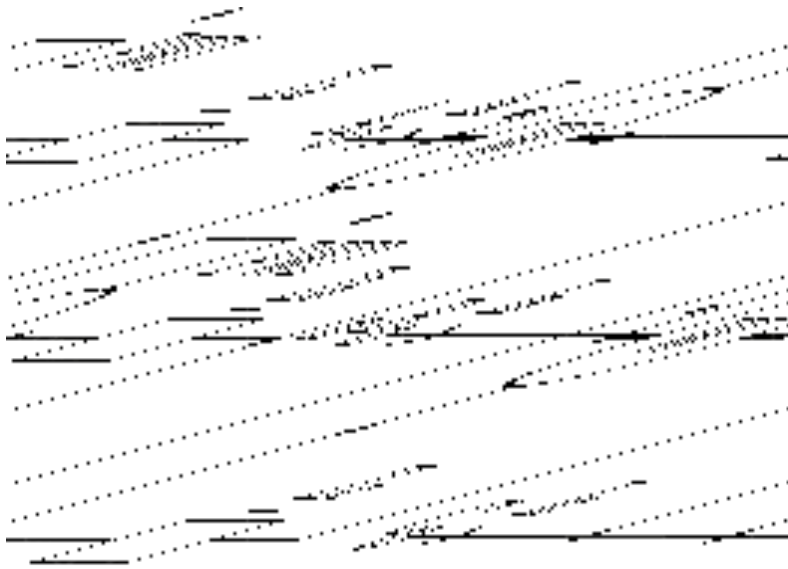
$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$i_c = -(i_a + i_b)$$

$$p = u_a i_a + u_b i_b - u_c (i_a + i_b)$$

$$p = (u_a - u_c) i_a + (u_b - u_c) i_b = u_{ac} i_a + u_{bc} i_b$$

Измерение активной мощности двумя ваттметрами



$$P = U_{ac} I_a \cos(\hat{U}_{ac} \hat{I}_a) + U_{bc} I_b \cos(\hat{U}_{bc} \hat{I}_b)$$

$$P = P_1 + P_2$$