

**Федеральное агентство по образованию
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

С.Н. Охулков

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

**Кафедра “Теоретическая и общая
электротехника”**

**Для студентов электротехнических
специальностей всех форм обучения**

Автозаводская высшая школа управления и технологий


Очная и заочная форма обучения

- Автомобили и автомобильное хозяйство
- Автомобиле- и тракторостроение
- Технология машиностроения

г. Нижний Новгород, ул. Лескова, 68, т. (831) 256-02-10

Тема 6.3

Трехфазные цепи



Трехфазные цепи – это совокупность трех однофазных цепей, в которых действует 3 синусоидальных Э.Д.С. одной и той же частоты, сдвинутых относительно друг друга на угол 120° и создаваемых общим источником энергии.

Трёхфазные цепи

При вращении ротора в обмотках A , B , C статора генерируются напряжения, имеющие одинаковую частоту и амплитуду, но сдвинутые относительно друг друга на угол.

Мгновенные значения ЭДС трёхфазного источника:

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

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

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

Преимущества трехфазной цепи

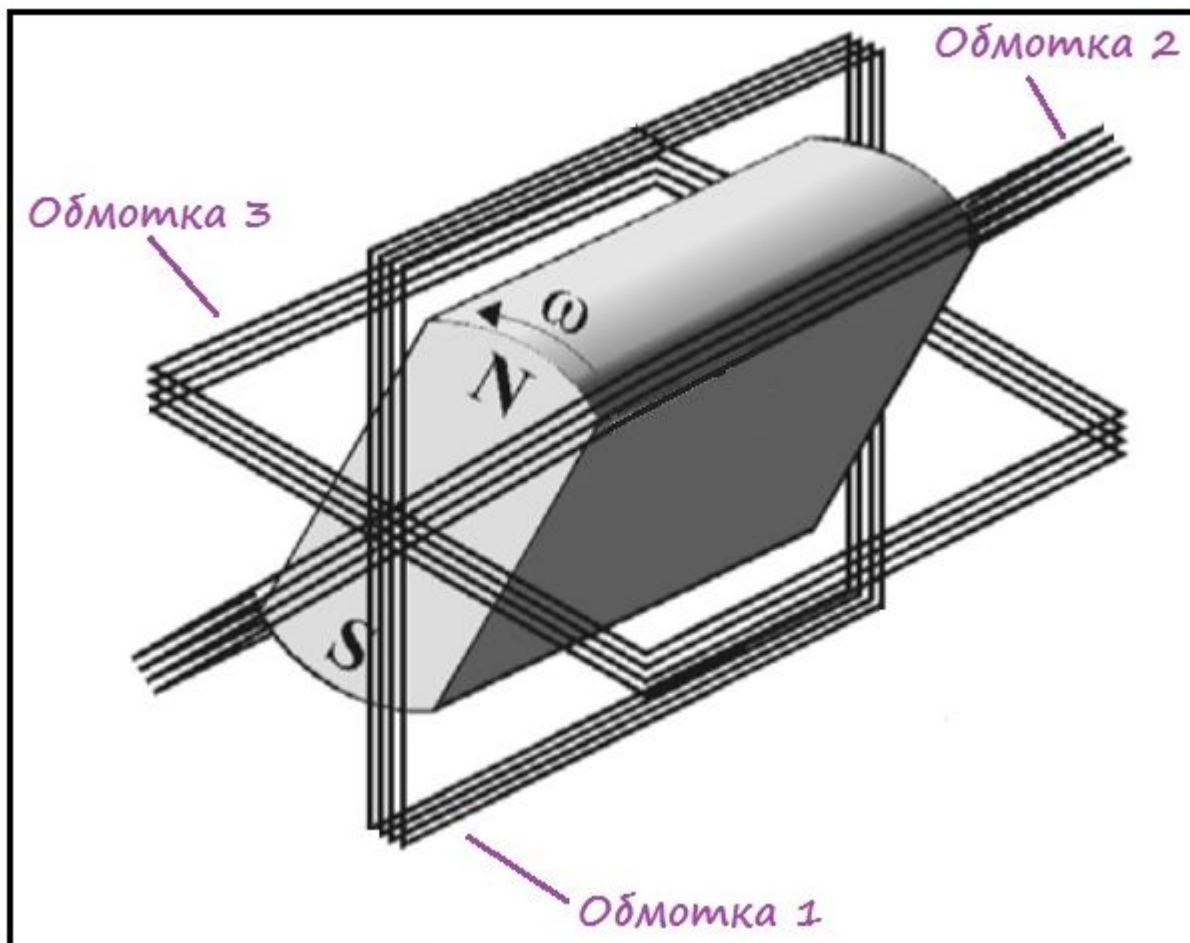
1. При одинаковой передаваемой мощности 3^X фазные цепи экономичнее 3^X однофазных цепей

2. Трехфазная цепь позволяет достаточно просто получать вращающееся магнитное поле

3. Трехфазная цепь позволяет получать 2^a эксплуатационных U

Генерирование и распределение
электрической энергии
осуществляется посредством
трехфазных цепей,
которые подключены к обмоткам
генераторов или трансформаторов,
характеризуемых фазными ЭДС
 $e_A(t), e_B(t), e_C(t)$

Принцип построения трёхфазного генератора



Синхронный генератор

Магнитопровод статора

Полюс ротора

Ротор

Вал

Обмотка ротора

Обмотка статора

A

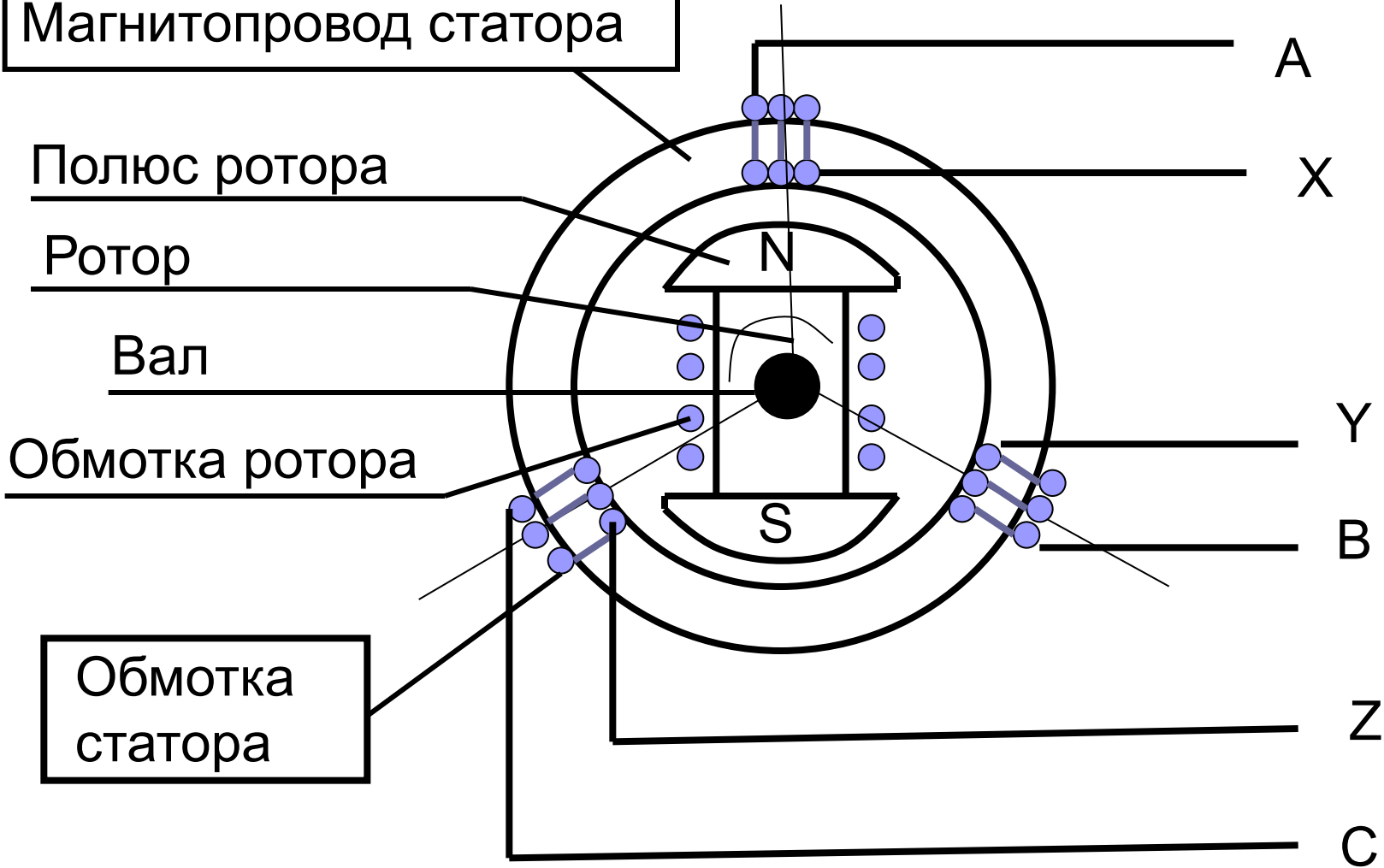
X

Y

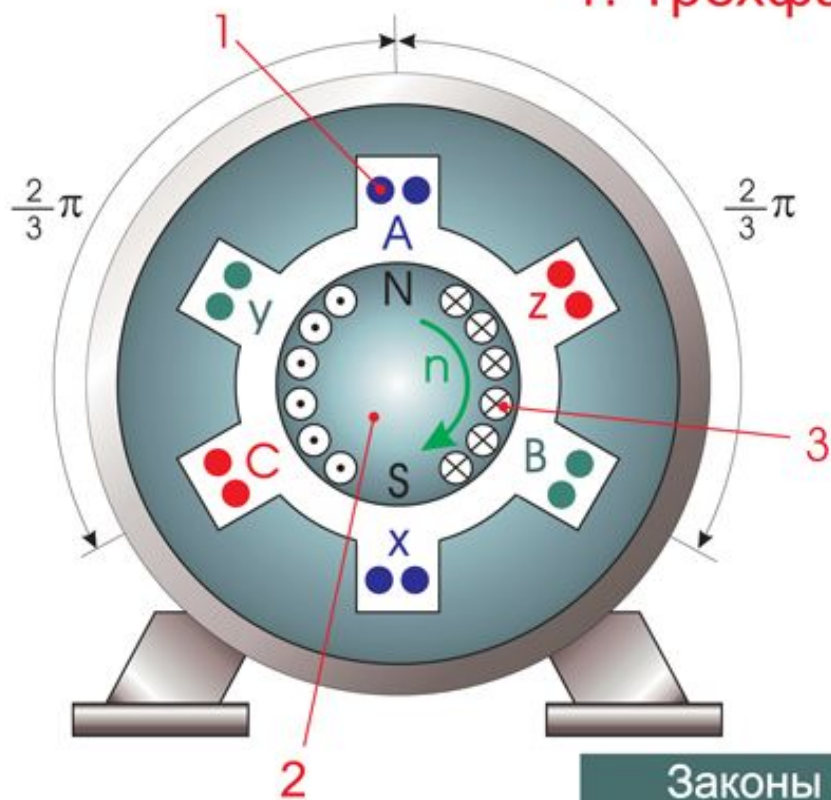
B

Z

C



1. Трехфазные генераторы



Условные обозначения:
 1 - трехфазная обмотка статора
 2 - сердечник ротора
 3 - обмотка возбуждения

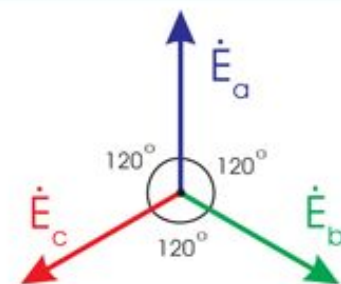
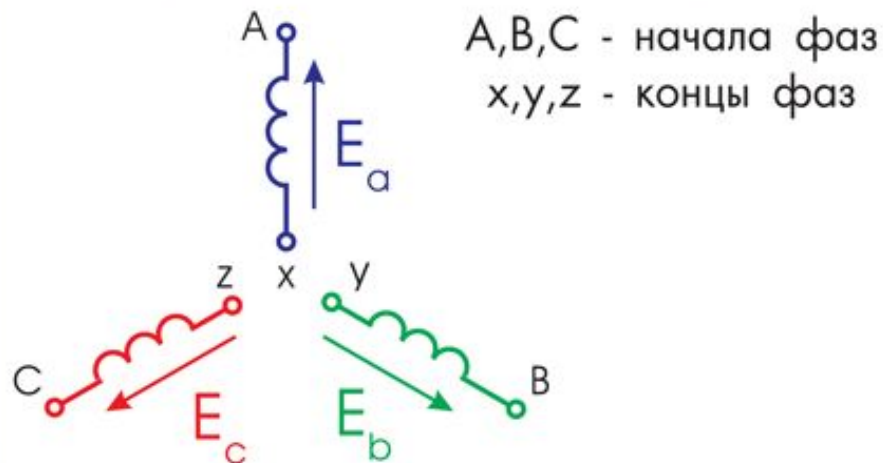
Законы изменения ЭДС при прямом порядке чередования фаз

$$e_a = E_m \sin \omega t$$

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

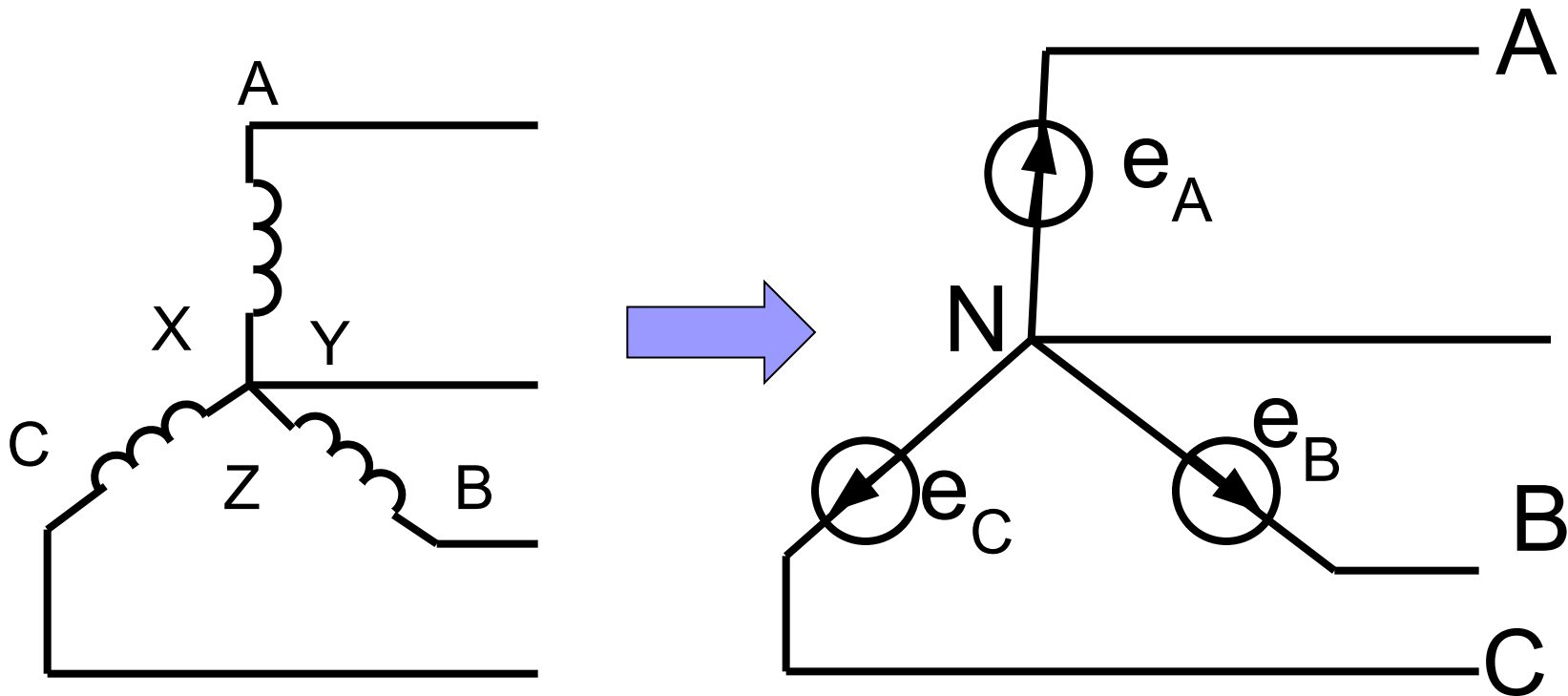
$$e_c = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

Условное обозначение трехфазной обмотки статора



Векторная диаграмма ЭДС генератора

Схемы замещения синхронного генератора, соединенного звездой



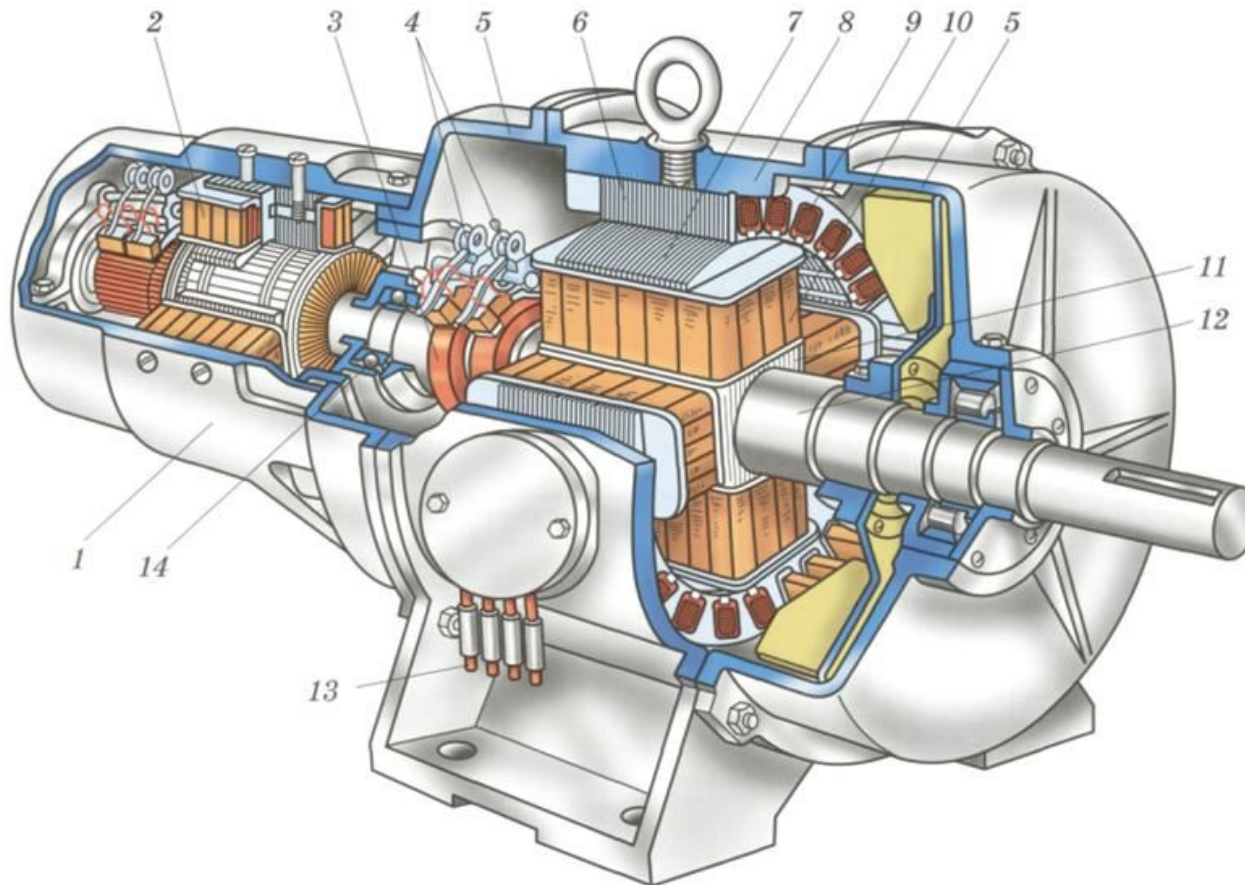
Синхронная машина - ЭМ переменного тока, в которой ротор и магнитное поле токов статора вращаются синхронно, т. е. с одной и той же частотой вращения.

Трехфазные СГ – основные источники электроэнергии :

мощность - на ГЭС: до 640 МВт,

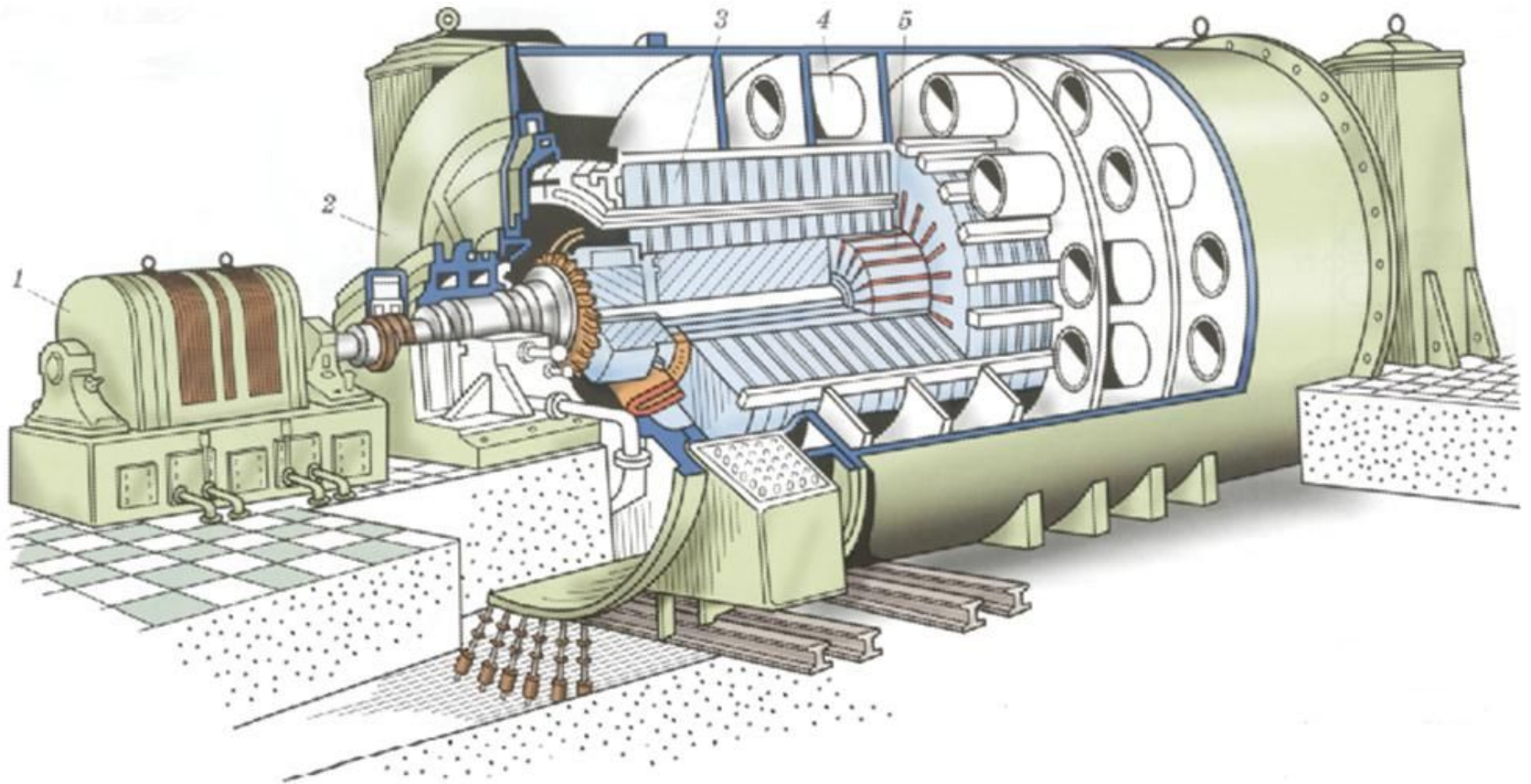
на ТЭС - 800 -1200 МВт

Дизель-генератор



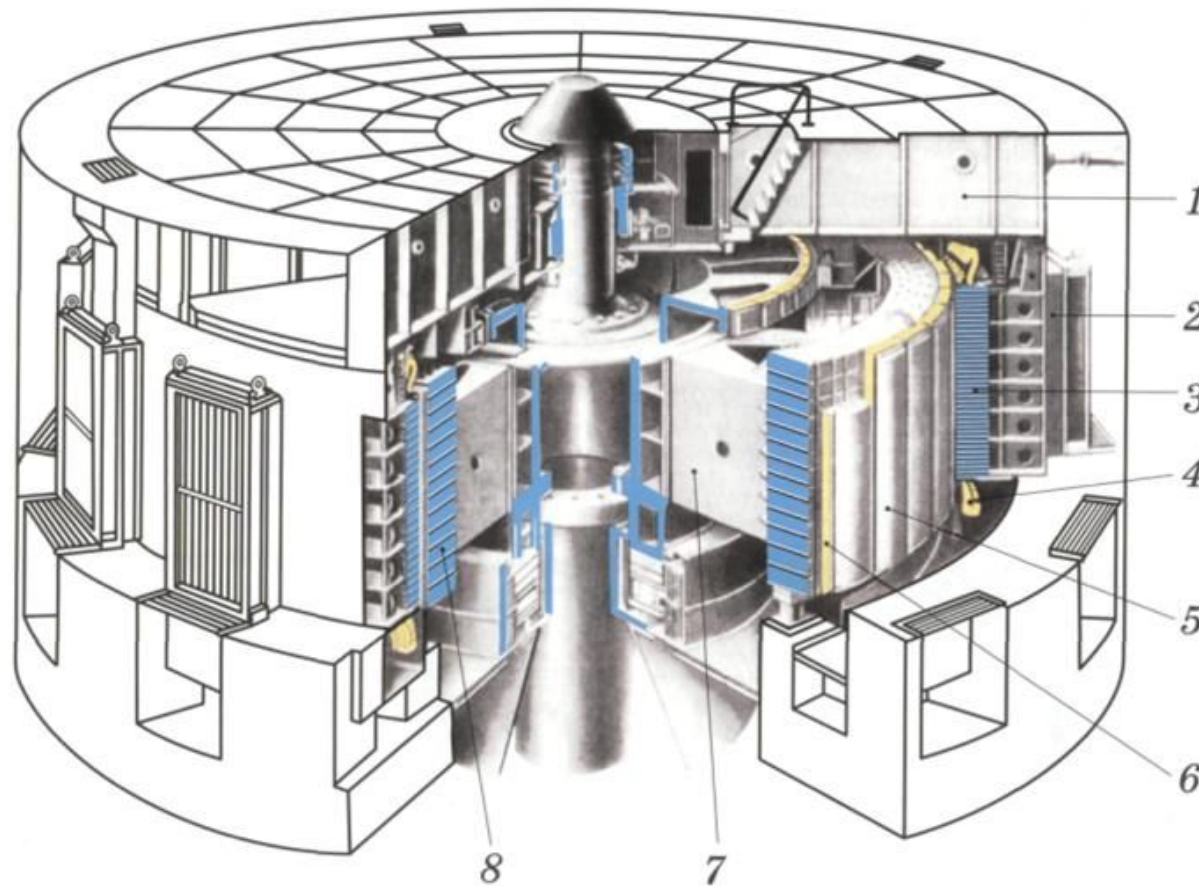
1 - возбудителя, 2 - обмотки возбуждения возбудителя, 3 - контактных колец, 4 - щеткодержателей, 5 - подшипниковых щитов, 6 - сердечника статора, 7 - полюсного наконечника, 8 - станины, 9 - обмотки статора, 10 - обмотки возбуждения полюсов ротора, 11 - остова, 12 - вала, 13 - выводов, 14 - подшипника

Турбогенератор

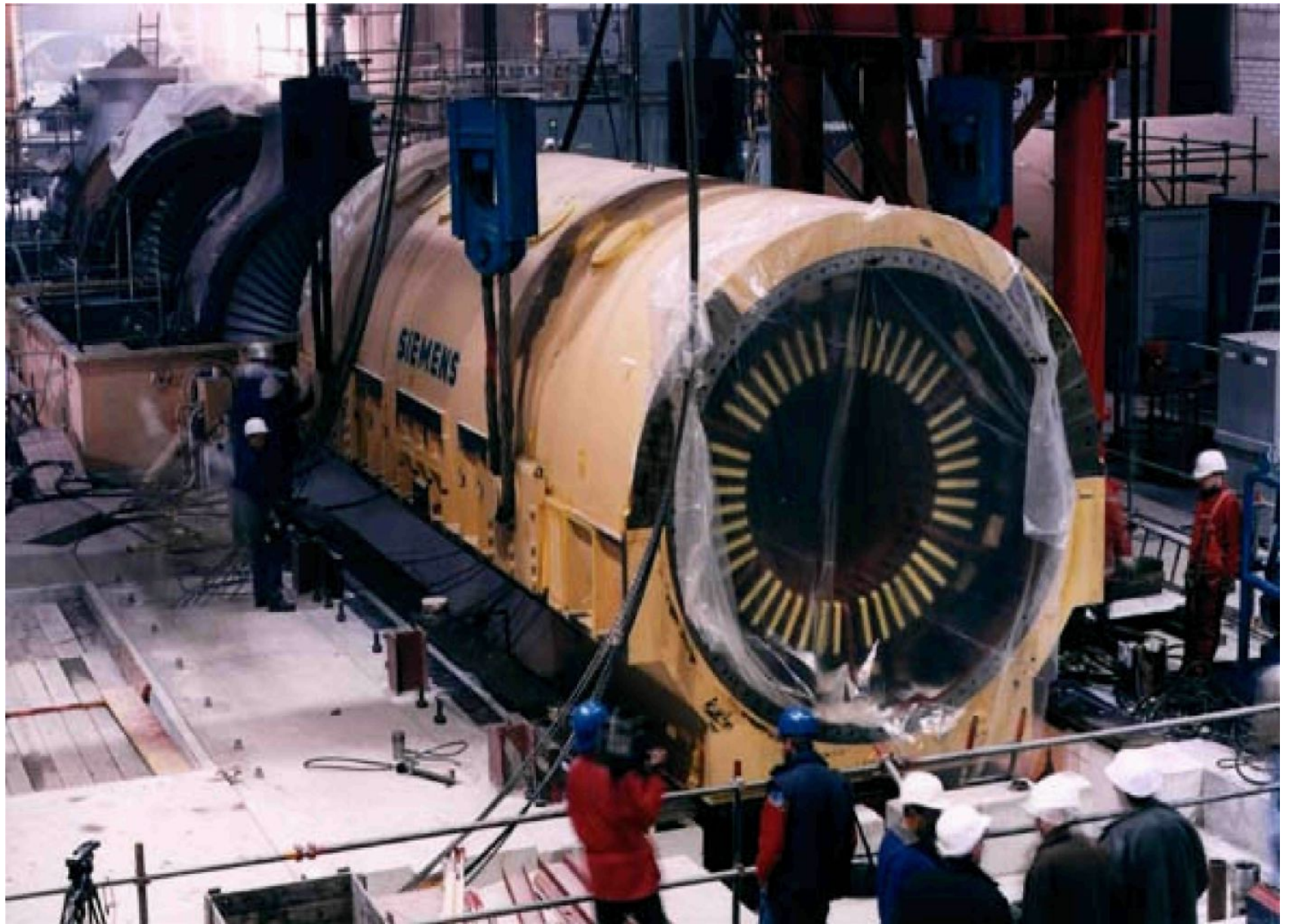


1 - возбудитель 2 - корпуса, 3 - сердечника статора, 4 - секций водородного охлаждения, 5 - ротора.

ГИДРОГЕНЕРАТОР



1 - грузонесущие крестовины, 2 - корпус статора, 3 – сердечник статора, 4 - обмотки статора, 5 - полюса ротора, 6 – обмотки ротора, 7 - спицы ротора, 8 - обод ротора.









Соединения обмоток генераторов или трансформаторов

Линейными напряжениями

называются напряжения между

фазами (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA})

Фазными напряжениями

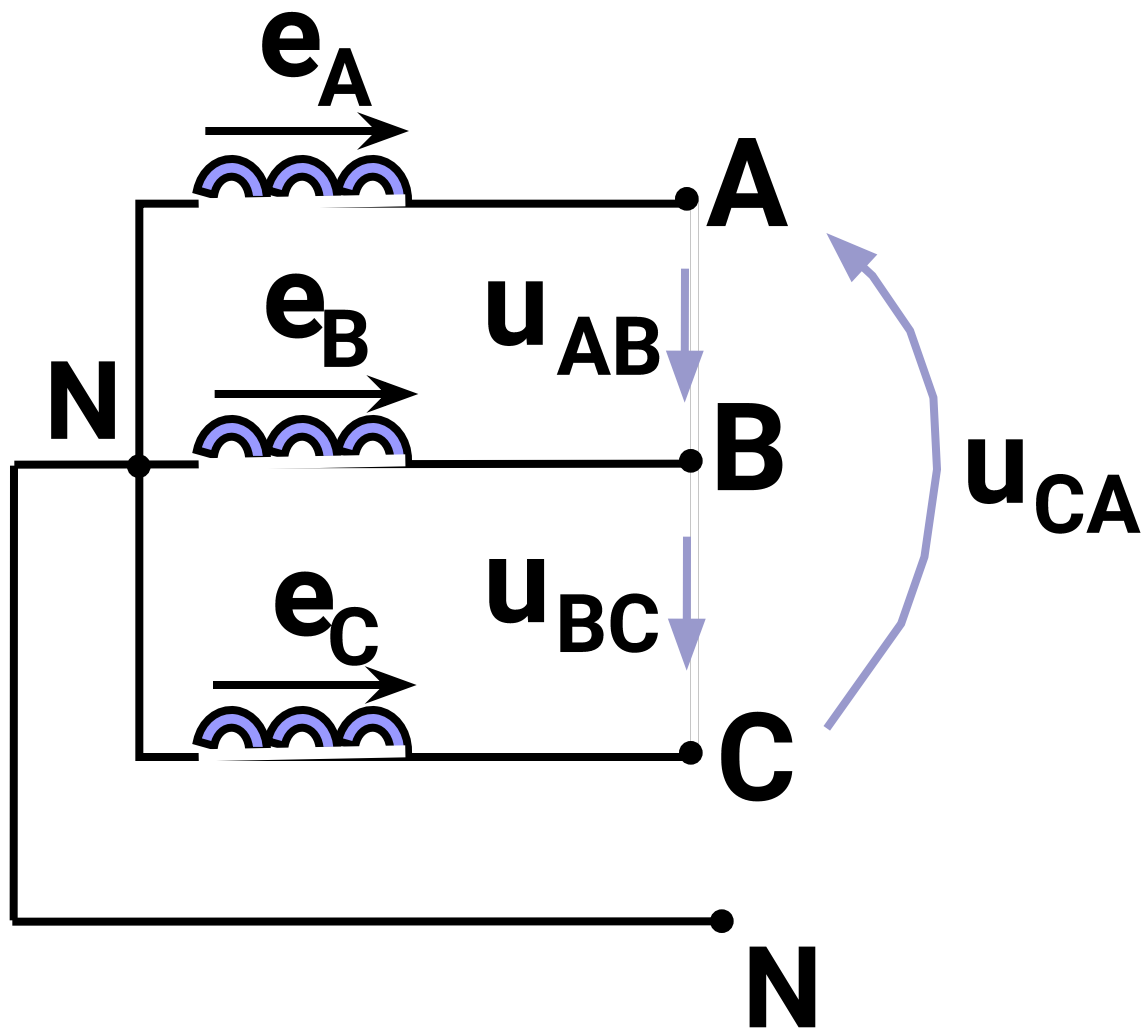
называются напряжения между

началом фаз (A, B, C,) и

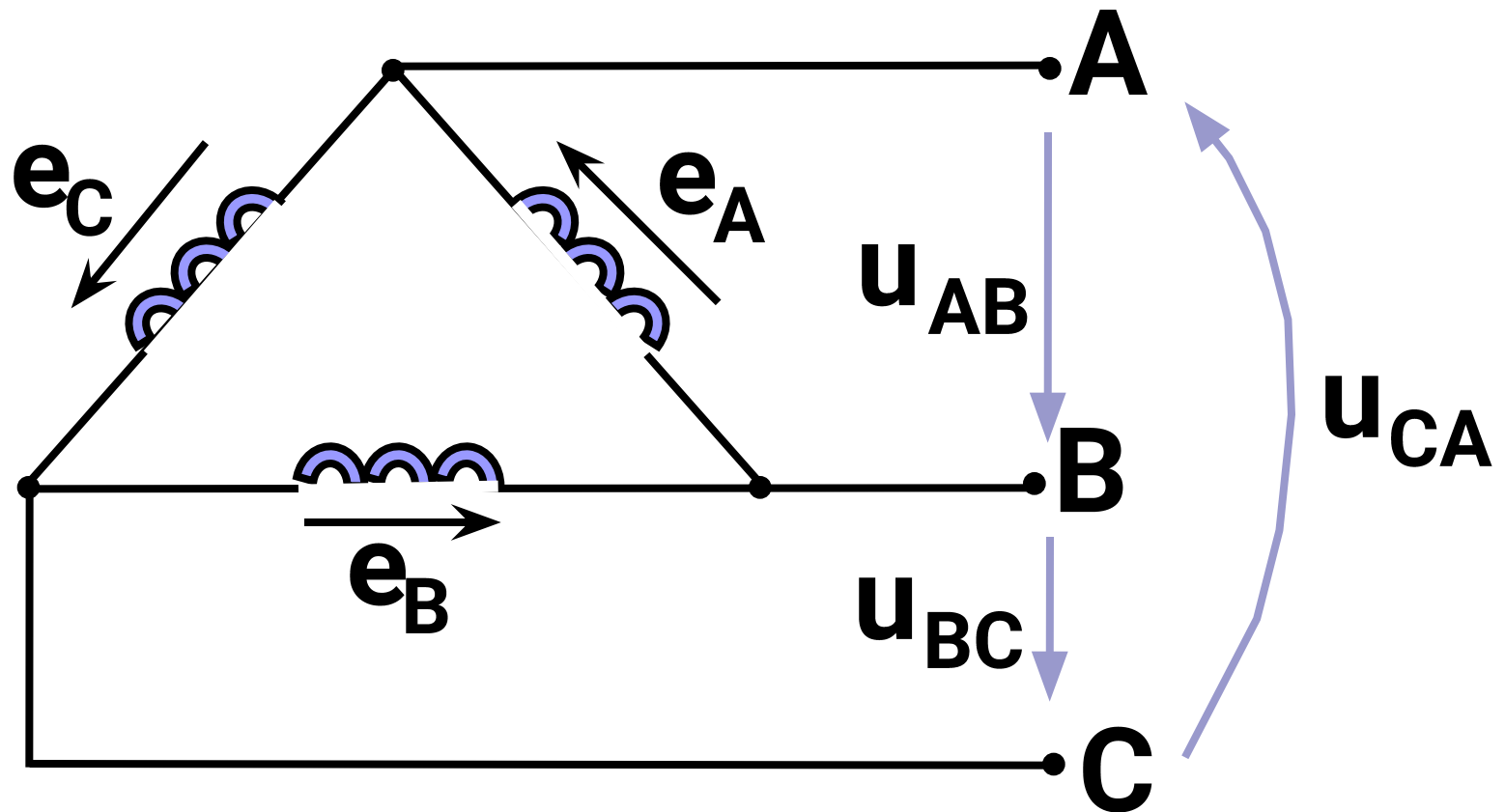
нейтральной точкой N

(U_A , U_B , U_C)

а) звездой:



б) треугольником:



В нормальном режиме фазные ЭДС генераторов и трансформаторов образуют симметричную систему, т.е. имеют одинаковую гармоническую форму, одинаковые частоту и амплитуду и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120 градусов

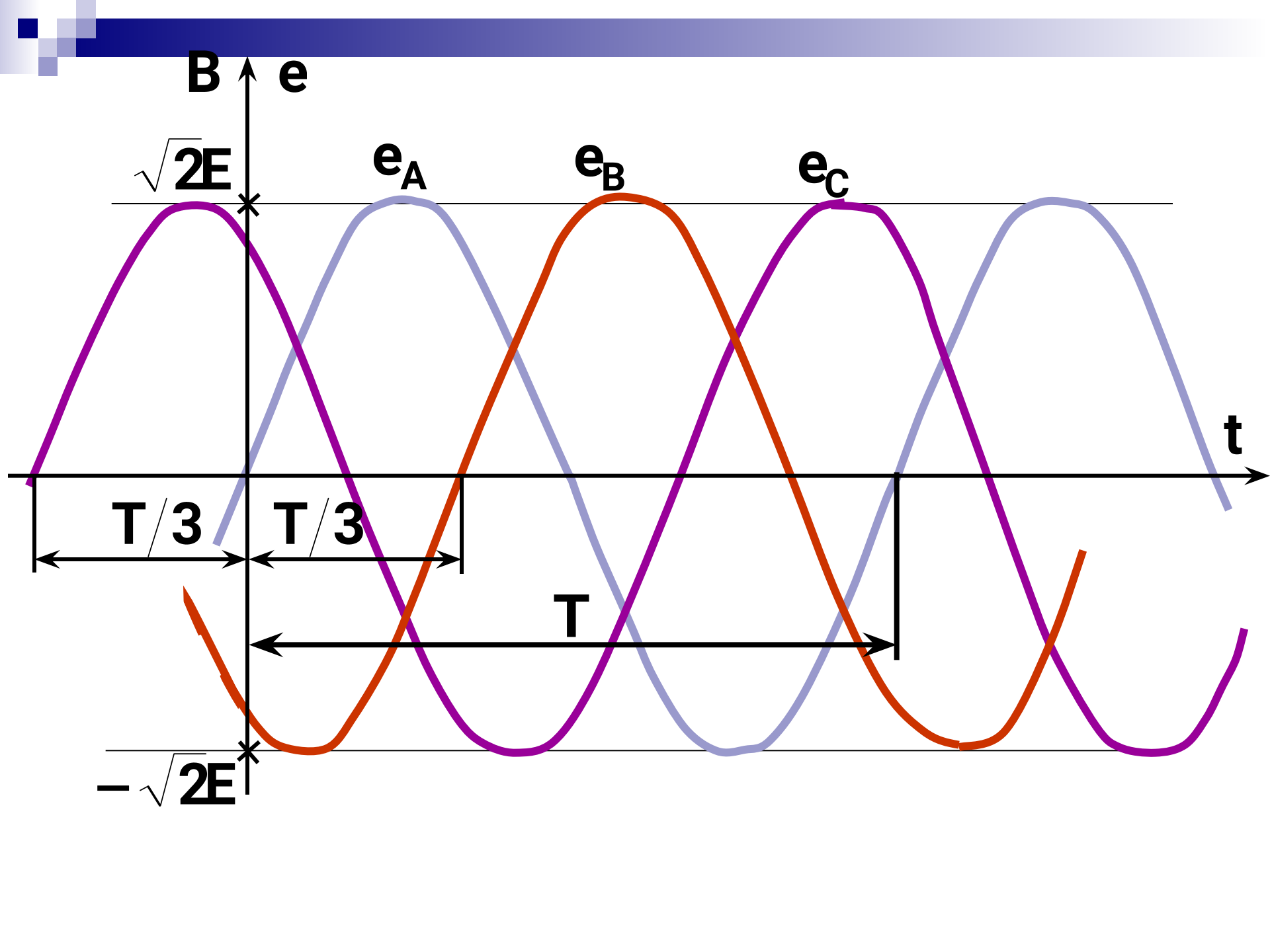

$$\mathbf{e_A} = \sqrt{2E} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\mathbf{e_B} = \sqrt{2E} \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ)$$

$$\mathbf{e_C} = \sqrt{2E} \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ)$$



Волновая диаграмма при $\alpha = 0$

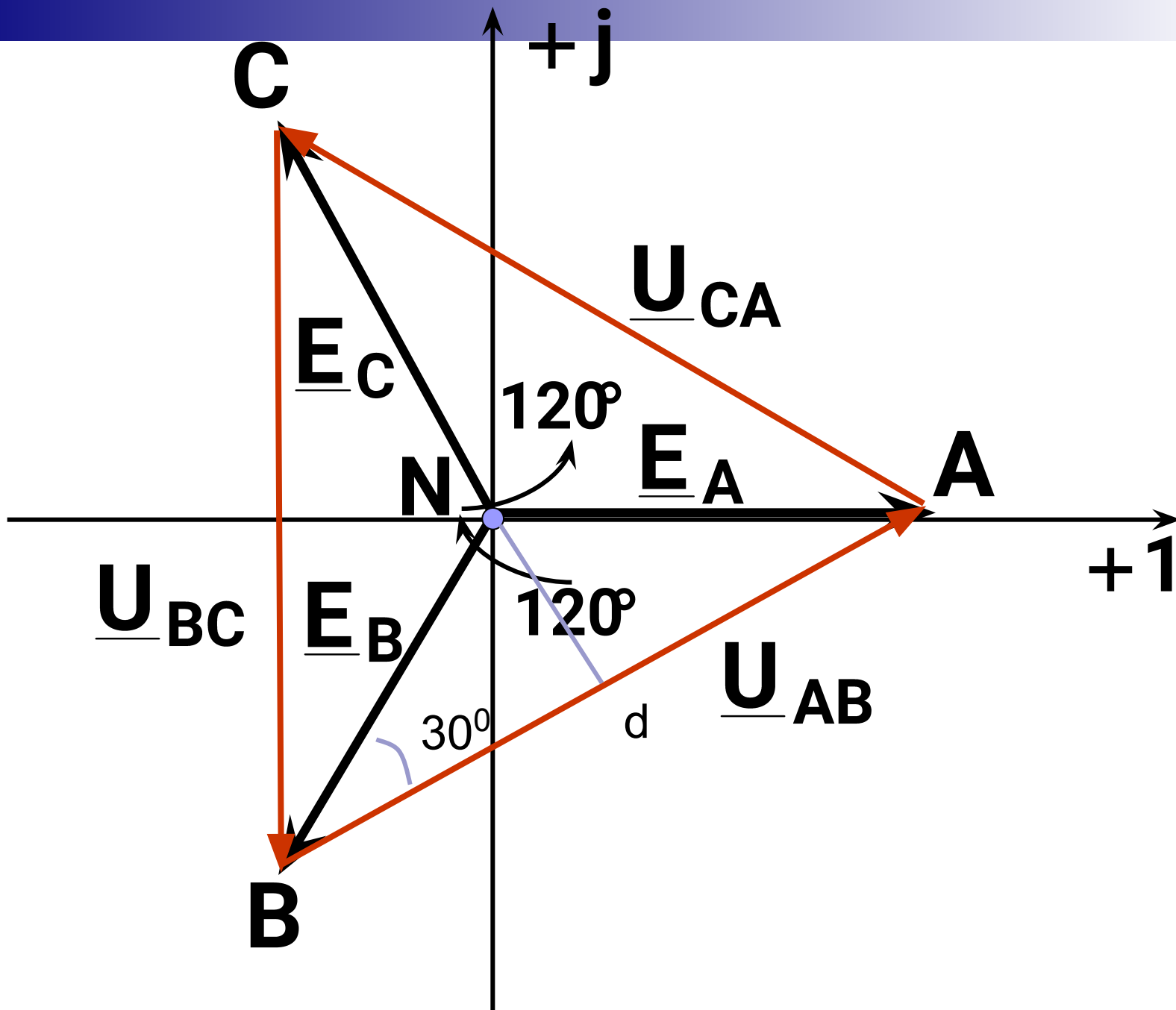


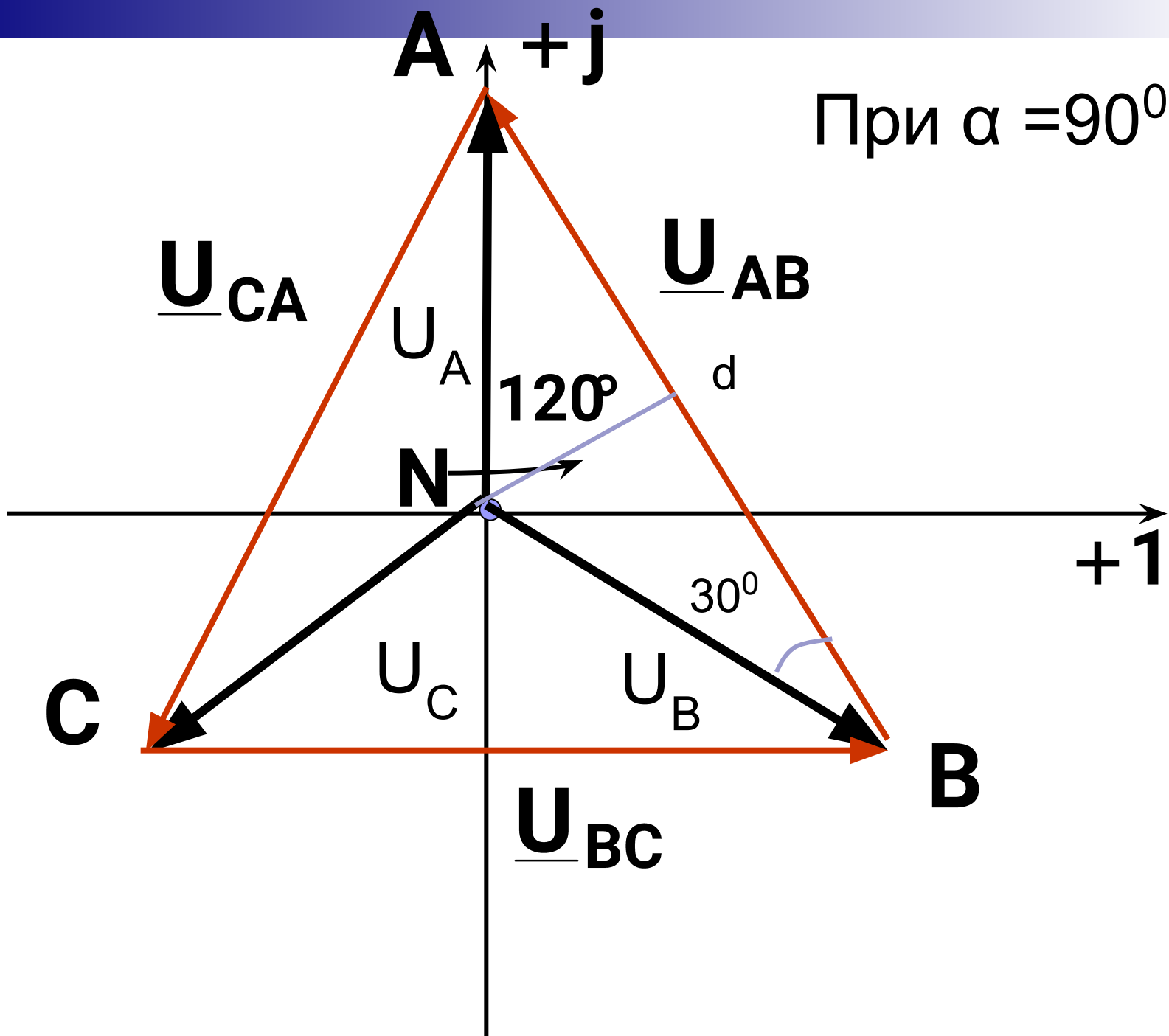
Векторная диаграмма при $\alpha = 0$

$$\underline{E}_A = E \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$\underline{E}_C = E \cdot e^{j120^\circ}$$





Соотношение между линейными и фазными напряжениями

$$\frac{1}{2}U_{AB} = U_A \cos 30^\circ \quad \text{или}$$

$$U_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{2} \cdot U_A = \sqrt{3} \cdot U_A$$

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



ЛИНЕЙНОЕ НАПРЯЖЕНИЯ
ОПЕРЕЖАЮТ ФАЗНЫЕ
НАПРЯЖЕНИЯ НА УГОЛ 30°

Линейные напряжения:

$$u_{AB} = e_A - e_B = \sqrt{2}\sqrt{3}E \sin(\omega t + \alpha + 30^\circ)$$

$$u_{BC} = e_B - e_C = \sqrt{2}\sqrt{3}E \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ)$$

$$u_{CA} = e_C - e_A = \sqrt{2}\sqrt{3}E \sin(\omega t + \alpha + 150^\circ)$$


Где:

$$\underline{U}_{AB} = U_{л} \cdot e^{j(\alpha+30^\circ)}$$

$$\underline{U}_{BC} = U_{л} \cdot e^{j(\alpha-90^\circ)}$$


$$\underline{U}_{CA} = U_{л} \cdot e^{j(\alpha+150^\circ)}$$

- комплексы действующих значений



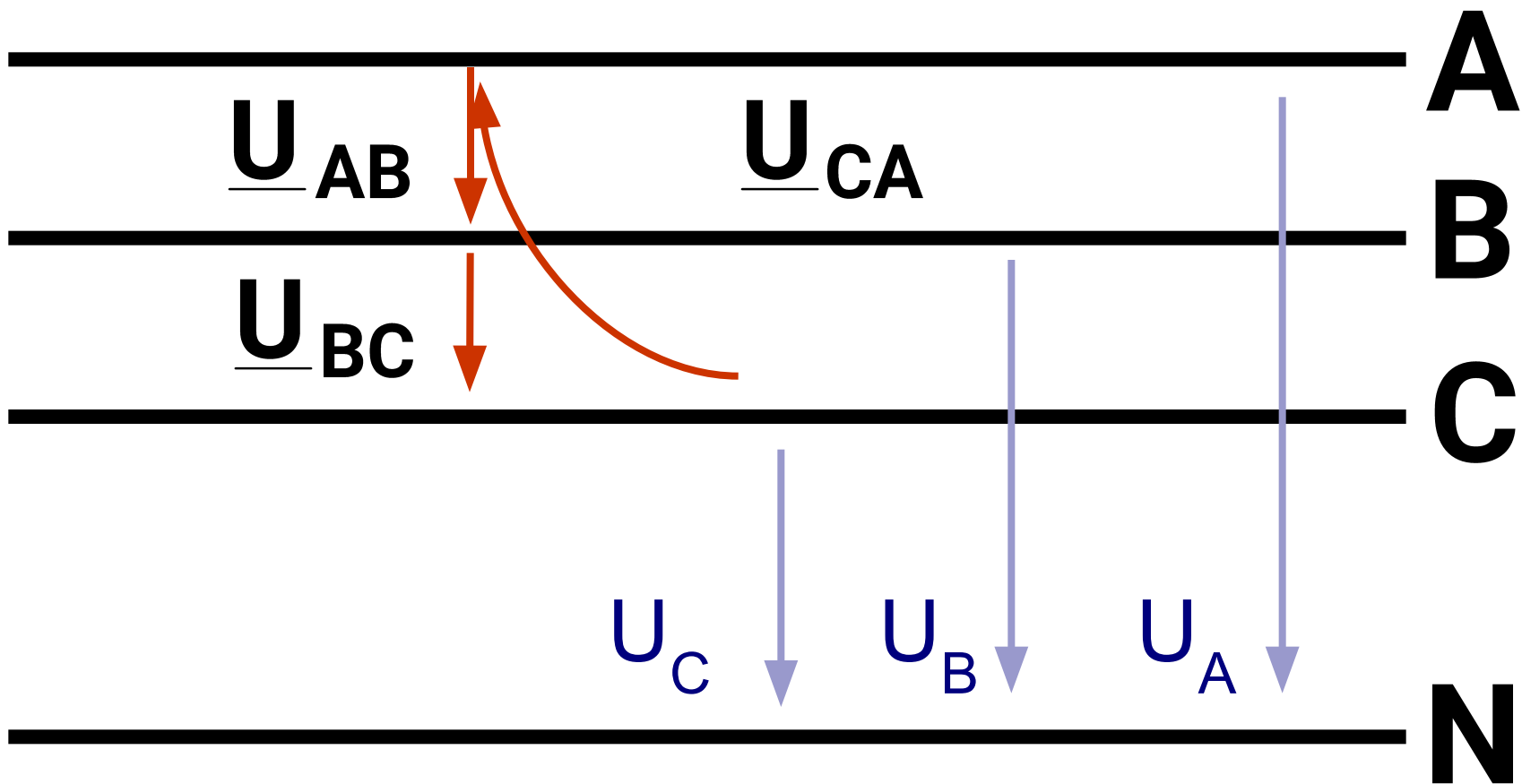
Линейными проводами называются
провода отходящие от начала фаз
генератора

Нейтральным проводом (нейтраль)
называется провод, отходящий от
объединенных концов обмоток фаз
генератора



**Линейные напряжения- это
напряжения между линейными
проводами(фазами).**

**Фазные напряжения – это
напряжения между линейными
проводами (фазами) и нейтральным
проводом**



Фазовый оператор

$$a = 1e^{j120^\circ} = -0,5 + j0,866$$

Тогда

$$\begin{aligned} \mathbf{a^2} &= \mathbf{1e^{j240^\circ}} = \mathbf{1e^{-j120^\circ}} = \\ &= \mathbf{-0,5 - j0,866} \end{aligned}$$


$$a^3 = 1e^{j360^\circ} = 1$$

**Таким
образом**

$$1 + a + a^2 = 0$$

В результате фазные напряжения

$$\underline{E}_A = E \cdot e^{j\alpha}$$

$$\underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A$$

$$\underline{E}_C = a \underline{E}_A$$

В результате линейные напряжения

$$\underline{U}_{AB} = U_{л} \cdot e^{j(\alpha+30^\circ)}$$

$$\underline{U}_{BC} = a^2 \underline{U}_{AB}$$

$$\underline{U}_{CA} = a \underline{U}_{AB}$$

Фазные напряжения

$$\begin{cases} \underline{U}_A = U_\phi \cdot e^{j\beta} \\ \underline{U}_B = a^2 \cdot \underline{U}_A \\ \underline{U}_C = a \cdot \underline{U}_A \end{cases}$$

Линейные напряжения

$$\begin{cases} \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_L \cdot e^{j\lambda} \\ \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = a^2 \cdot \underline{U}_{AB} \\ \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = a \cdot \underline{U}_{AB} \end{cases}$$

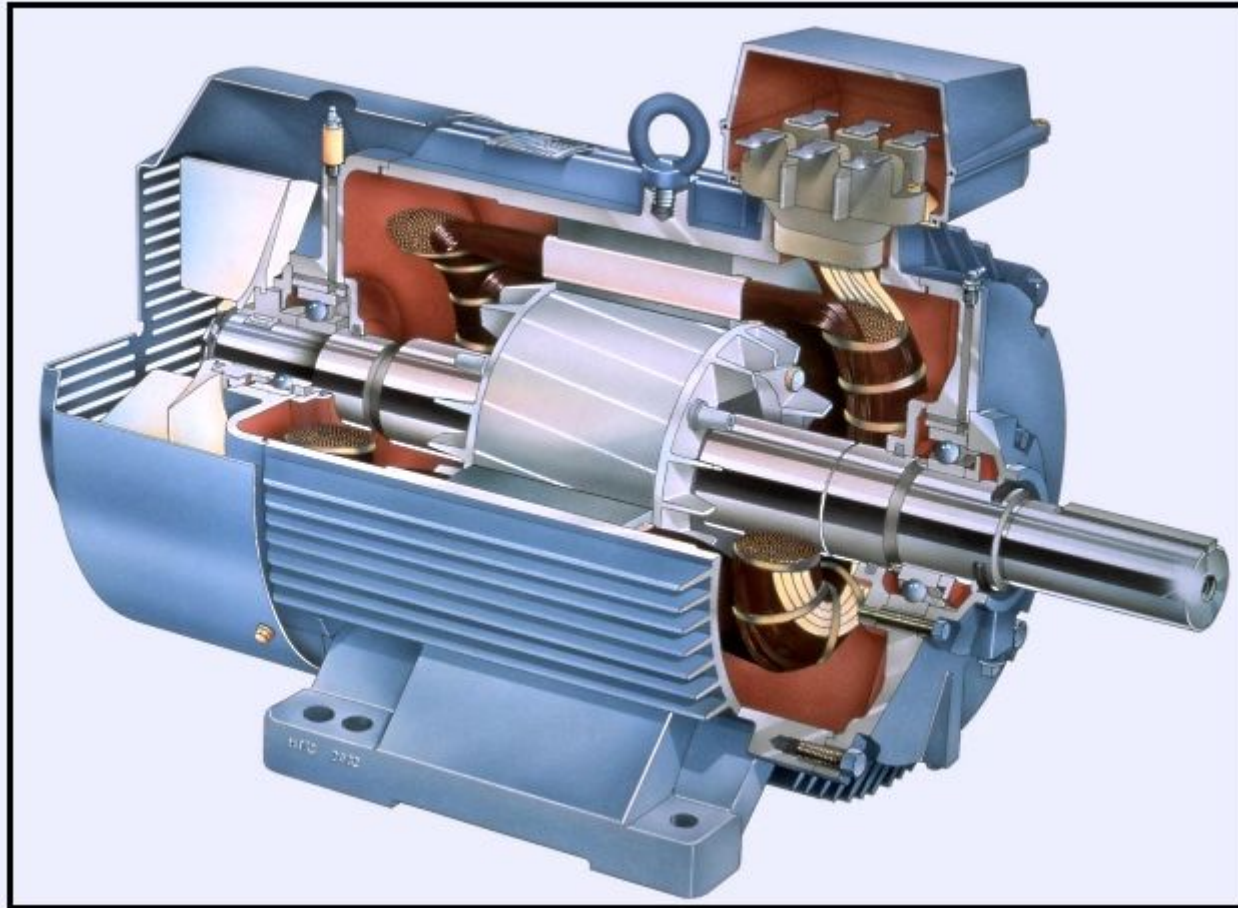
$$U_L = \sqrt{3}U_\phi$$

Классификация приемников

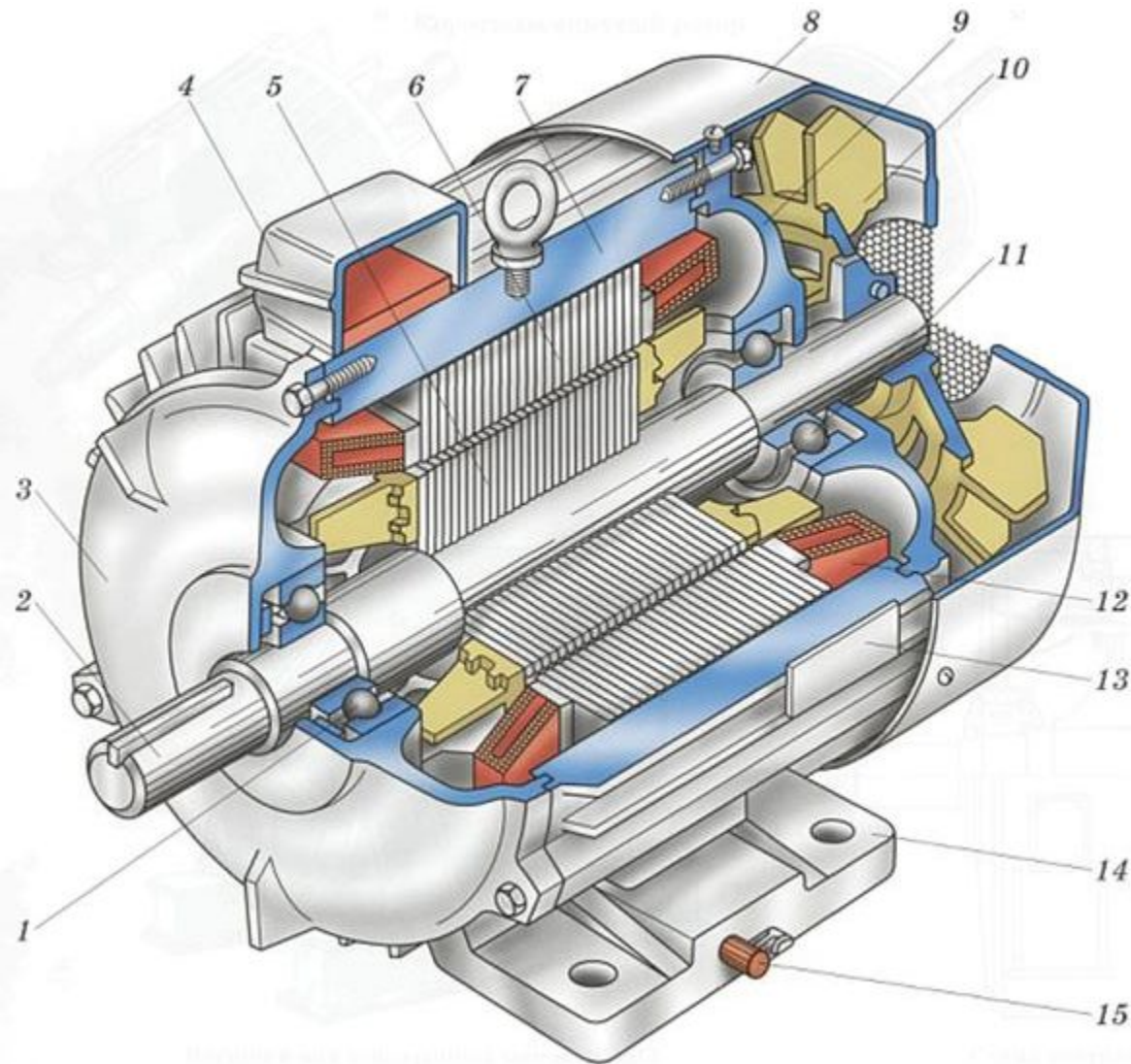
Приемники, включаемые в трехфазную цепь могут быть:

- трехфазными
- однофазными
- двухфазными

Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

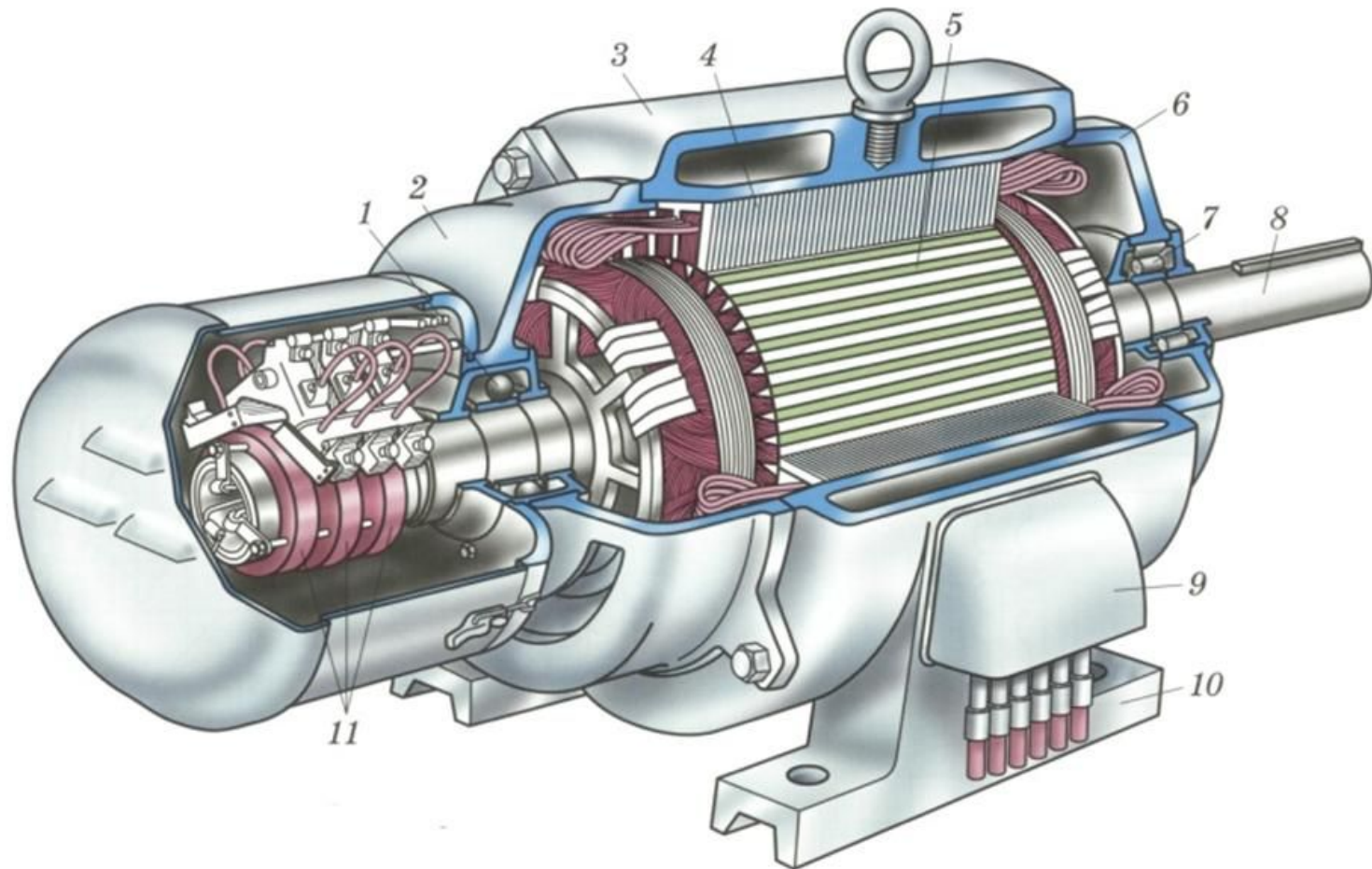


Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором



1 - подшипник 2 - вал 3 - подшипниковый щит 4 - коробка выводов 5 - сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой 6 - сердечник статора с обмоткой 7 - корпус 8 - кожух вентилятора 9 - подшипниковый щит 10 - вентилятор 11 - подшипник 12 - обмотка статора 13 - табличка с паспортными данными 14 - лапы 15 - болт заземления

Асинхронный двигатель с фазным ротором



1,7 - подшипники 2,6-подшипниковые щиты 3 - корпус 4-сердечник статора с обмоткой 5-сердечник ротора с обмоткой 8-вал 9 - коробка выводов 10-лапы 11-контактные кольца

1ф двигатель

3ф кабель

A

B

C

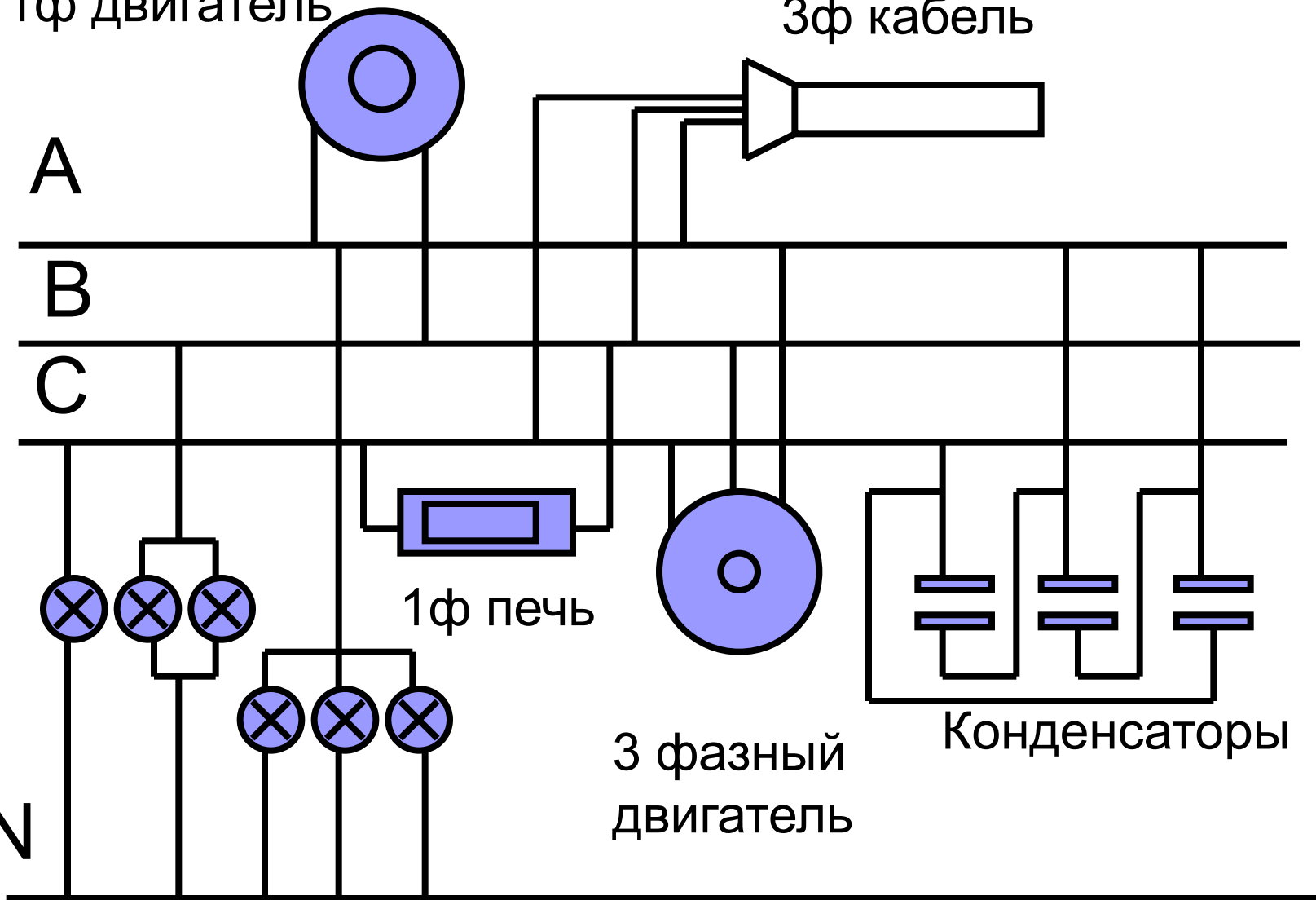
N

1ф освещение

1ф печь

3 фазный
двигатель

Конденсаторы



ТИПЫ НАГРУЗОК

Симметричная нагрузка, соединенная:

Звездой

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z e^{j\varphi}$$

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$$

Треугольником

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = Z e^{j\varphi}$$

$$Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z$$

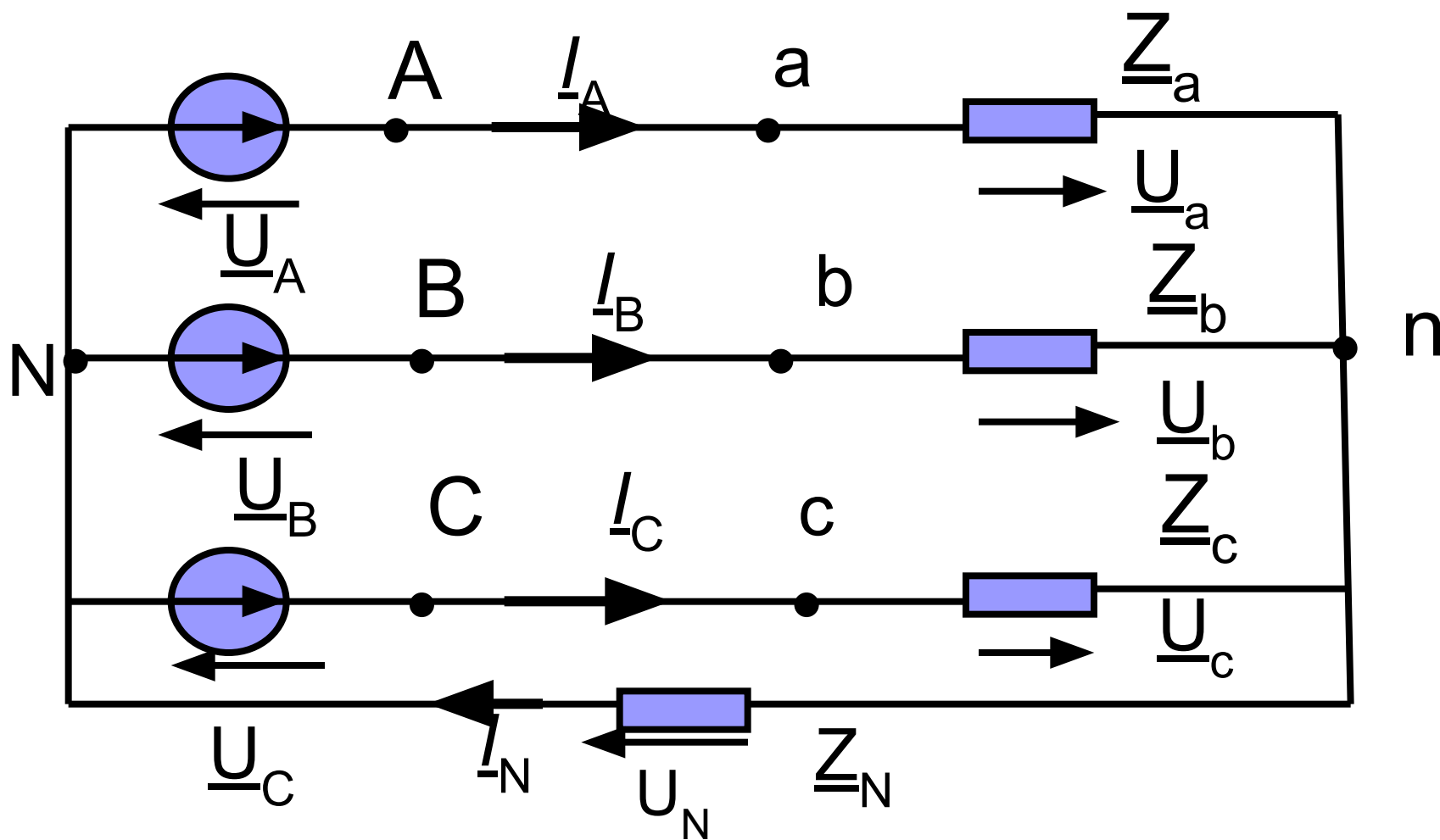
$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi$$



Трёхфазная цепь с несимметричной нагрузкой

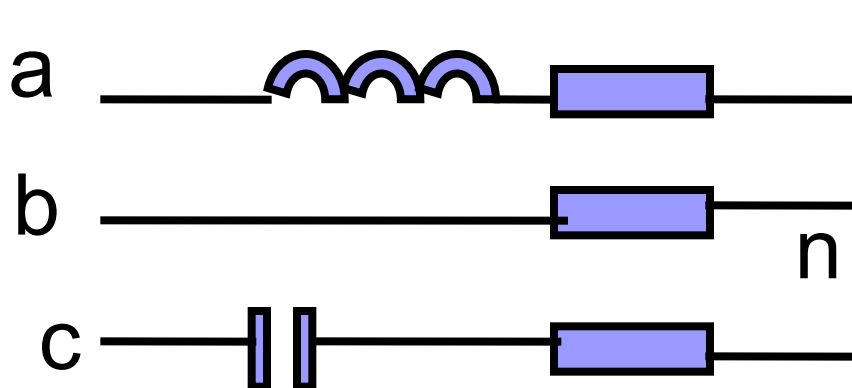
Нагрузка соединена звездой с нулевым проводом.

СХЕМА



Исходные условия

- Напряжения(Э.Д.С.) источника симметричны
- Нагрузка (приемники) несимметричны $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$



$$\underline{Z}_a = Z_a e^{j\varphi_a}$$

$$\underline{Z}_b = Z e^{j0}$$

$$\underline{Z}_c = Z e^{j\varphi_c}$$

Расчет цепи при $Z_N = 0$

Фазные напряжения источника и нагрузки равны


$$\underline{U}_A = \underline{U}_a ; \underline{U}_B = \underline{U}_b ; \underline{U}_C = \underline{U}_c$$

Токи в фазах нагрузки различны

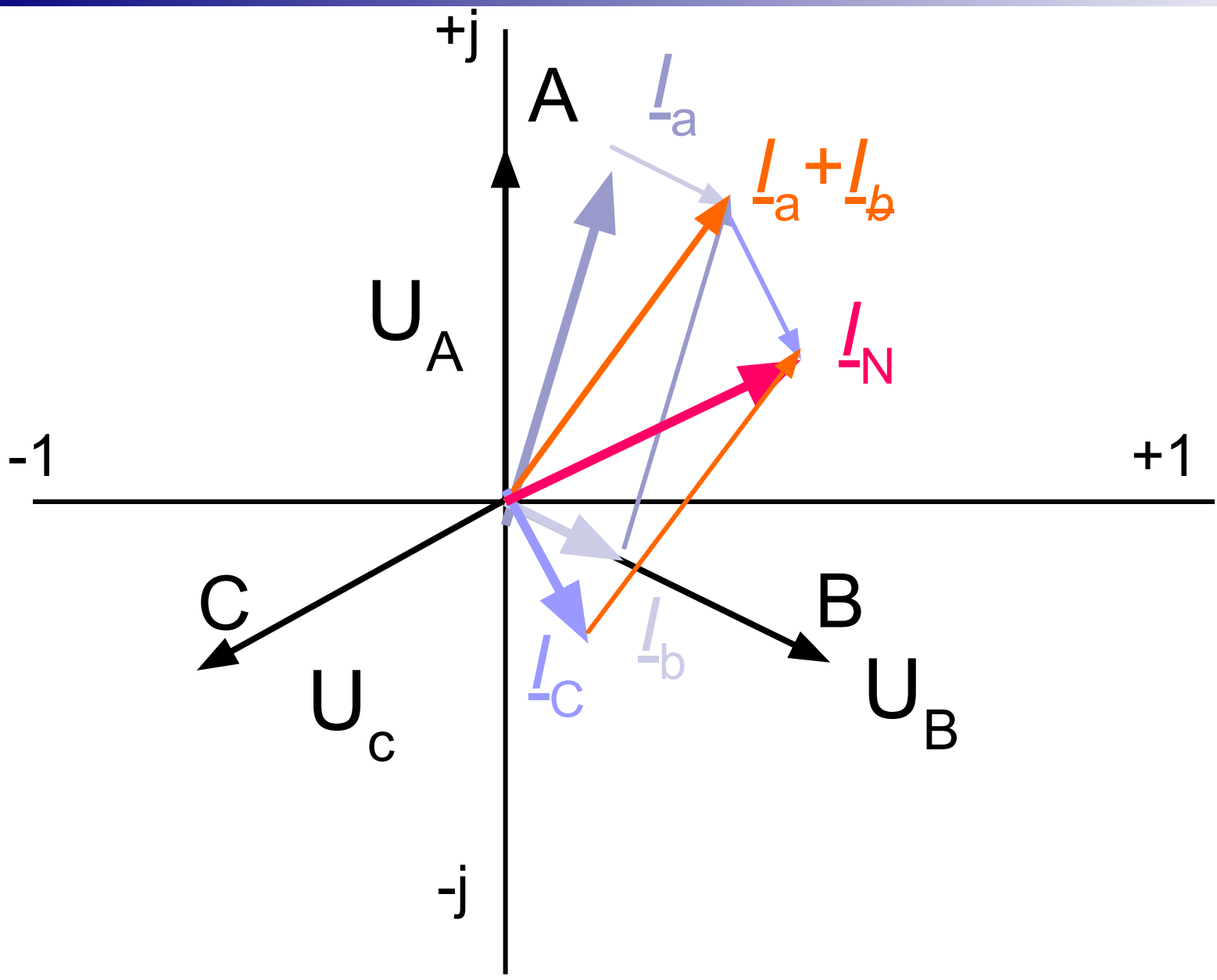
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}$$

Алгебраическая сумма токов в фазах нагрузки
равна току в нейтральном проводе

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




Векторная диаграмма



В этом случае напряжения на фазах нагрузки симметричны, токи в фазах различны как по модулю, так и по углу, а в нейтральном проводе появился ток.

Таким образом, роль нейтрального провода – выравнивать напряжение на фазах нагрузки



При $Z_N = 0$ расчет токов и напряжений в фазах нагрузки можно проводить отдельно на каждой фазе, т.к. изменение тока в одной фазе не влияет на токи в других фазах, а изменяется только ток в нейтральном проводе.

Расчет цепи при $Z_N \neq 0$

В этом случае напряжения на фазах различные

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N$$

Соответственно рассчитываем токи

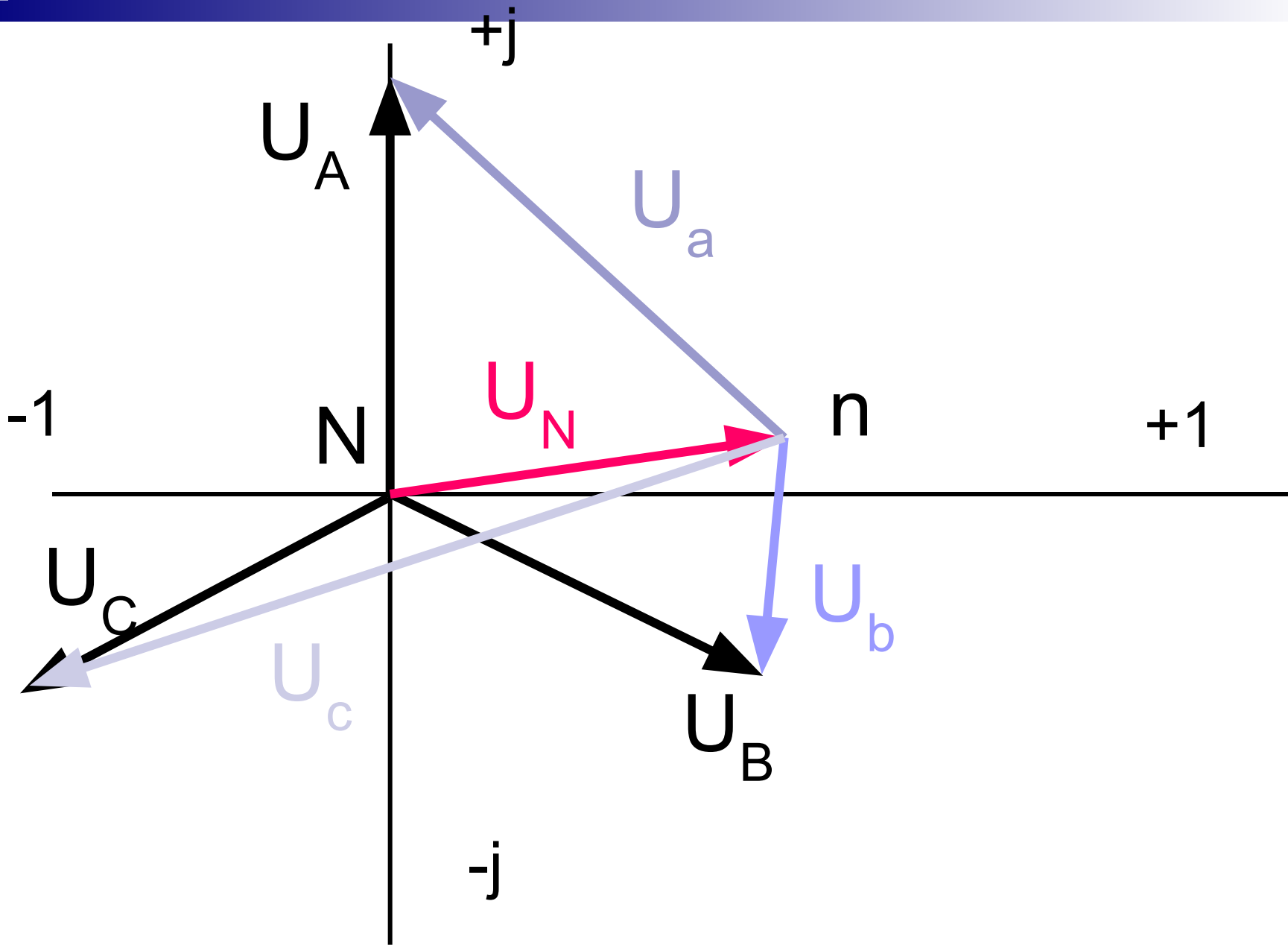
$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}$$


$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_N}{\underline{Z}_N}$$

Векторная диаграмма

$$\underline{z}_N \neq 0$$


$$U_N \neq 0$$





При наличии сопротивления
в нейтральном проводе
напряжения на фазах
существенно различаются, что
приводит к нарушению питания
потребителей.

В нейтральный провод нельзя
включать предохранители,
выключатели и т.д.



Соединение несимметричных приемников треугольником

Схема соединения нагрузки с источником

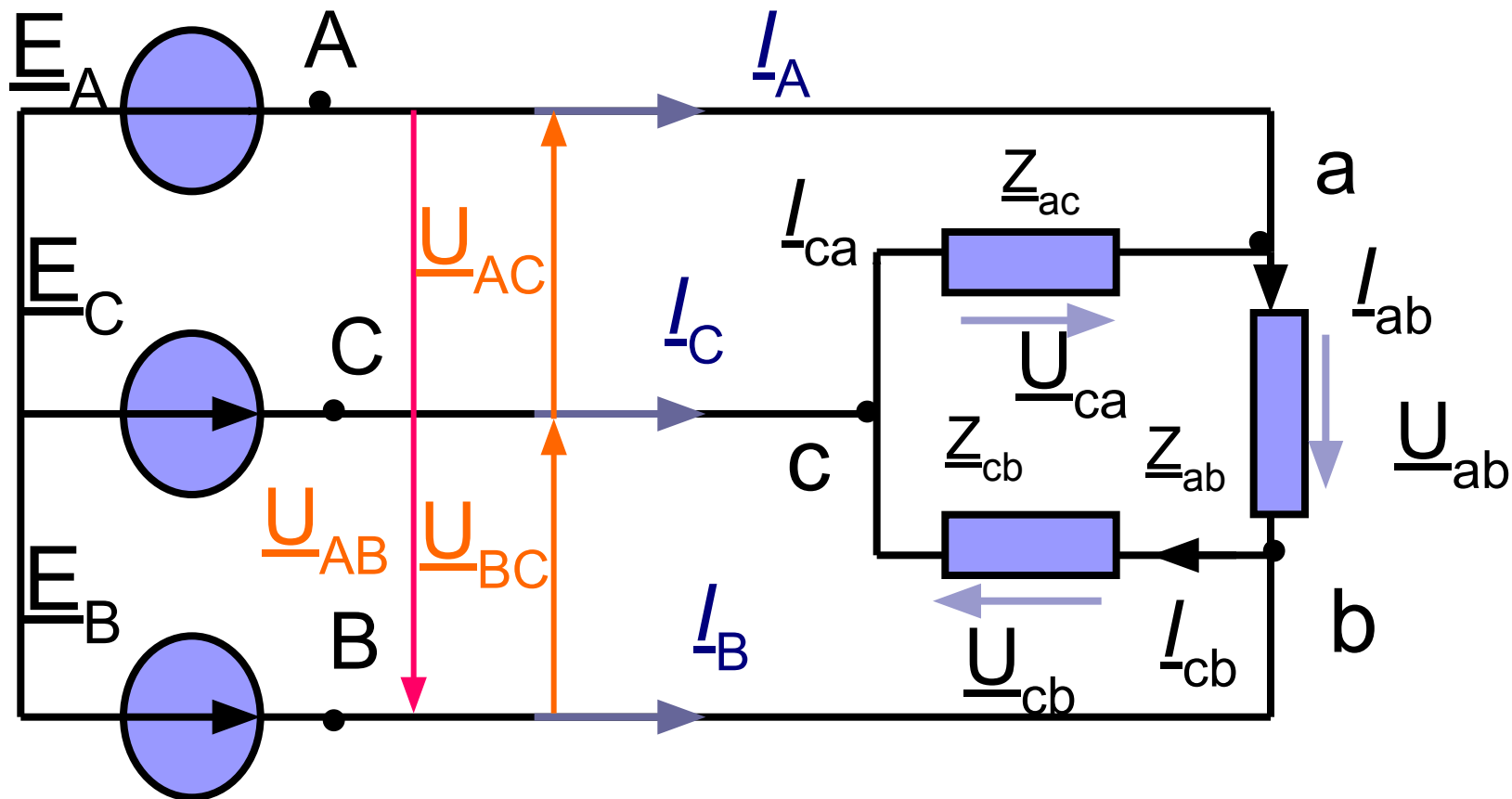
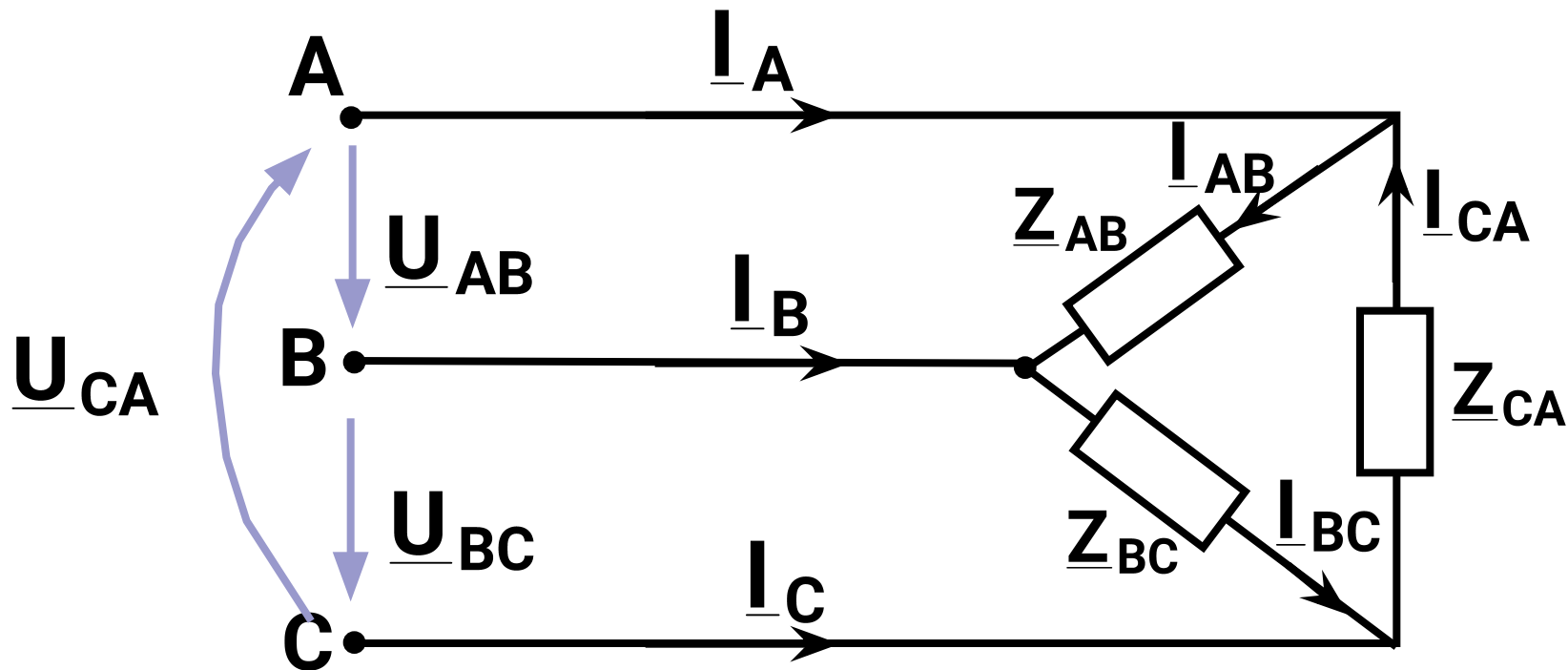


Схема соединения нагрузки



Дано:

$$\underline{U}_{AB} = U_{л} e^{j\lambda}, \quad \underline{U}_{BC} = a^2 \underline{U}_{AB},$$

$$\underline{U}_{CA} = a \underline{U}_{AB},$$

$$\underline{Z}_{AB}, \quad \underline{Z}_{BC}, \quad \underline{Z}_{CA}$$

Определить:

а) фазные токи $\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$

б) линейные токи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$

По закону Ома:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}$$

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

По первому закону

Кирхгофа:

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

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

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

Сложение уравнений
дает сумму
линейных токов

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

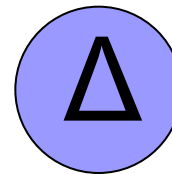
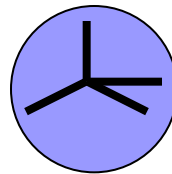
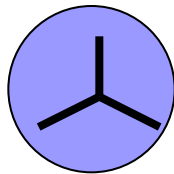
Независимо от характера нагрузки при соединении ее треугольником (Δ) алгебраическая сумма векторов линейных токов равна нулю.

Вывод: заведомо несимметричную нагрузку (если позволяет $U_{\text{НОМ}}$) целесообразно включать Δ

Выбор схемы соединения осветительной или силовой нагрузки в 3ф цепь

- Осветительную нагрузку всегда надо рассматривать как несимметричную
- Включение в цепь двигателей можно рассматривать как симметричную нагрузку

Известно 3 схемы соединения нагрузок: звезда, звезда с нулем, треугольник.

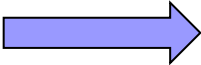
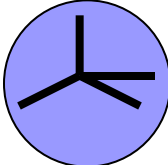


Для выбора схемы соединения необходимо знать следующее:

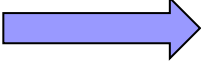
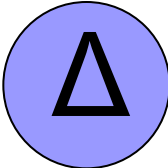
1. Характер нагрузки
2. Номинальное напряжение приемника
3. Номинальное напряжение сети

ПРИМЕРЫ

1. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если $U_{\text{л}} = 380\text{В}$, $U_{\text{н}} = 220\text{В}$.

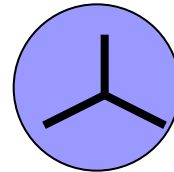
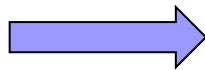
Ответ:  

2. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если $U_{\text{л}} = 380\text{В}$, $U_{\text{н}} = 380\text{В}$.

Ответ:  

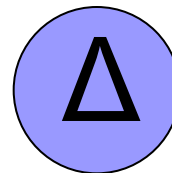
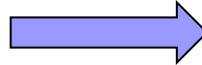
3. Определить схему соединения обмоток 3ф.двигателя, если: $U_{\text{л}} = 380\text{В}$, $U_{\text{н}} = 220\text{В}$.

Ответ:



4. Определить схему соединения обмоток 3ф.двигателя, если: $U_{\text{л}} = 380\text{В}$, $U_{\text{н}} = 380\text{В}$.

Ответ:



Мощность в трехфазной цепи

Мощность в трехфазной цепи

- Полная (комплексная) мощность в трехфазной цепи при несимметричных нагрузках определяется суммой комплексных полных мощностей каждой из фаз

- $$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C = P + jQ \quad [\text{ВА}]$$

- При симметричной трехфазной нагрузке:

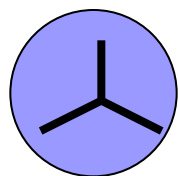
$$\underline{S} = 3 \underline{S}_\phi = 3(P_\phi + jQ_\phi)$$

ГДЕ P – активная составляющая мощности, измеряемая в [Вт],
а Q - реактивная составляющая мощности, измеряемая в [ВАР]

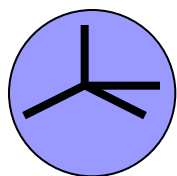
$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi \quad Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi$$

$$\underline{S} = 3 U_{\phi} \cdot I_{\phi} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

Известны соотношения U_L и U_Φ для различных схем соединения нагрузок

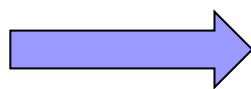
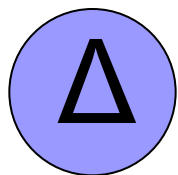


и



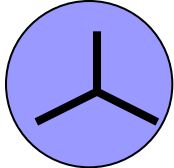
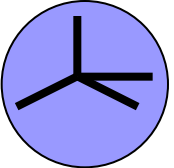
$$U_L = \sqrt{3}U_\Phi$$

$$I_L = I_\Phi$$

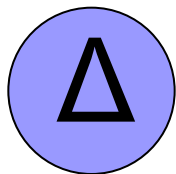


$$U_L = U_\Phi \quad I_L = \sqrt{3}I_\Phi$$


Тогда можем записать для симметричной нагрузки:

Для  и 


$$\underline{S} = \frac{3U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} I_{\text{Л}} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\Phi} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$



$$\underline{S} = \frac{3I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} U_{\text{Л}} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \sqrt{3} I_{\text{Л}} U_{\text{Л}} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

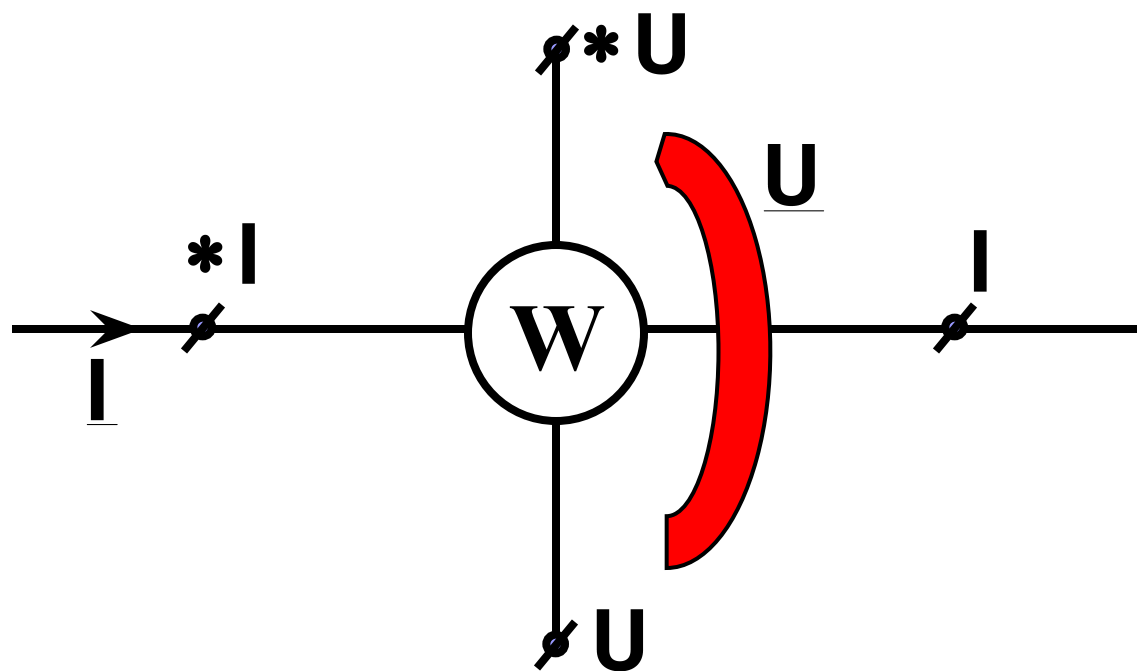


Измерение мощности в трехфазных цепях



**Измерение мощности
осуществляется
ваттметрами, которые имеют
две обмотки: токовую
обмотку с малым
сопротивлением и обмотку
напряжения с большим
сопротивлением**

- При этом ваттметр имеет четыре клеммы



Показание ваттметра:

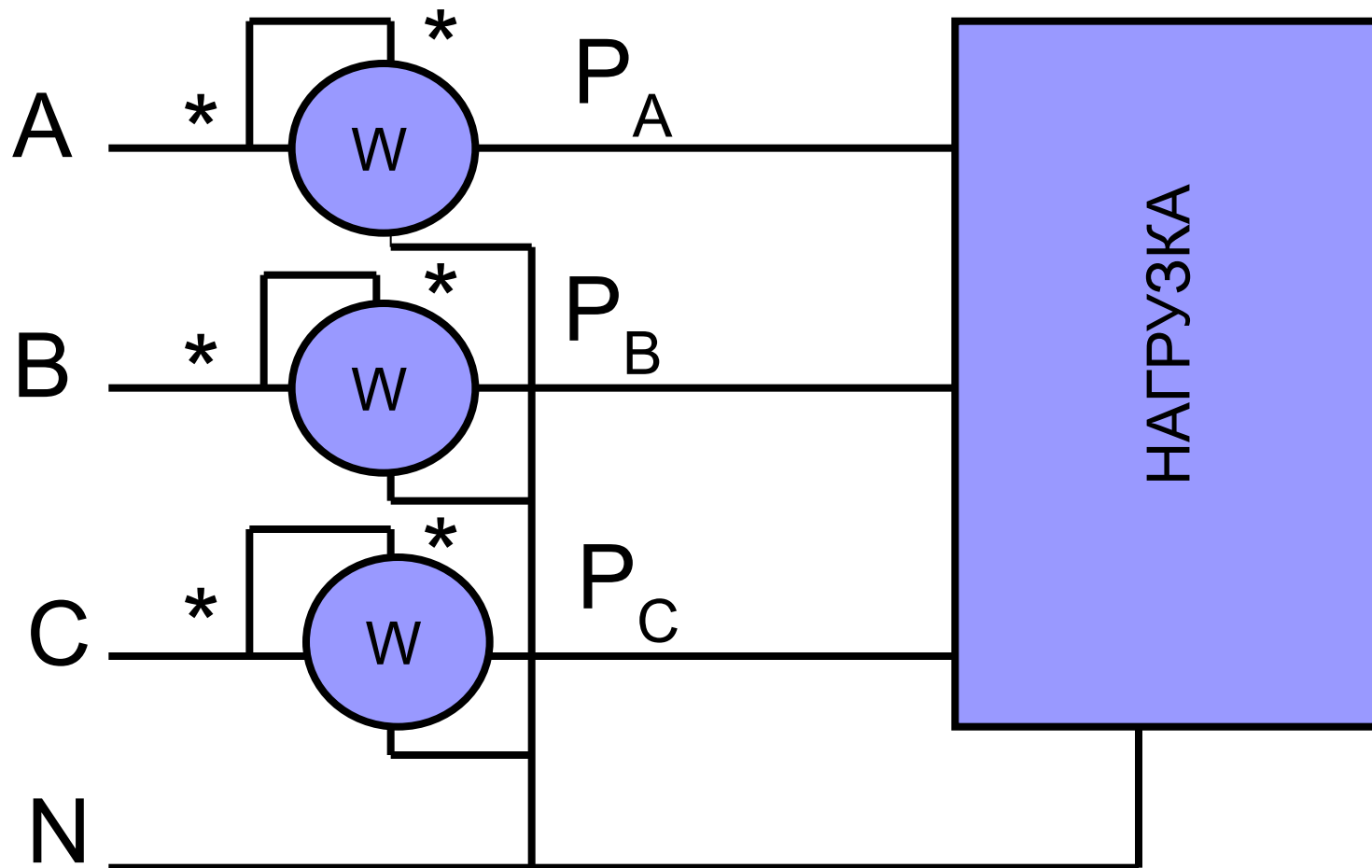
$$P_W = U \cdot I \cdot \cos\varphi, \text{ Вт}$$


где $\underline{I} = I \cdot e^{j\beta}, \text{ А}$

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\alpha}, \text{ В}$$

$$\varphi = \alpha - \beta, \text{ град}$$

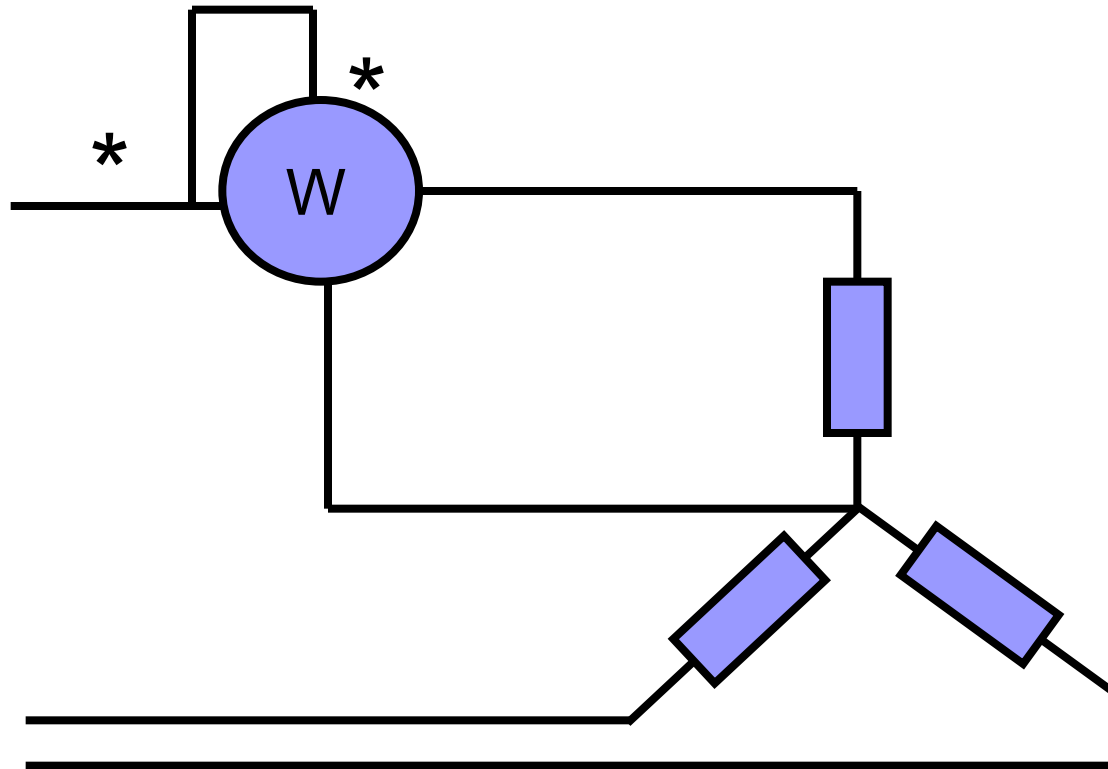
Измерение активной мощности в трехфазных цепях



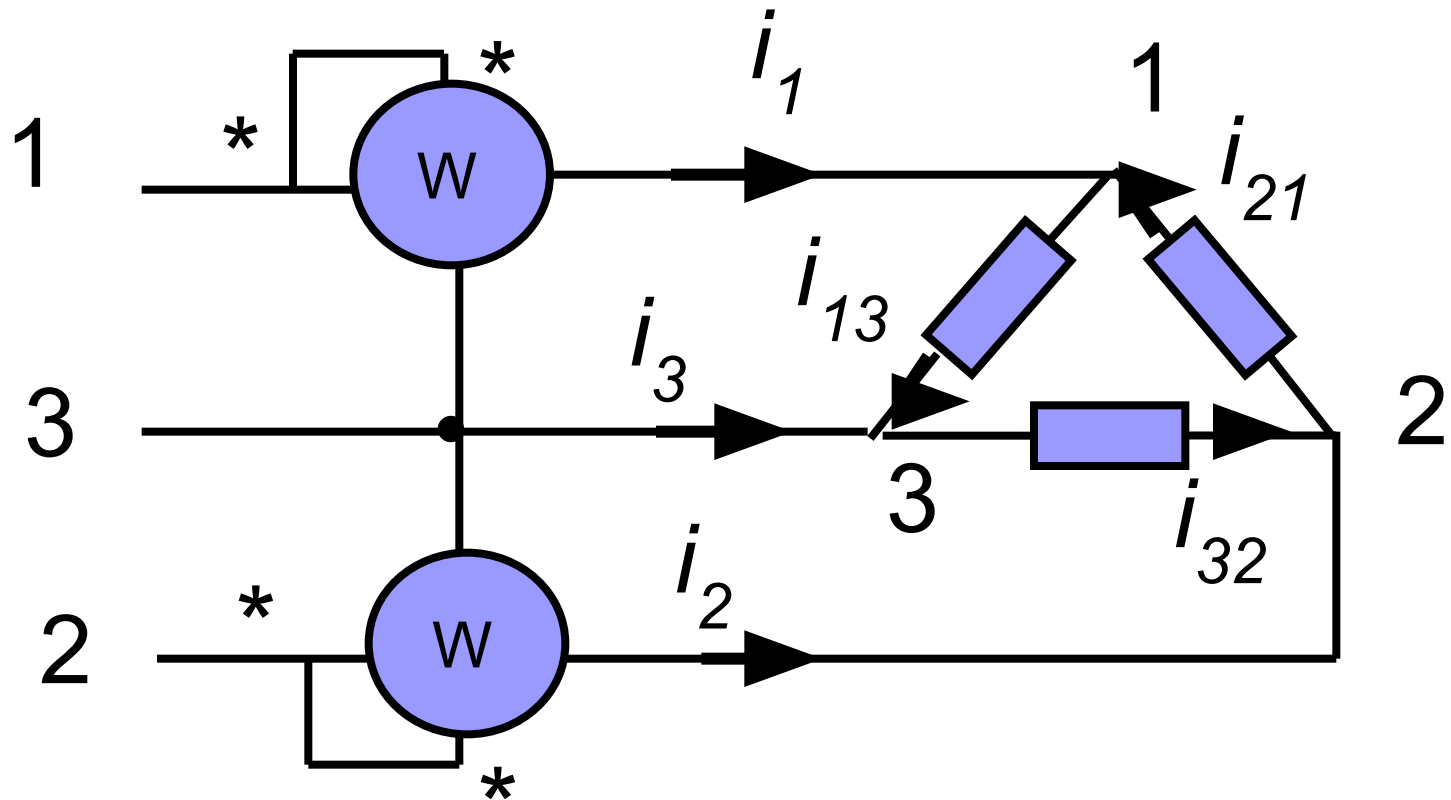



В любых 4 проводных цепях (схемы звезда с нулем) для измерения активной мощности можно использовать 3 ваттметра. По одному в каждой фазе. Сумма их показаний даст потребление активной мощности в цепи.

Для симметричной нагрузке можно использовать 1 ваттметр. Умножая его показания на 3, получим потребляемую мощность цепи.



Способ двух ваттметров





Измерение суммарной мощности 3х фазной цепи можно осуществить с использованием 2х ваттметров. Этот способ универсален и может применяться для любых схем соединения нагрузок

Показания 2х ваттметров:

$$P = P_1 + P_2 = i_1 U_{13} + i_2 U_{23}$$

Активная мощность цепи:

$$P = P_{21} + P_{32} + P_{13} = i_{21} U_{21} + i_{32} U_{32} + i_{13} U_{13}$$

По условию симметричного питания

$$U_{21} + U_{32} + U_{13} = 0 \quad U_{21} = -U_{32} - U_{13}$$

U_{kd} – это мгновенные значения напряжений в фазах нагрузки

Подставим в выражение мощности

$$\begin{aligned} P &= i_{21}(-U_{32} - U_{13}) + i_{32}U_{32} + i_{13}U_{13} = \\ &= U_{32}(i_{32} - i_{21}) + U_{13}(i_{13} - i_{21}) \end{aligned}$$

По первому закону Кирхгофа:

$$i_2 = i_{21} - i_{32} \quad i_1 = i_{13} - i_{21}$$

Тогда: $P = U_{32}(-i_2) + U_{13}i_1$

а т.к. $U_{23} = -U_{32}$, то

$$P = i_2 U_{23} + i_1 U_{13}$$

Рекомендуемая литература

- 1. Алтунин Б.Ю., Панкова Н.Г. Теоретические основы электротехники:** Комплекс учебно - методических материалов: Часть 1 / Б.Ю. Алтунин, Н.Г. Панкова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2007.-130 с.
- 2. Алтунин Б.Ю., Кралин А.А. Электротехника и электроника:** комплекс учебно-методических материалов: Ч.1/ Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2007.-98 с.
- 3. Алтунин Б.Ю., Кралин А.А. Электротехника и электроника:** комплекс учебно-методических материалов: Ч.2/ Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2008.-98 с
- 4. Касаткин, А.С. Электротехника** /А.С. Касаткин, М.В. Немцов.-М.: Энергоатомиздат, 2000.
- 5. Справочное пособие по основам электротехники и электроники** /под. ред. А.В. Нетушила.-М.: Энергоатомиздат, 1995.
- 6. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники.**-3-е изд., перераб. И доп.-М.: Радио и связь, 1990.-512 с.: ил.
- 7. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника:** учебник / О. П. Новожилов. – М.: Гардарики, 2008. – 653 с.

Тема 6.3 Закончена

Благодарю за внимание