

Лекция 2

Краткое содержание

Глава 4. Трехфазные цепи синусоидального тока

4.4. Способы соединения генератора и нагрузки

4.5. Расчет трехфазных цепей

4.6. Мощность трехфазной цепи

4.7. Измерение мощности в трехфазных цепях

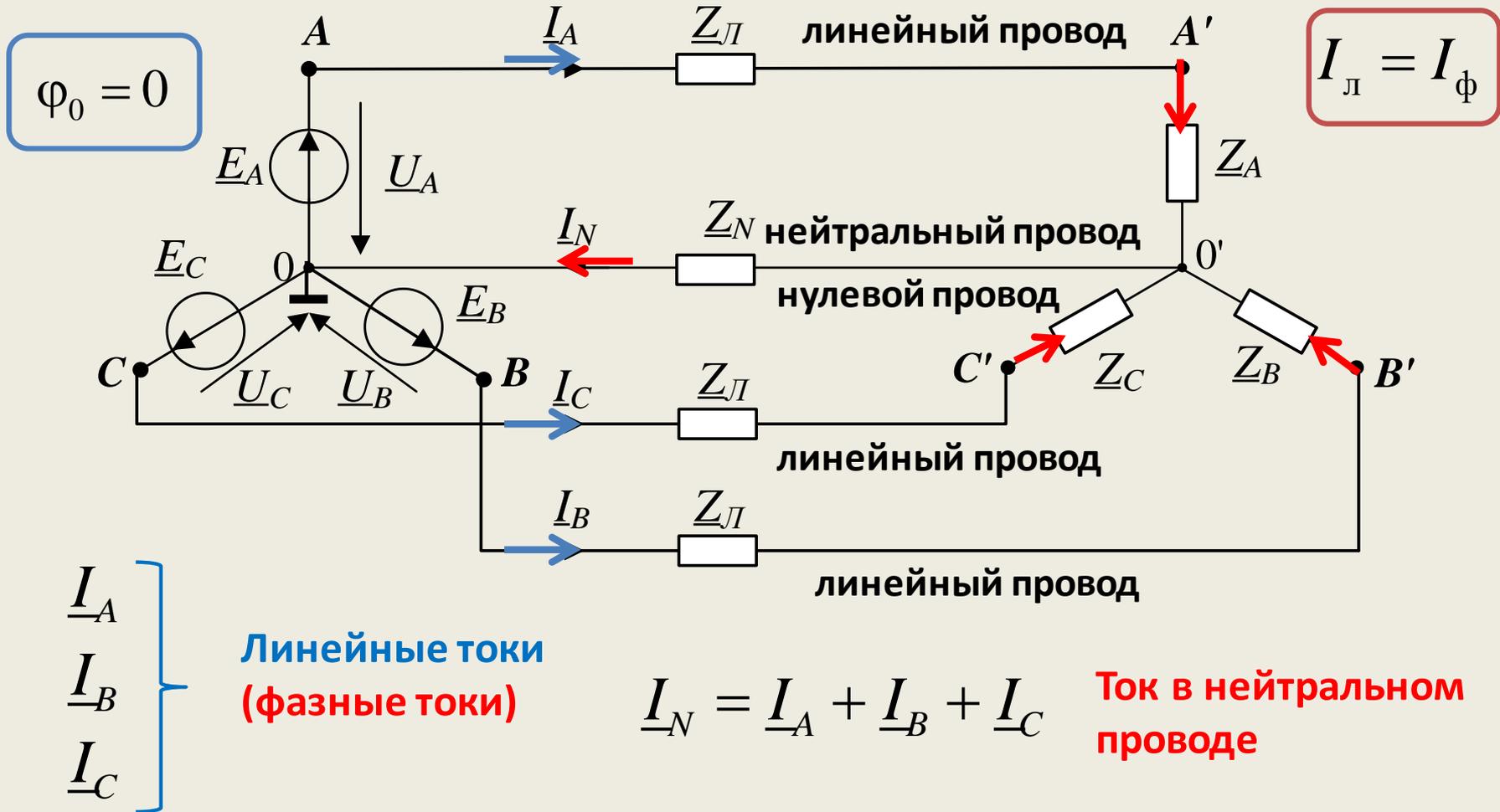
4.4. Способы соединения генератора с нагрузкой

На практике используют различные комбинации соединения обмоток генератора и приемника: «звезда»-«звезда», «звезда»-«треугольник», «треугольник» - «звезда», «треугольник» - «треугольник». При соединении генератора с приемником возможно **четырёхпроводное** и **трехпроводное** соединение, в зависимости от возможности подключения четвертого провода к общим (нулевым) точкам генератора и приемника.

По правилам эксплуатации общая точка генератора должна быть заземлена; в трехфазной системе также есть повторное заземление или заземляющие шины.

Четырехпроводная система

Трехфазный генератор через линейные провода соединен с приемником. Дополнительный четвертый провод соединяет общие точки генератора и приемника.



Четырехпроводная система

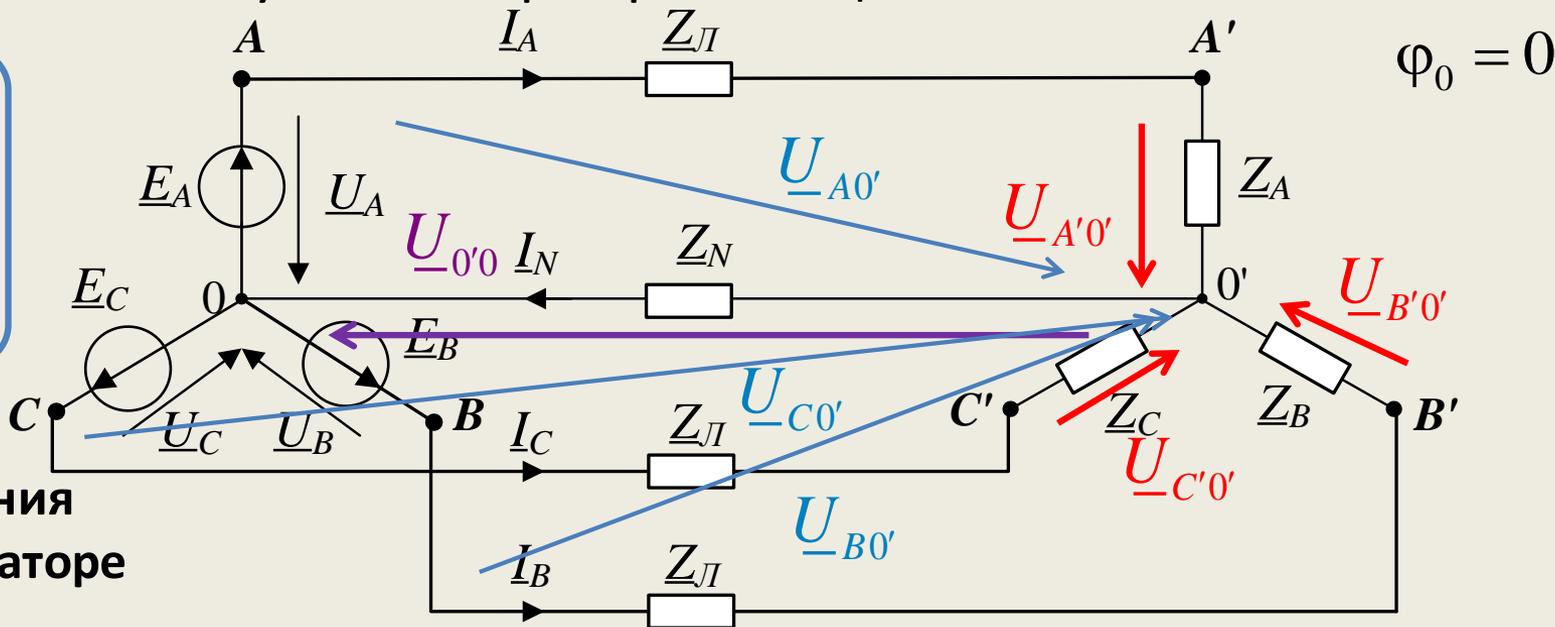
Задано фазное ЭДС (фазное напряжение) генератора, последовательность чередования фаз; определим напряжения на остальных участках трехфазной цепи.

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

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

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

Фазные напряжения на генераторе



$\underline{U}_{0'0}$ Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{A'O'} = \underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}$$

$$\underline{U}_{B'O'} = \underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}$$

$$\underline{U}_{C'O'} = \underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}$$

$$\underline{U}_{A'O'}$$

$$\underline{U}_{B'O'}$$

$$\underline{U}_{C'O'}$$

Фазные напряжения на приемнике

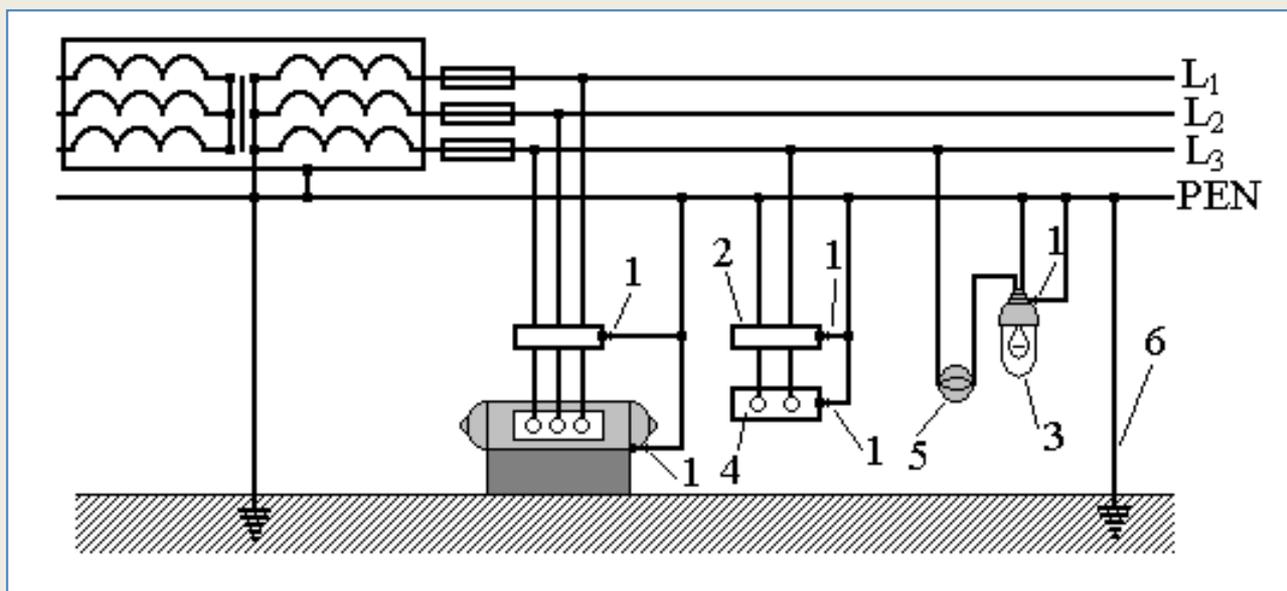
Четырехпроводная система

При соединении обмоток генератора и нагрузки "звездой" ток в линейном проводе (линейный ток в линейных проводах) равен току в фазах генератора и нагрузки (фазные токи в фазах генератора и нагрузки): $I_{л} = I_{ф}$.

Фазные напряжения на нагрузке отличаются от фазного напряжения на источнике за счет падения напряжения в линейных проводах и при наличии несимметрии возникающего напряжения смещения нейтрали. В случае **идеальной нейтрали** напряжение смещения нейтрали равно нулю. Для безопасности **нулевой провод заземляют**, в нем нельзя устанавливать предохранители, выключатели и т.д. Отключение нулевого провода при неравномерной (например, бытовой, осветительной) нагрузке недопустимо.

Основным преимуществом четырехпроводной системы является возможность включения электроприемников на разные напряжения. Так для снабжения смешанных осветительно-силовых нагрузок осветительные нагрузки включаются на фазное напряжение, а силовые нагрузки (электродвигатели) - на линейное.

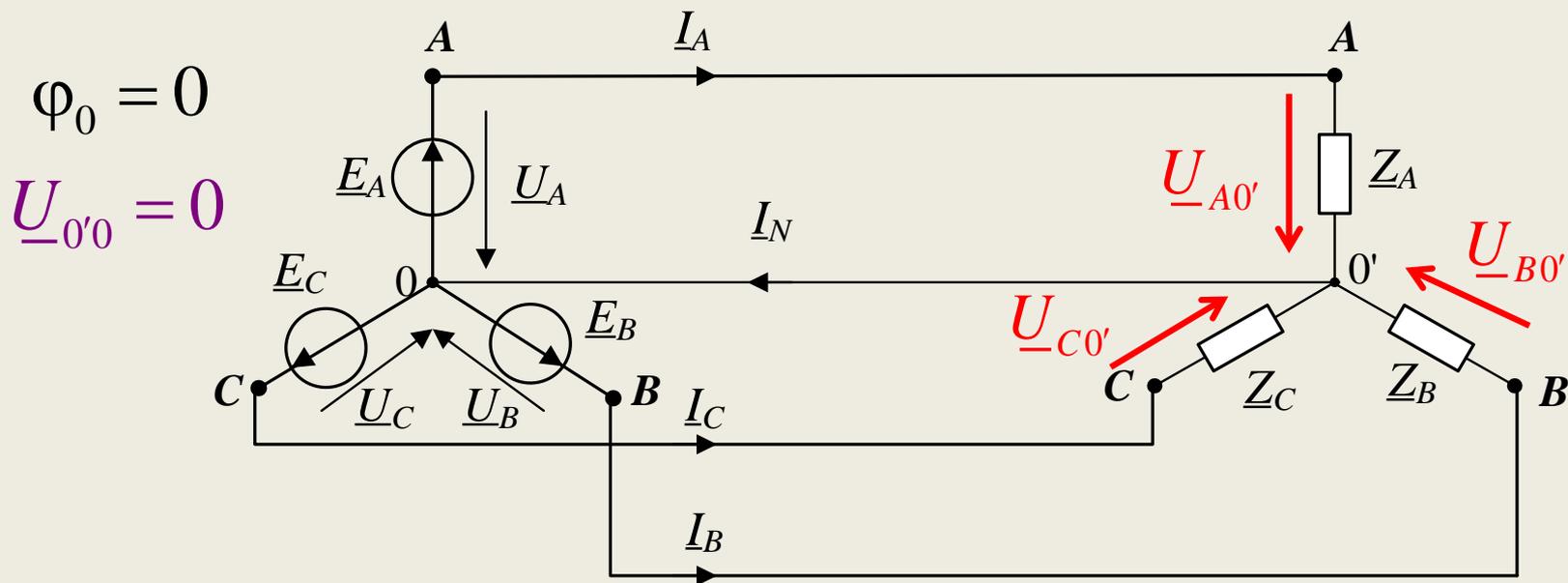
Схема зануления в сети с глухозаземленной нейтралью



1 – болт присоединения заземления или зануления; 2 – защитный аппарат; 3 – светильник; 4 – однофазный электроприемник; 5 – выключатель; 6 – повторное заземление

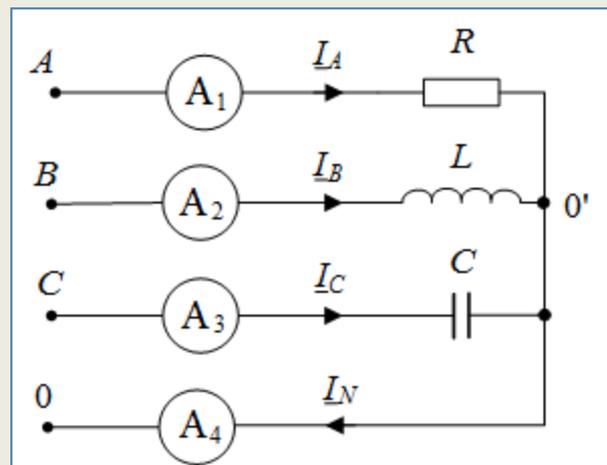
Система PEN, международное обозначение линейных проводов L_1 , L_2 , L_3

Четырехпроводная система с идеальной нейтралью



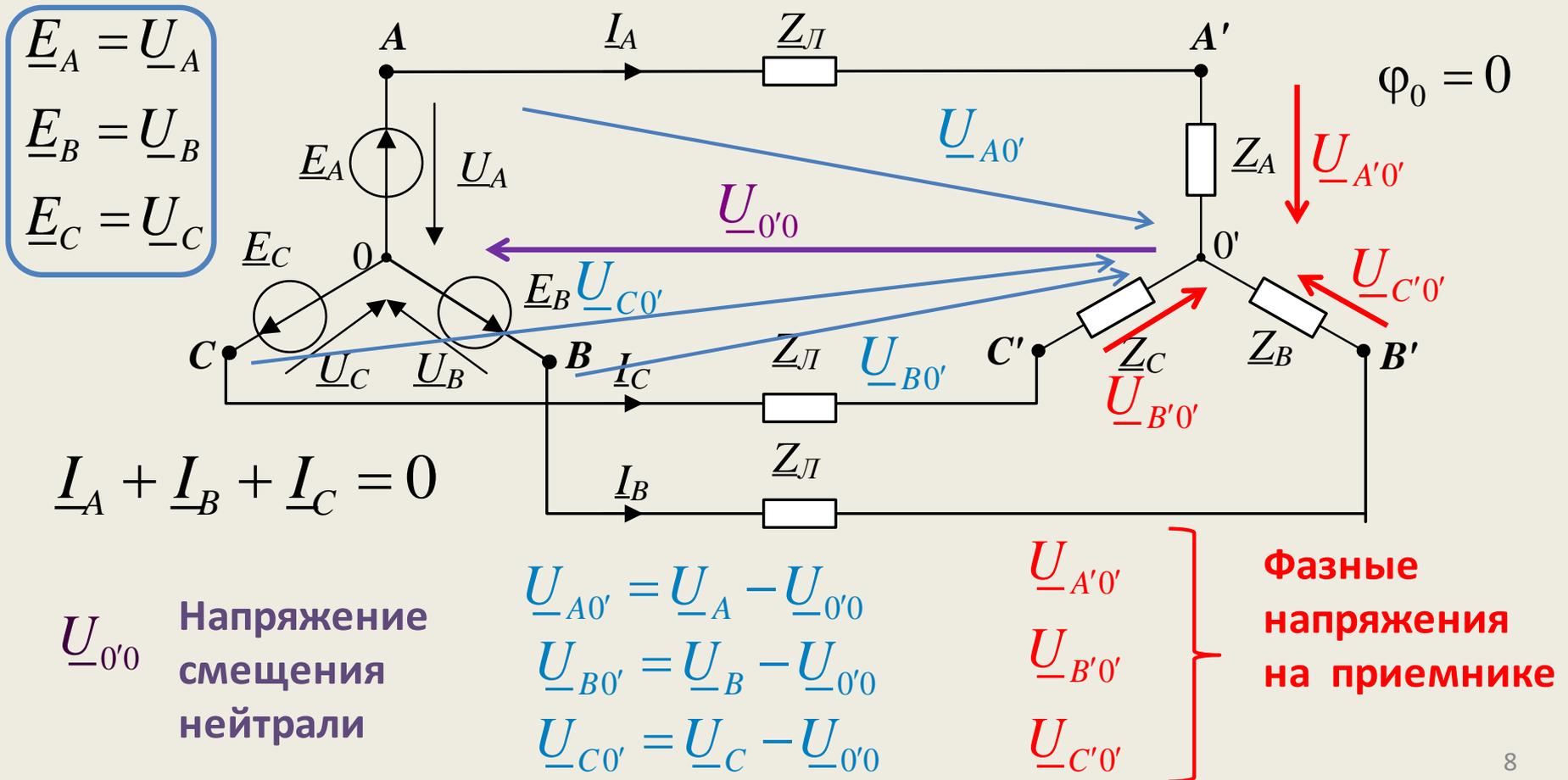
$\underline{U}_{A0'} = \underline{U}_A$
 $\underline{U}_{B0'} = \underline{U}_B$
 $\underline{U}_{C0'} = \underline{U}_C$

Фазные напряжения на приемнике совпадают с фазными на источнике



Трехпроводная система при соединении фазных обмоток генератора и приемника «звездой»

В случае отсутствия нулевого провода (трехпроводная система) при несимметричной нагрузке возникает несимметрия напряжений и потенциал точки $0'$ "смещается" относительно потенциала точки 0 .



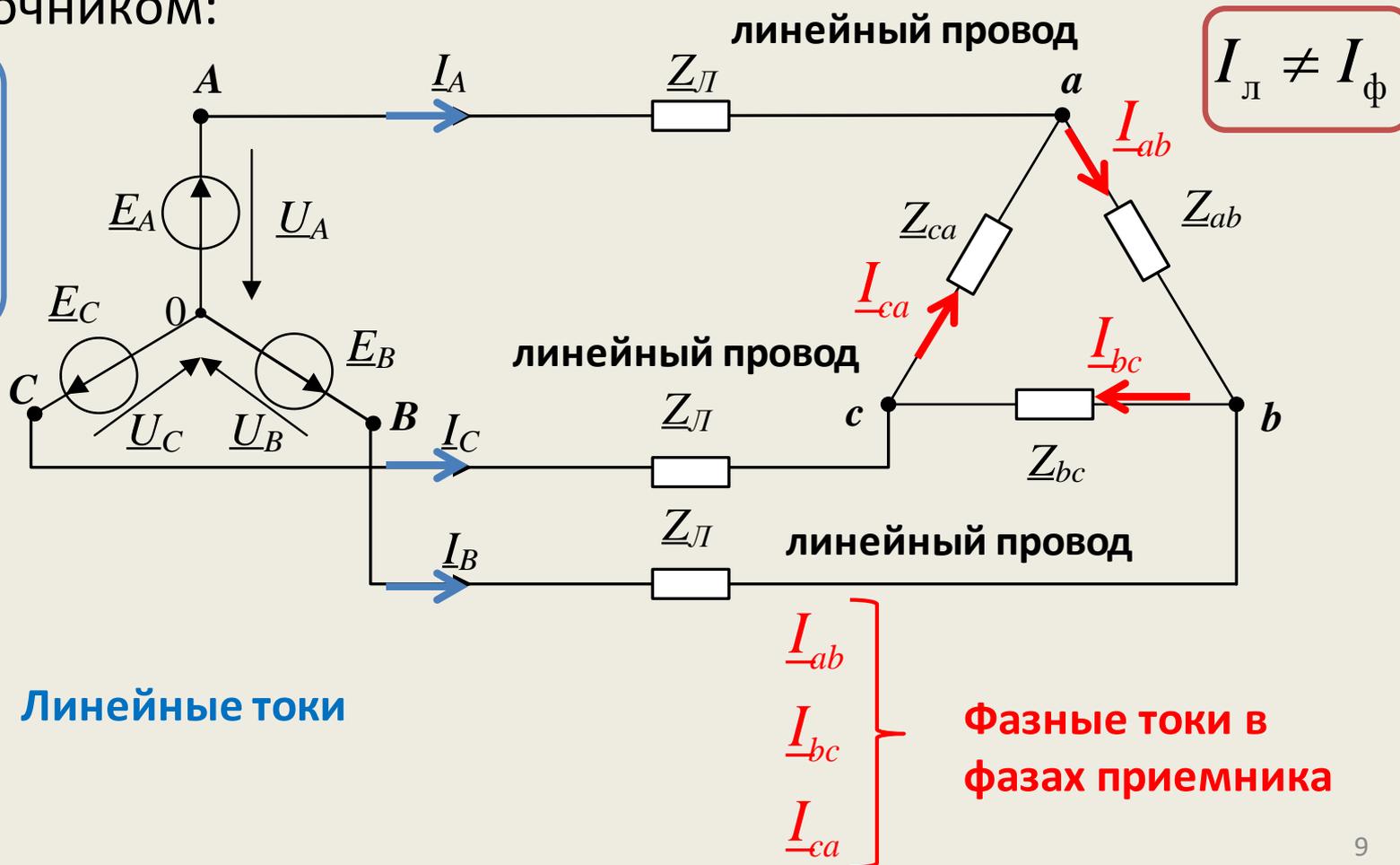
Трехпроводная система при соединении фазных обмоток «треугольником»

При соединении фаз приемника **треугольником** возможно только трехпроводное соединение приемника с источником:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= \underline{U}_A \\ \underline{E}_B &= \underline{U}_B \\ \underline{E}_C &= \underline{U}_C \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{aligned} \right\}$$

Линейные токи



$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{ab} \\ \underline{I}_{bc} \\ \underline{I}_{ca} \end{aligned} \right\}$$

Фазные токи в фазах приемника

Трехпроводная система

При соединении обмоток нагрузки «треугольником» ток в линейном проводе (линейные ток в линейных проводах) не равен току в фазах нагрузки (фазные токи в фазах нагрузки): $I_{\text{л}} \neq I_{\text{ф}}$.

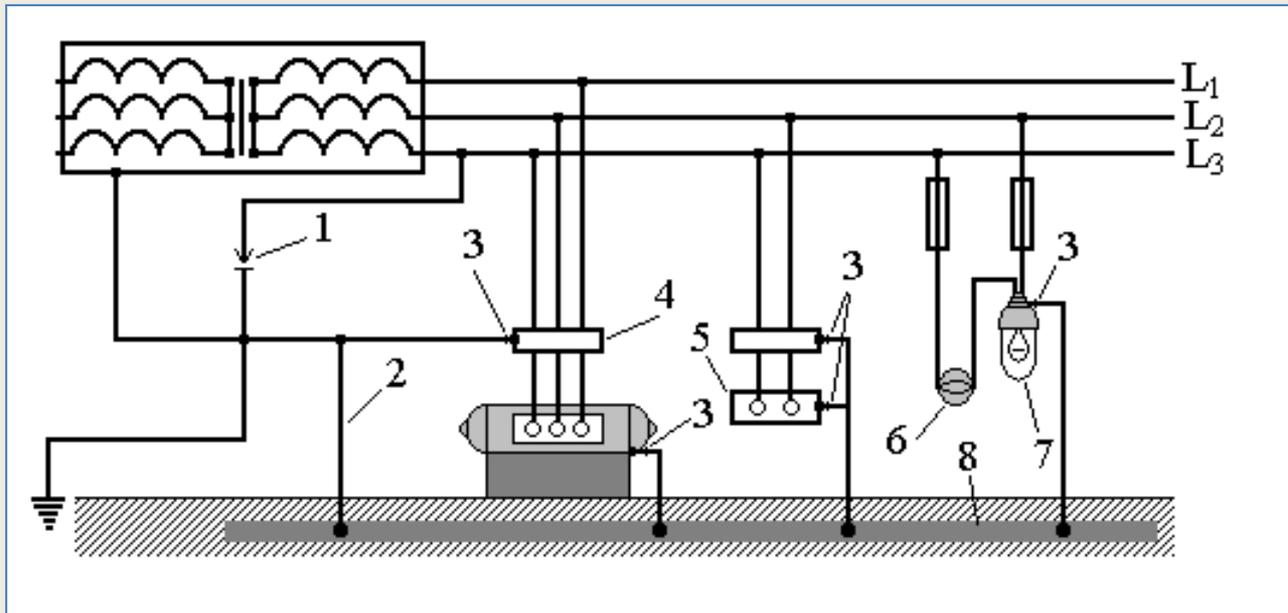
Фазные токи в нагрузке могут быть рассчитаны по первому закону Кирхгофа: $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$; $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$

Линейные токи определяют **падения напряжения в линии**

$\underline{U}_{Aa} = \underline{Z}_{\text{л}} \underline{I}_A$, $\underline{U}_{Bb} = \underline{Z}_{\text{л}} \underline{I}_B$, $\underline{U}_{Cc} = \underline{Z}_{\text{л}} \underline{I}_C$, фазные токи - **фазные напряжения в фазах приемника** $\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_{ab} \underline{I}_{ab}$, $\underline{U}_{bc} = \underline{Z}_{bc} \underline{I}_{bc}$, $\underline{U}_{ca} = \underline{Z}_{ca} \underline{I}_{ca}$. Если провода, соединяющие источник с приемником идеальные ($\underline{Z}_{\text{л}} = 0$), то линейные напряжения источника совпадают с фазными напряжениями приемника $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab}$, $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc}$, $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca}$.

Схема заземления электроустановки с изолированной нейтралью

При отсутствии нулевого провода для безопасной работы трехфазной системы все электроприемники должны иметь защитное заземление.



- 1 – пробивной предохранитель; 2 – магистраль заземления;
- 3 – болт присоединения заземления или зануления;
- 4 – защитный аппарат в металлическом корпусе;
- 5 – однофазный электроприемник; 6 – выключатель;
- 7 – светильник; 8 – заземляющая шина

4.5. Расчет трехфазных цепей

Трехфазные электрические цепи представляют собой частный случай сложных электрических цепей. Расчет синусоидальных режимов этих цепей может проводиться комплексным методом в сочетании с любыми ранее изученными методами – узловых потенциалов, преобразований электрических схем и т.д. Методика расчета трехфазных цепей выбирается в соответствии с типом нагрузки и способом соединения приемника и источника; наиболее просто проводится расчет **симметричного режима трехфазной цепи**. Для **симметричного режима** сопротивления приемников в фазах равны, т.е.

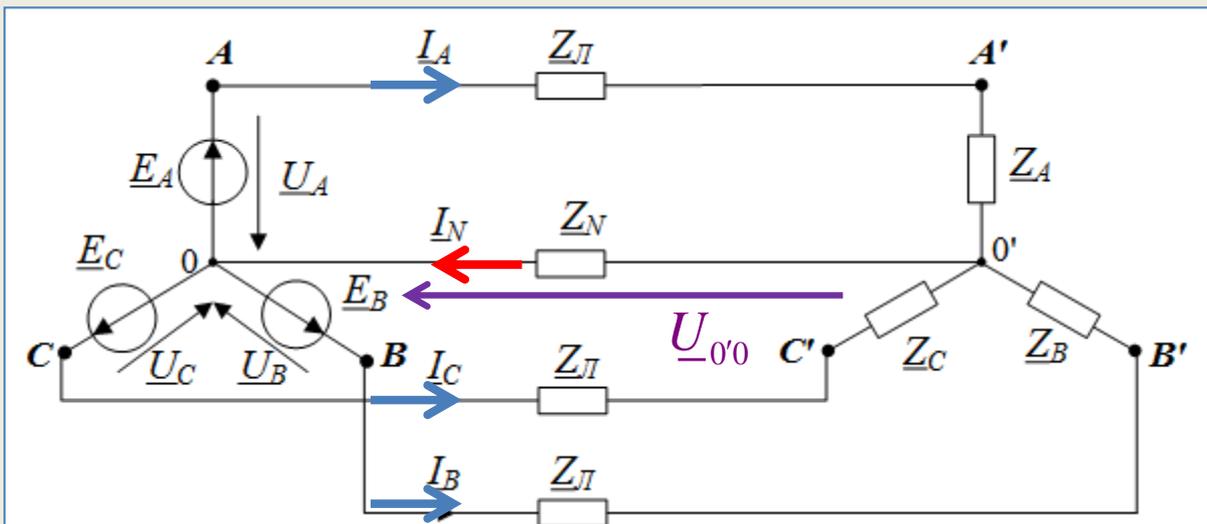
$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$, $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}$, сопротивления проводов $\underline{Z}_л$ одинаковы.

4.5. Расчет трехфазных цепей

В данной главе рассмотрим методики расчета трехфазных цепей при *статической нагрузке* (резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки). Для статической нагрузки изменение порядка чередования фаз приложенного к ним напряжения изменит только последовательность системы токов, но не их величину, т.е. сопротивление таких нагрузок одинаково для любой последовательности чередования фаз. Наряду со статическими нагрузками существуют нагрузки *динамические* - электрические машины. Расчет трехфазных цепей при динамической нагрузке будет рассмотрен в следующих главах.

Расчет трехфазных цепей сопровождается *построением векторно-топографических диаграмм*. Поскольку в большинстве практических задач ЭДС цепей считаются заданными, то первоначально строят векторную диаграмму трехфазных систем ЭДС. Далее, пользуясь расчетными данными режимов, строится диаграмма рассчитанных трехфазных систем векторов токов и напряжений в линиях и нагрузках.

Четырехпроводная система (с нейтральным проводом)



Симметричный режим

Если $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$

$$\underline{U}_{0'0} = 0 \quad \underline{I}_N = 0$$

1) Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_A} + \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_B} + \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_C} + \frac{1}{\underline{Z}_N}}$$

2) Линейные (фазные) токи

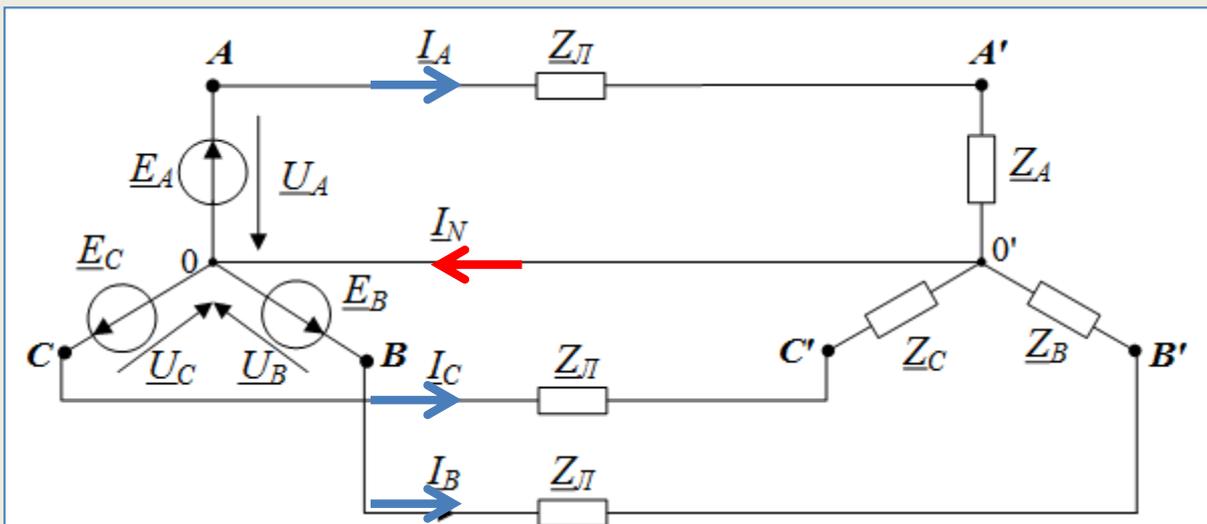
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_A} \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_B}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_C}$$

3) Ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad \underline{I}_N = \frac{\underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_N}$$

Четырехпроводная система (с идеальным нейтральным проводом)



Симметричный режим

Если $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$

$$\underline{I}_N = 0$$

1) Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{0'0} = 0$$

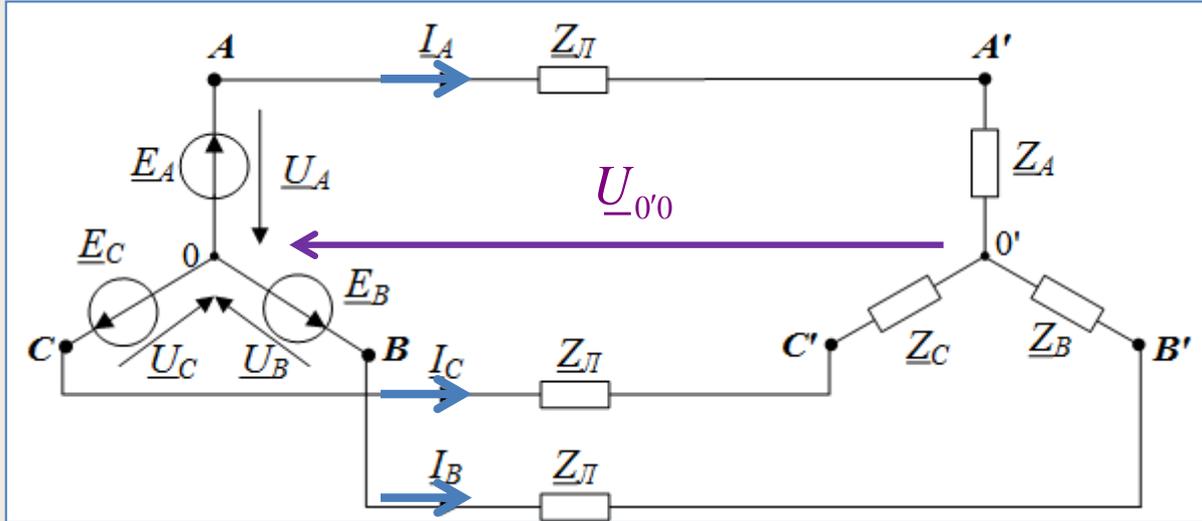
2) Линейные (фазные) токи

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_A} \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_B} \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_C}$$

3) Ток в нейтральном проводе

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

Трехпроводная система (без нейтрального провода)



Симметричный режим

Если $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$

$$\underline{U}_{0'0} = 0$$

1) Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_A} + \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_B} + \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_C}}$$

2) Линейные (фазные) токи

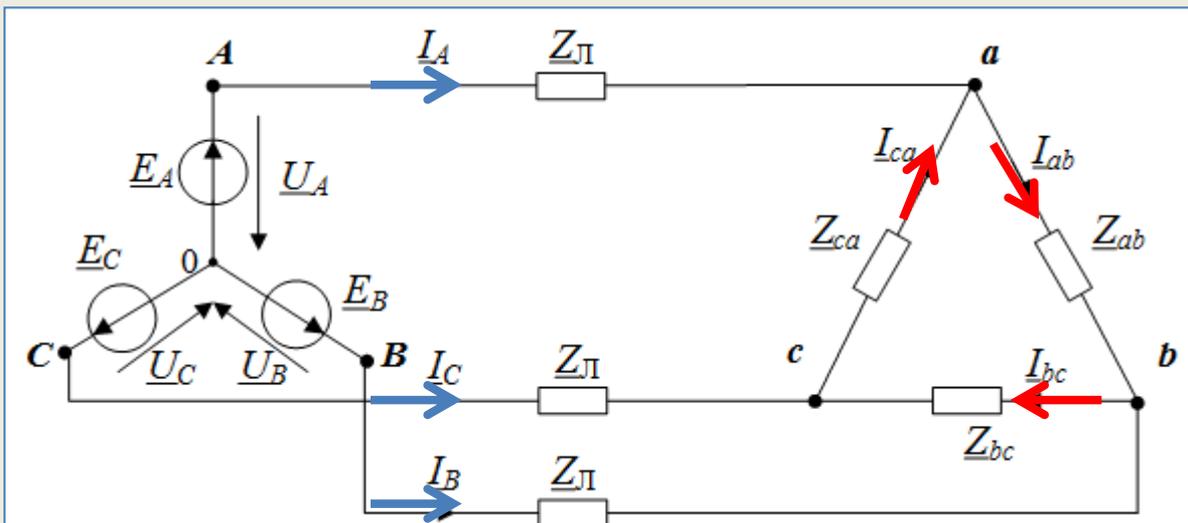
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_A} \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_B}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_Л + \underline{Z}_C}$$

3) Проверка решения

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

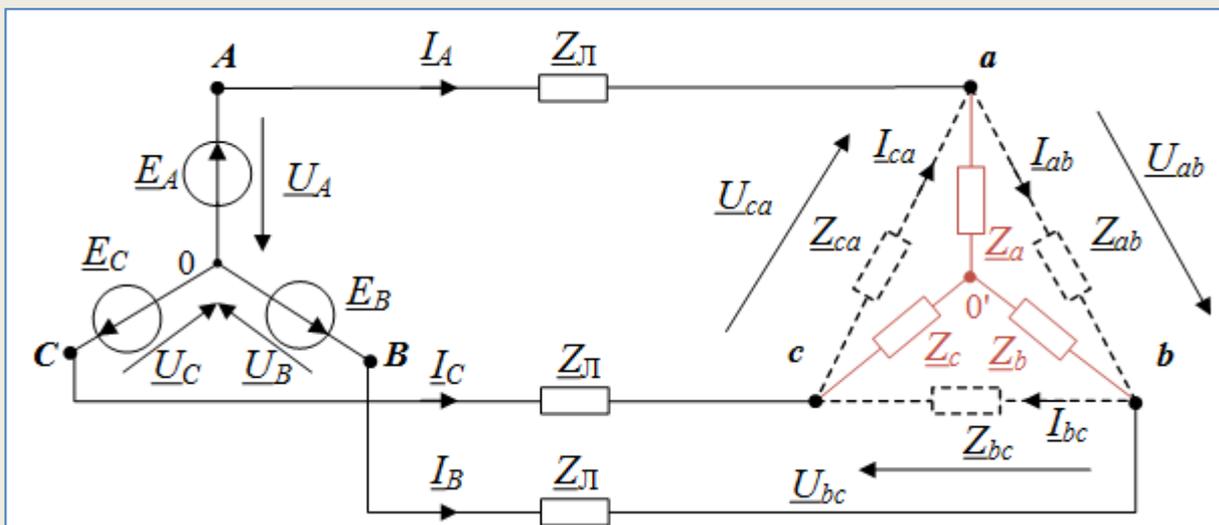
Трёхпроводная система («звезда» – «треугольник»)



Симметричный режим

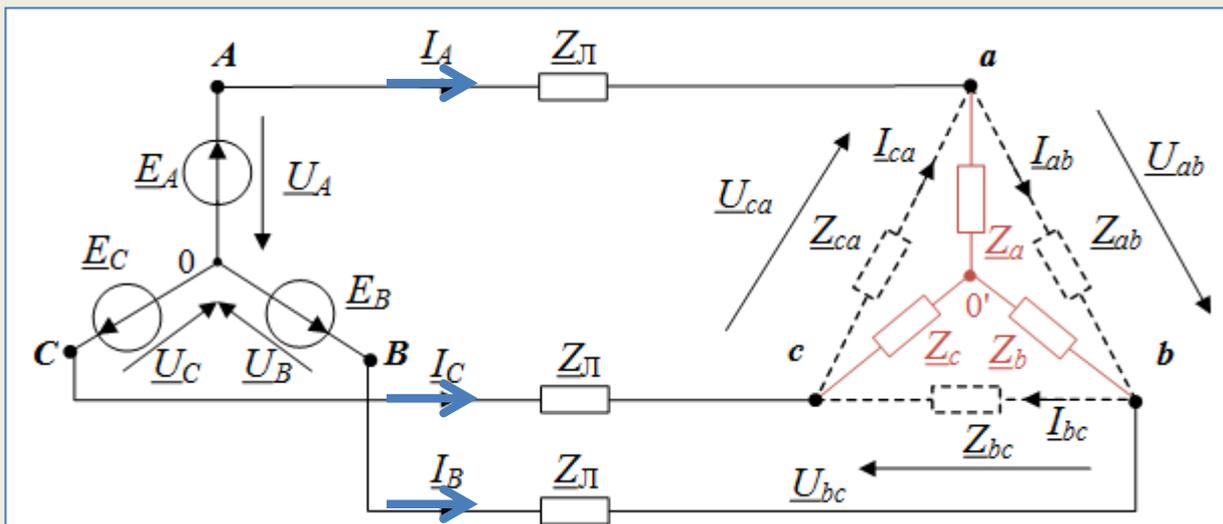
Если $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$$



**1) Эквивалентное
преобразование
трехфазной нагрузки**

Трехпроводная система («звезда» – «треугольник»)



3) Линейные токи

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a}$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c}$$

2) Напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a} + \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b} + \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c}}{\frac{1}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a} + \frac{1}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b} + \frac{1}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c}}$$

4) Фазные напряжения на нагрузке

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_a \underline{I}_A - \underline{Z}_b \underline{I}_B$$

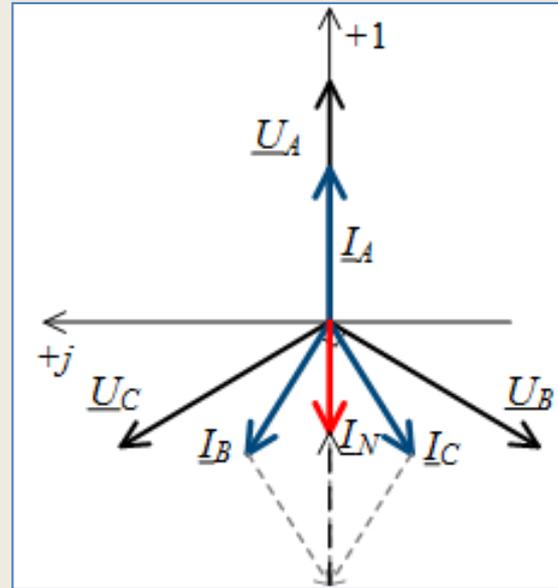
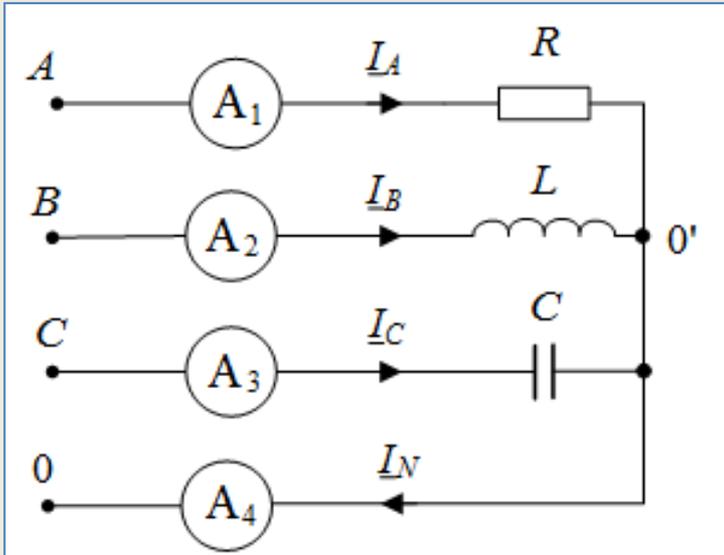
$$\underline{U}_{bc} = \underline{Z}_b \underline{I}_B - \underline{Z}_c \underline{I}_C$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{Z}_c \underline{I}_C - \underline{Z}_a \underline{I}_A$$

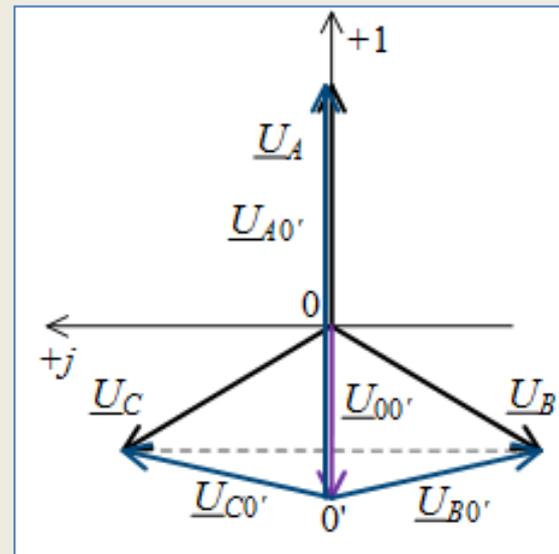
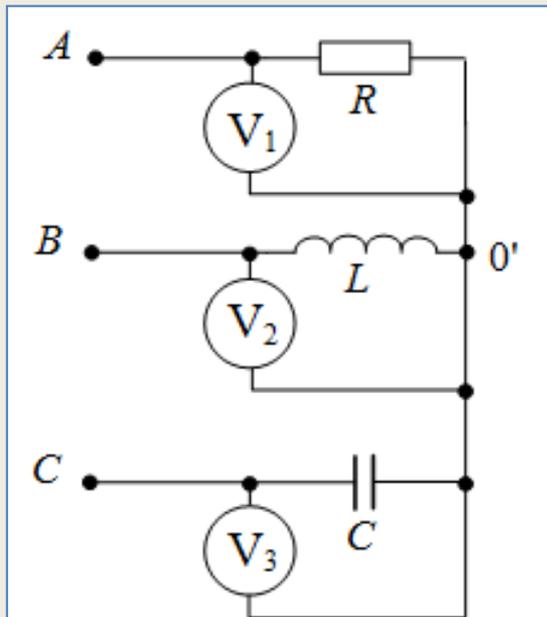
5) Фазные токи

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}$$

Примеры задач расчета трехфазных цепей



Четырехпроводная система с идеальной нейтралью



Трехпроводная система без нейтрали

Расчет симметричных четырехпроводных и трехпроводных трехфазных систем

В симметричном режиме расчет сложной трехфазной цепи упрощается, так как расчет можно провести, используя *эквивалентную однофазную схему* фазы А.

Использование *фазных множителей* позволяет провести расчет токов и напряжений в фазах В и С.

$$a = 1e^{j120^\circ} = 1\angle 120^\circ = -0,5 + j0,866$$

$$a^2 = 1e^{j240^\circ} = 1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ = -0,5 - j0,866$$

$$a^0 = 1e^{j0} = 1$$

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

Для прямой последовательности

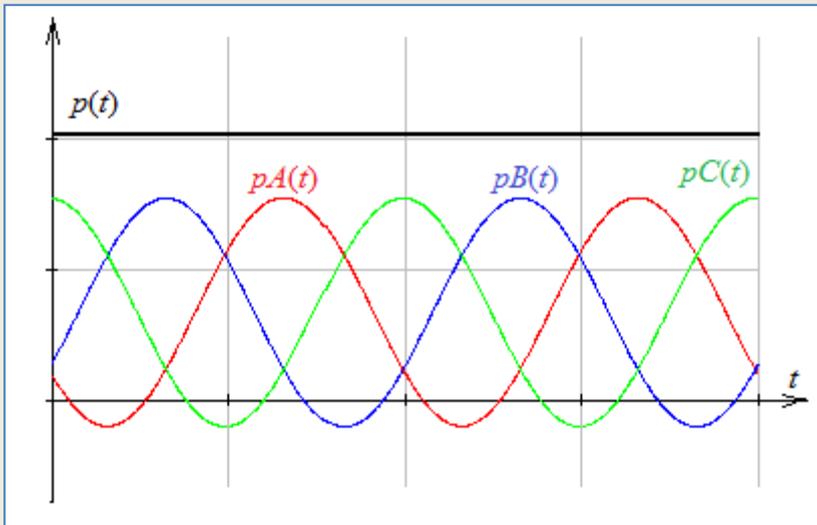
$$\underline{U}_A = U_\phi \angle 0 \quad \underline{U}_B = U_\phi \angle -120^\circ = a^2 \underline{U}_A \quad \underline{U}_C = U_\phi \angle 120^\circ = a \underline{U}_A$$

4.6. Мощность трехфазной цепи

Мгновенная мощность однофазной цепи изменяется в двойной частотой. Из-за пульсации на валах генераторов и двигателей однофазного тока возникает пульсирующий крутящий момент. Мгновенная мощность трехфазной цепи в симметричном режиме $p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = const$.

Мгновенная мощность трехфазной системы **в симметричном режиме не зависит от времени, всегда постоянна и равна активной мощности цепи.** Это одно из преимуществ трехфазной цепи, т.к. в любой момент времени нагрузка генераторов постоянна и привод (турбина, двигатель) также испытывает одинаковую нагрузку. Трехфазная цепь, мгновенная мощность которой неизменна, называется **уравновешенной системой.**

4.6. Мощность трехфазной цепи



Мгновенная мощность трехфазной цепи в симметричном режиме

$$p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = \text{const}$$

$$p(t) = P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$$

Так как в электроэнергетике чаще имеют дело с линейным напряжением, мощность цепи выражают через линейные токи и напряжения. При соединении звездой $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$ $I_{\text{л}} = I_{\phi}$

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}$$

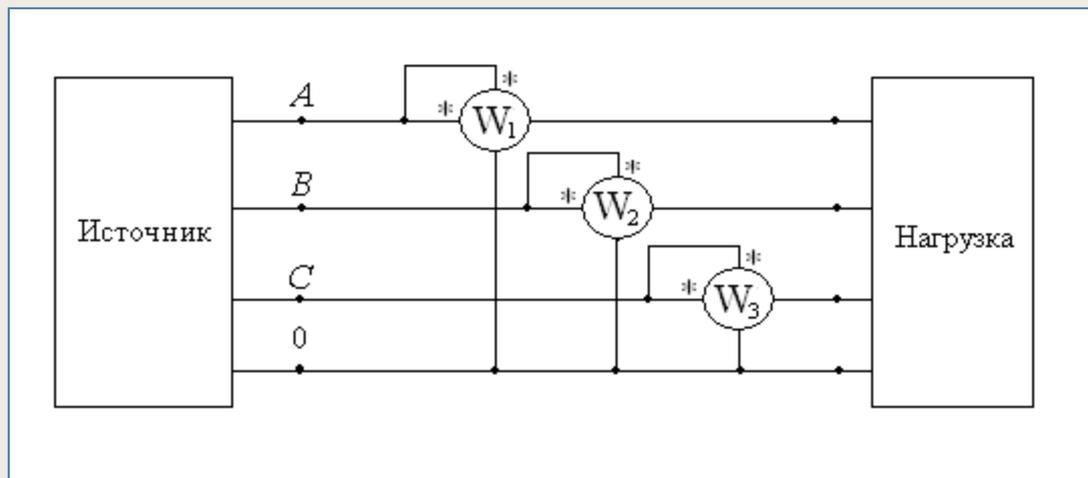
$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi}$$

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}$$

В несимметричном режиме мгновенная мощность содержит переменную составляющую, трехфазная цепь не является уравновешенной системой.

4.8. Измерение мощности в трехфазных цепях

В *четырёхпроводной системе* токовая обмотка ваттметра включается последовательно в один из линейных проводов, а обмотка напряжения - между тем же линейным и нулевым проводом. При таком включении показание ваттметра определить активную мощность одной фазы, активная мощность системы равна сумме показаний всех ваттметров.



$$P = P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3}$$

$$P_{W_1} = P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$$

$$P_{W_2} = P_B = U_B I_B \cos \varphi_B$$

$$P_{W_3} = P_C = U_C I_C \cos \varphi_C$$

В симметричном режиме

$$P = 3P_W$$

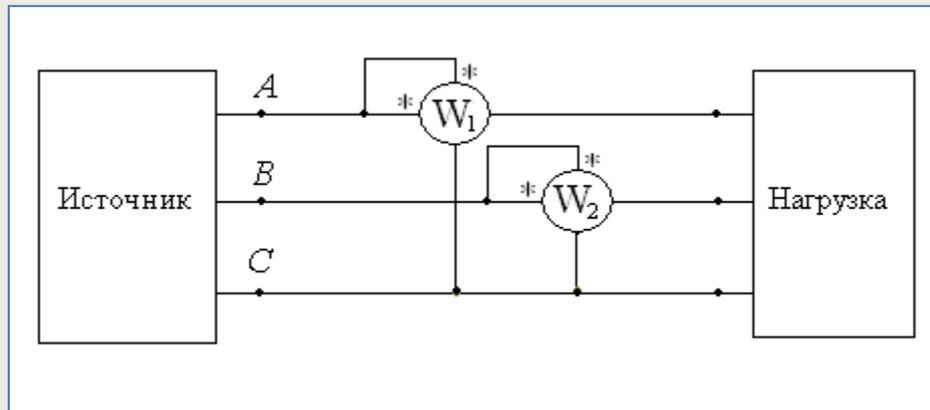
$$P_A = P_B = P_C = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi \quad P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi_\phi$$

Измерение мощности в трехфазных цепях

- В симметричном режиме измерение активной мощности **трехпроводной** трехфазной системы может быть измерена одним ваттметром. Токовая обмотка ваттметра включается последовательно в один из линейных проводов, а обмотка напряжения - между линейными проводами. Мощность трехфазной системы $P = \sqrt{3}P_W$.
- В трехпроводной трехфазной цепи при несимметричной и симметричной нагрузке для измерения активной мощности применяют схему **двух ваттметров**. В этом случае обмотки напряжения каждого ваттметра соединены с входным зажимом токовой обмотки и линейным проводом, оставшимся свободным. На практике для измерения мощности применяют один ваттметр и специальный переключатель, который дает возможность включать ваттметр как в один, так и в другой линейные провода.

Измерение активной мощности трехпроводной трехфазной цепи по схеме «двух ваттметров»

Возможны разные варианты подключения двух ваттметров, например в фазы *A* и *B* трехпроводной системы:



Активная мощность

$$P = P_{W_1} + P_{W_2}$$

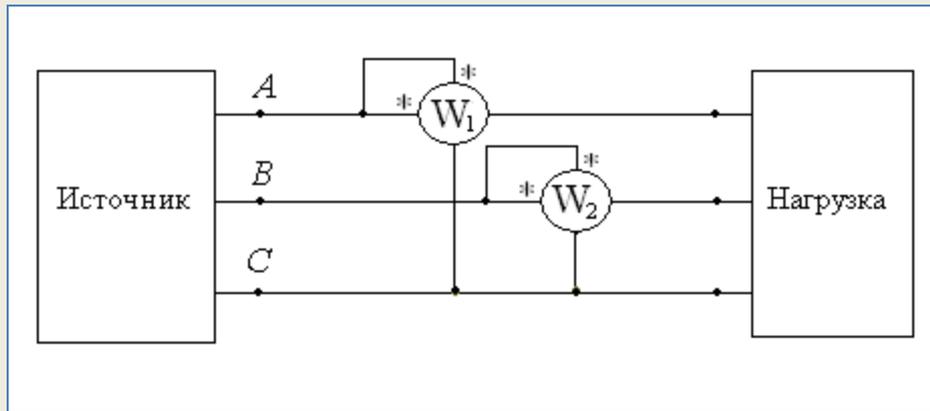
$$P_{W_1} = U_{AC} I_A \cos(\varphi_{u_{AC}} - \varphi_{i_A})$$

$$P_{W_2} = U_{BC} I_B \cos(\varphi_{u_{BC}} - \varphi_{i_B})$$

При больших углах сдвига между фазным напряжением и током показания ваттметра в одной из фаз могут оказаться отрицательными. На практике для измерения мощности необходимо будет изменить направление тока в токовой обмотке ваттметра, мощность системы будет равна разности показаний ваттметров после переключения токовой обмотки ваттметра.

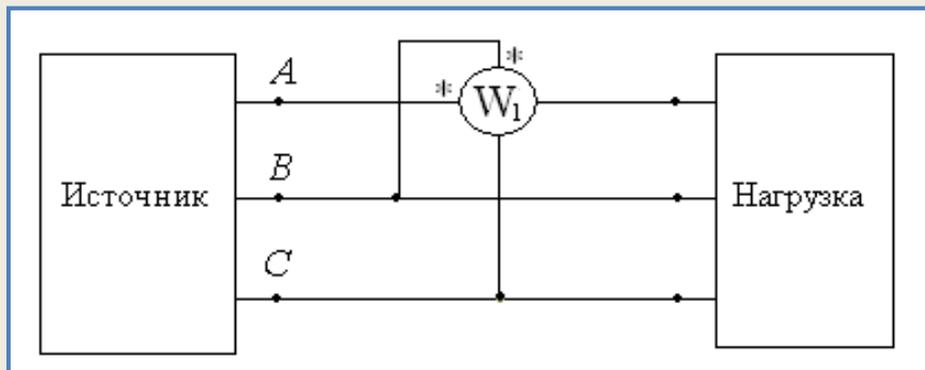
Определение реактивной мощности трехпроводной трехфазной цепи

В *симметричном режиме* по показаниям двух ваттметров можно определить реактивную мощность трехфазной цепи:



$$Q = \sqrt{3}(P_{W_1} - P_{W_2})$$

В *симметричном режиме* для определения реактивной мощности можно использовать схему с одним ваттметром :



$$Q = \sqrt{3}P_W$$

Измерение мощности в трехфазных цепях

Энергия в трехфазной системе измеряется как однофазными, так и трехфазными счетчиками электрической энергии. Однофазные счетчики включают в трехфазную цепь также, как и ваттметры. Трехфазные счетчики состояются из двух или трех однофазных, размещенных в одном корпусе и имеющих общее счетное устройство. В трехпроводной системе используют двухэлементные счетчики, в четырехпроводной - трехэлементные.

Автор доц. каф. ТОЭ НИУ «МЭИ»

Жохова М.П.



ZhokhovaMP@mpei.ru