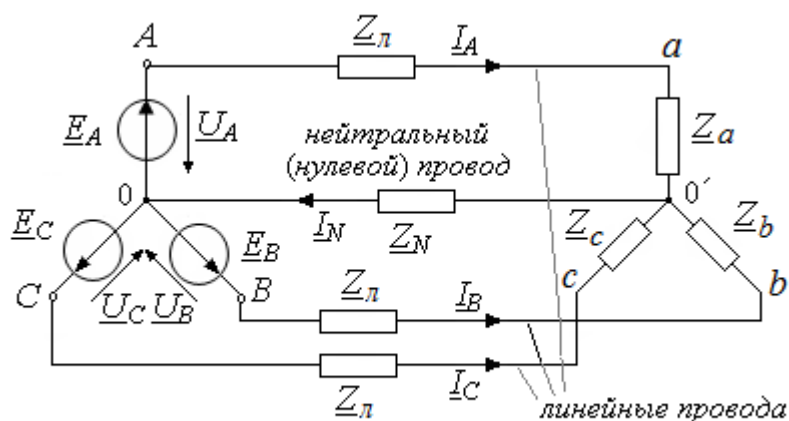


## 4.4 Способы соединения генератора и нагрузки

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** соединения.

**Четырёхпроводная система (с нейтральным проводом).**

Такое соединение возможно только при соединении фаз обмоток генератора и приемника «звезда»-«звезда». Отдельные фазы генератора и приемника соединяются **линейными проводами** с сопротивлениями  $\underline{Z}_л$ , а общие (нулевые) точки 0 и 0' - **нейтральным проводом** с сопротивлением  $\underline{Z}_N$ . Напряжение  $\underline{U}_{0'0} = \underline{\varphi}_{0'} - \underline{\varphi}_0$  называется **напряжением смещения нейтрали**.



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  $\underline{U}_{a0'}$ ,  $\underline{U}_{b0'}$ ,  $\underline{U}_{c0'}$  меньше фазного напряжения на источнике за счет падения напряжения в линейных проводах. Если принять  $\underline{Z}_л = 0$ , то фазные напряжения на приемнике считаются равными фазным напряжениям источника.

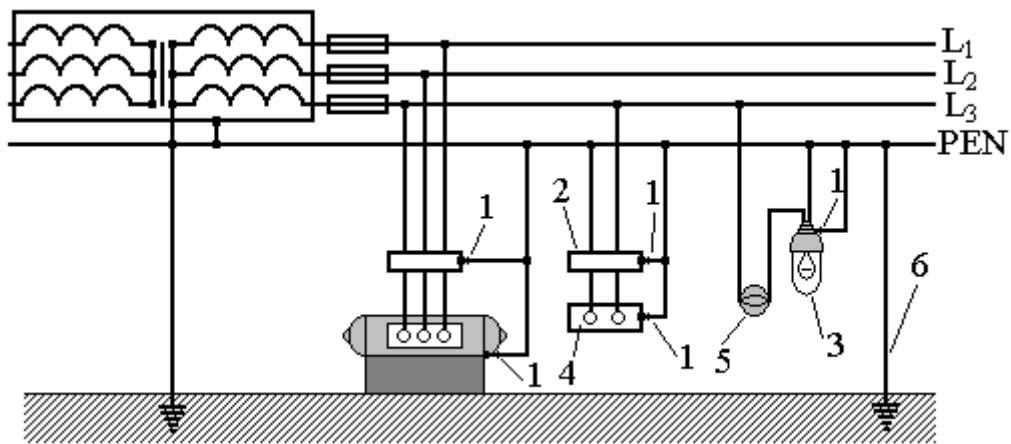
Ток в нейтральном проводе равен сумме фазных токов нагрузки  $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ . В случае симметричной нагрузки фазные токи представляют собой симметричную тройку прямой последовательности и сумма токов равна нулю. При несимметричной нагрузке ток в нейтральном проводе не равен нулю и наличие нулевого провода является обязательным<sup>1</sup>. В случае отсутствия нулевого провода (трехпроводная система) при несимметричной нагрузке возникает несимметрия напряжений и потенциал точки 0' "смещается" относительно потенциала точки 0. Появляется "напряжение смещения

<sup>1</sup>Как правило, сечение нулевого провода меньше, чем сечение линейных проводов.

нейтрали"  $\underline{U}_{00}$ . Поэтому отключение нулевого провода при неравномерной (например, бытовой, осветительной) нагрузке недопустимо. Для безопасности нулевой провод заземляют<sup>2</sup>, в нем нельзя устанавливать предохранители, выключатели и т.д. Трехфазный двигатель переменного тока включается в сеть "звездой" без нулевого провода.

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

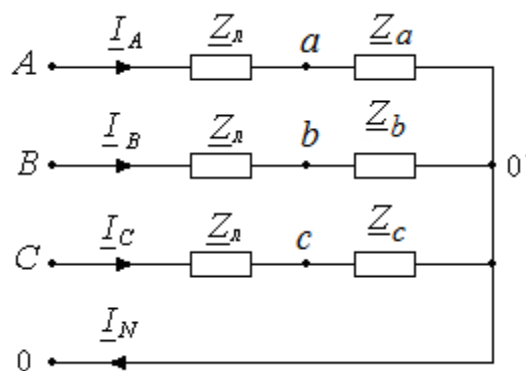


Обозначения:

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

При соединении общих точек 0 и 0' идеальным нейтральным проводом потенциалы общих точек 0 и 0' источника и приемника равны

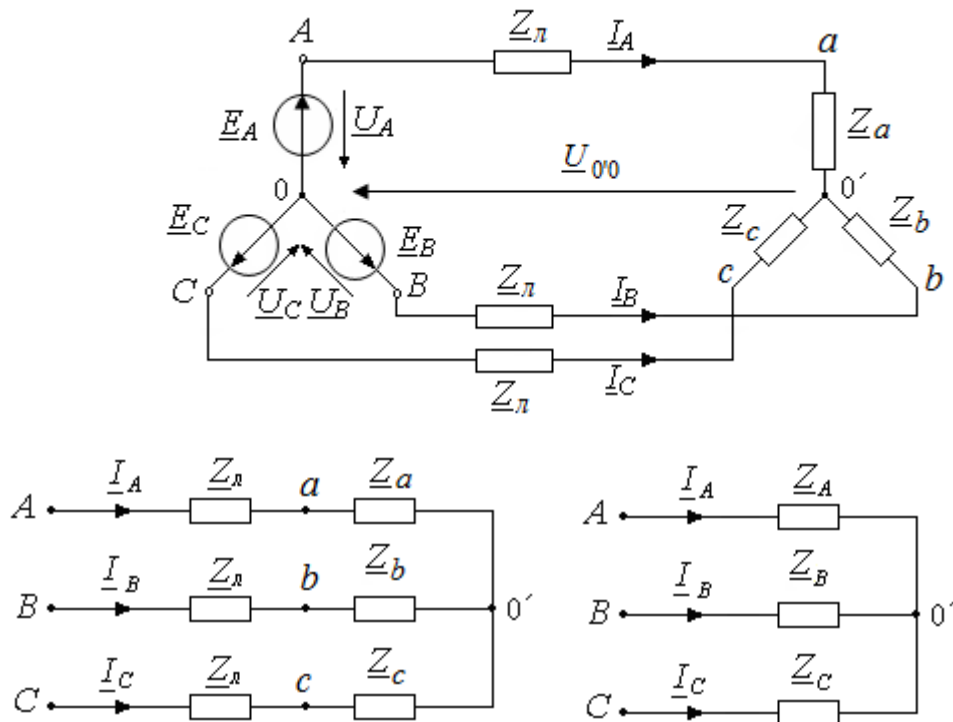
$$\varphi_0 = \varphi_{0'}, \text{ т.к. } \underline{Z}_N = 0:$$



<sup>2</sup> Система PEN, международное обозначение линейных проводов  $L_1, L_2, L_3$

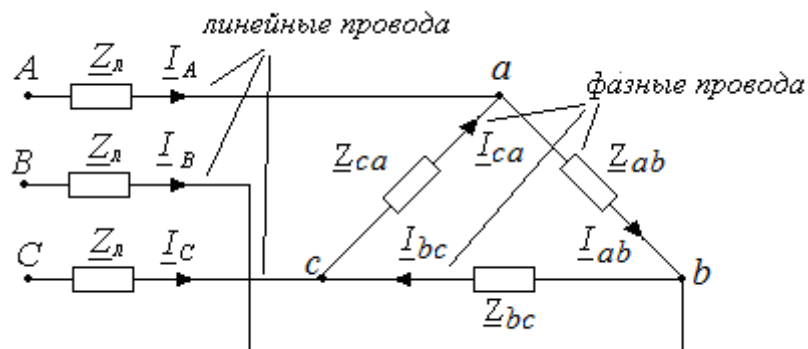
### Трехпроводная система (без нейтрального провода).

На рисунке показаны схемы трехфазной цепи «звезда»-«звезда» без соединения общих точек 0 и 0'.



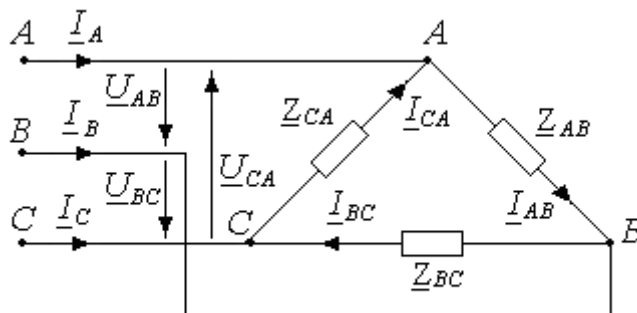
Для такого соединения  $I_A + I_B + I_C = 0$ .

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



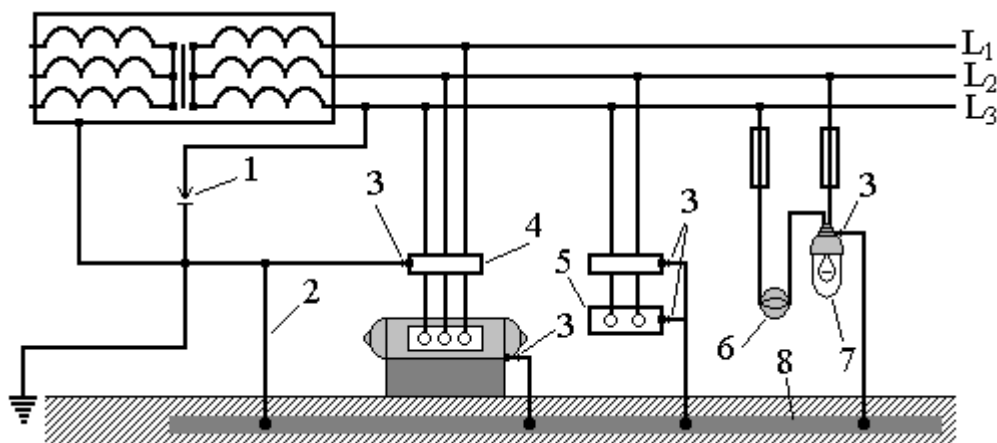
В таком случае **линейные токи**  $I_A, I_B, I_C$  в линейных проводах и **фазные токи**  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  в фазах приемника не совпадают ( $I_l \neq I_\phi$ ) и связаны соотношением по первому закону Кирхгофа:  $I_A = I_{ab} - I_{ca}$ ;  $I_B = I_{bc} - I_{ab}$ ;  $I_C = I_{ca} - I_{bc}$ . При этом  $I_A + I_B + I_C = 0$ . Линейные токи определяют **падения напряжения в линии**  $U_{Aa} = Z_l I_A$ ,  $U_{Bb} = Z_l I_B$ ,  $U_{Cc} = Z_l I_C$ , 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 ( $\underline{Z}_l = 0$ ), то линейные напряжения источника совпадают с фазными напряжениями приемника  $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab}$ ,  $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc}$ ,  $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca}$ :



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

#### Схема заземления электроустановки с изолированной нейтралью



Обозначения:

- 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

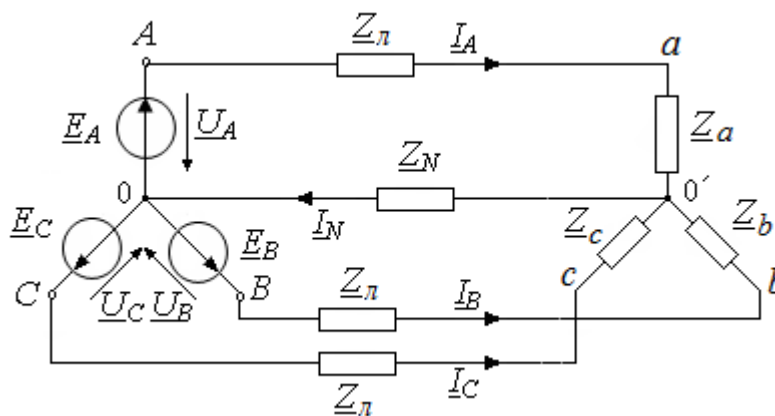
Трехфазные электрические цепи представляют собой частный случай сложных электрических цепей. Расчет синусоидальных режимов этих цепей может проводиться комплексным методом в сочетании с любыми ранее изученными методами – узловых потенциалов, преобразований электрических схем и т.д. Методика расчета трехфазных 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.  $Z_a = Z_b = Z_c = Z$ ,  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z$ , сопротивления проводов  $Z_l$  одинаковы.

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. Векторно-топографические диаграммы трехфазных цепей достаточно часто используются в электротехнической практике, поскольку они позволяют лучше понять особенности рассматриваемых режимов, соотношение в них фазных и линейных величин трехфазных систем токов, напряжений, ЭДС. Поскольку в большинстве практических задач ЭДС цепей считаются заданными, то первоначально строят векторную диаграмму трехфазных систем ЭДС. Далее, пользуясь расчетными данными режимов, эта диаграмма постепенно пополняется новыми по преимуществу трехфазными системами векторов токов и напряжений.

#### Четырехпроводная система (с нейтральным проводом).



Расчет **несимметричного режима** при  $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$  и  $Z_N \neq 0$  (неидеальный нейтральный провод) целесообразно осуществлять в следующем порядке:

1. Находят **напряжение смещения нейтрали**  $\underline{U}_{0'0}$ . Это напряжение между общей точкой источника и общей точкой нагрузки:

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\frac{\underline{U}_A}{Z_l + Z_a} + \frac{\underline{U}_B}{Z_l + Z_b} + \frac{\underline{U}_C}{Z_l + Z_c}}{\frac{1}{Z_l + Z_a} + \frac{1}{Z_l + Z_b} + \frac{1}{Z_l + Z_c} + \frac{1}{Z_N}}.$$

2. Линейные токи, как и фазные в приемнике, определяются из выражений:

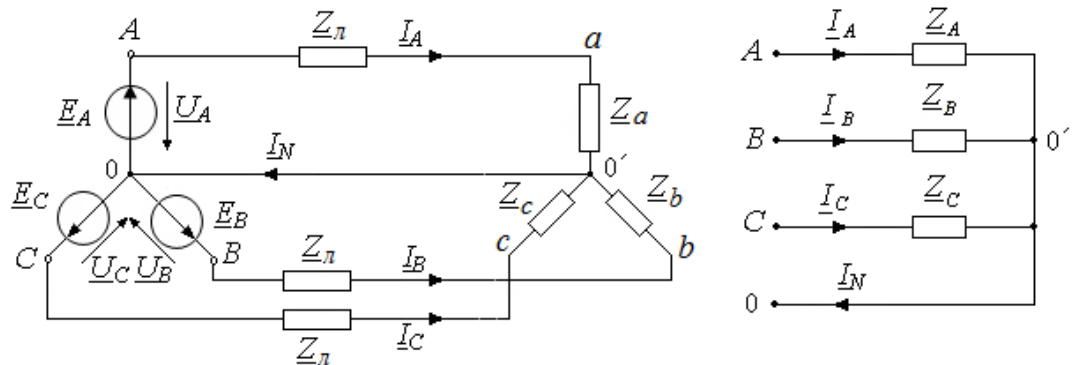
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_a}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_b}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_c}.$$

$$\text{Ток в нейтральном проводе: } \underline{I}_N = \frac{\underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_N}.$$

Проверка решения осуществляется по первому закону Кирхгофа:

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

Расчет несимметричного режима ( $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ ) при  $\underline{Z}_N = 0$  (идеальный нейтральный провод, короткозамкнутая нейтраль) проводят по закону Ома, так как  $U_{0'0}=0$ .



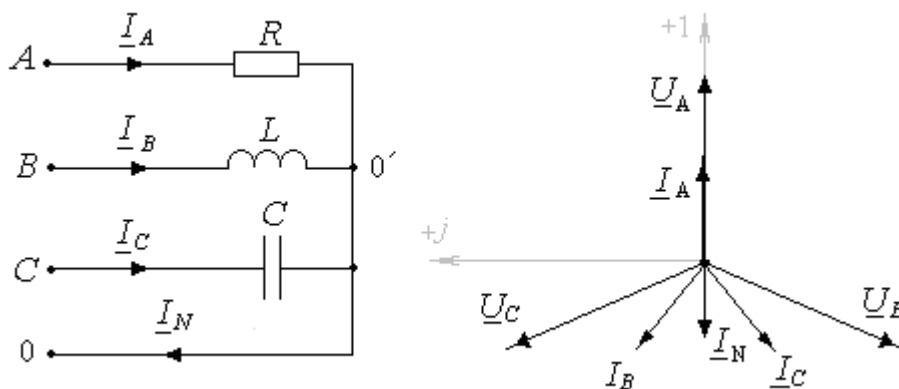
При этом линейные токи и токи в фазах приемника

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_a} = \frac{U_\phi \angle 0}{\underline{Z}_A}, \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_b} = \frac{U_\phi \angle -120^\circ}{\underline{Z}_B},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_l + \underline{Z}_c} = \frac{U_\phi \angle 120^\circ}{\underline{Z}_C}.$$

$$\text{Ток в нейтральном проводе } \underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

Векторная диаграмма для трехфазной цепи с несимметричной нагрузкой и идеальной нейтралью имеет вид:

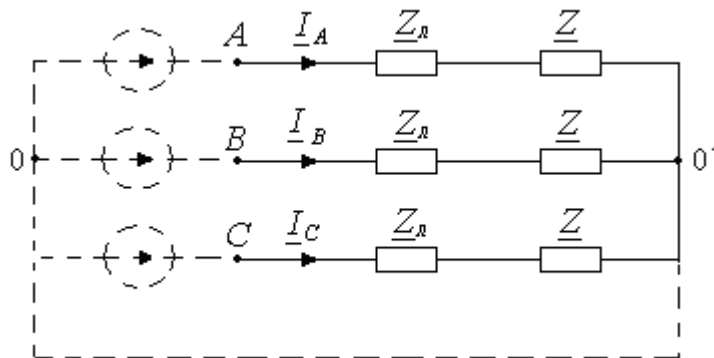


Для **симметричного режима** сопротивления приемников в фазах равны ( $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$ ). Напряжение смещения нейтрали в таком случае **равно нулю**:

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}} + \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}} + \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}}}{\frac{1}{\underline{Z}} + \frac{1}{\underline{Z}} + \frac{1}{\underline{Z}} + \frac{1}{\underline{Z}_N}} = \frac{\frac{1}{\underline{Z}}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)}{\frac{3}{\underline{Z}} + \frac{1}{\underline{Z}_N}} = 0,$$

так как для системы прямой последовательности чередования фаз  $\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0$ .

При симметричной нагрузке потенциалы точек 0 и 0' равны, ( $\varphi_0 = \varphi_{0'}$ ), можно мысленно соединить эти точки (пунктир на рисунке) и получить **расчетную схему**:



В результате токи находятся по закону Ома:

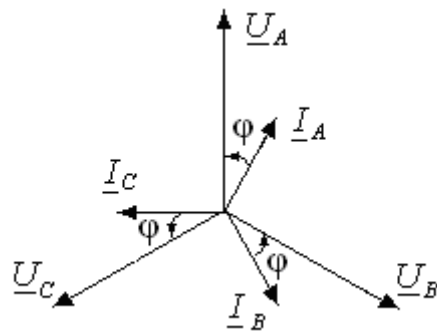
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_L + \underline{Z}} = \frac{U_\phi \angle 0}{\underline{Z}_L + \underline{Z}}, \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_L + \underline{Z}} = \frac{U_\phi \angle -120^\circ}{\underline{Z}_L + \underline{Z}},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_L + \underline{Z}} = \frac{U_\phi \angle 120^\circ}{\underline{Z}_L + \underline{Z}}.$$

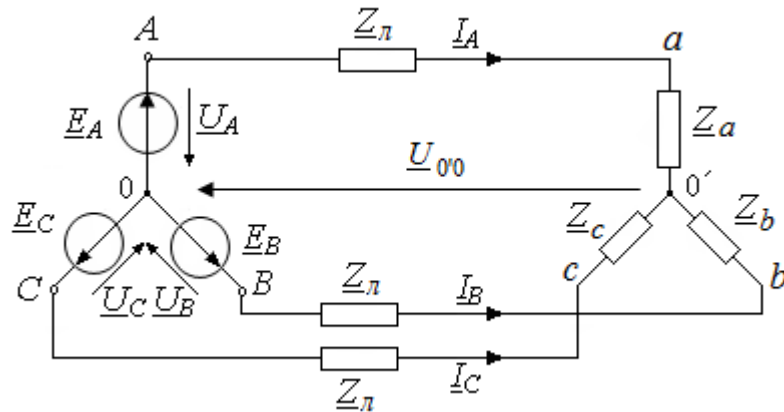
Как правило, используют **расчетную схему одной фазы А**, токи в фазах В и С определяют через ток в фазе А:  $\underline{I}_B = \underline{I}_A \angle -120^\circ = a^2 \underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_C = \underline{I}_A \angle 120^\circ = a \underline{I}_A$ .

В силу симметрии ток в нейтральном проводе равен нулю  $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_A + \underline{I}_A \angle -120^\circ + \underline{I}_A \angle 120^\circ = 0$ .

Векторная диаграмма для случая, когда  $\underline{Z}$  имеет активно-индуктивный характер (ток в фазах нагрузки отстает от приложенного фазного напряжения на угол  $\varphi$ ) имеет вид:



**Трехпроводная система (без нейтрального провода).**



Расчет несимметричного режима ( $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ ) без нейтрального провода проводят в следующем порядке:

1. Находят **напряжение смещения нейтрали**  $U_{0'0}$ .

$$U_{0'0} = \frac{\frac{U_A}{Z_l + Z_a} + \frac{U_B}{Z_l + Z_b} + \frac{U_C}{Z_l + Z_c}}{\frac{1}{Z_l + Z_a} + \frac{1}{Z_l + Z_b} + \frac{1}{Z_l + Z_c}} = \frac{\frac{U_A}{Z_A} + \frac{U_B}{Z_B} + \frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}}$$

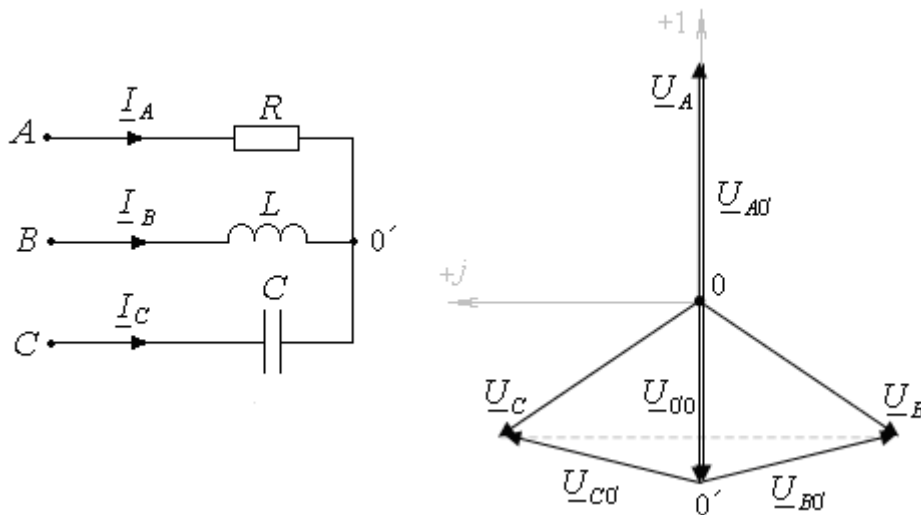
2. Линейные токи (фазные в приемнике) определяются напряжениями на фазах приемника:

$$\underline{I} = \frac{U_A - U_{0'0}}{Z_A} = \frac{U_B - U_{0'0}}{Z_B} = \frac{U_C - U_{0'0}}{Z_C}$$

Проверка решения осуществляется по первому закону Кирхгофа:

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

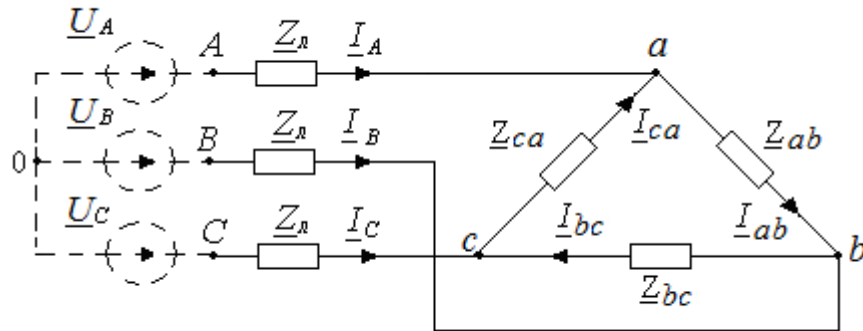
Векторная диаграмма для трехфазной цепи без нейтрального провода с несимметричной нагрузкой имеет вид:





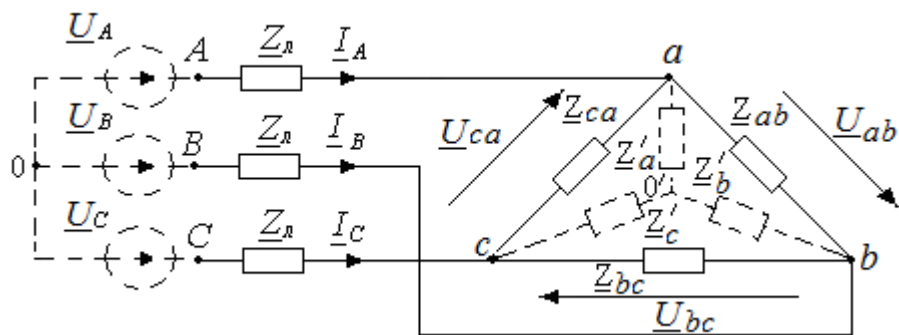
### Расчет трехфазной цепи при соединении фаз приемника треугольником.

В этом случае рассчитывают линейные токи в линии и фазные токи в фазах приемника.



Для **симметричного режима** сопротивления приемников в фазах равны, тогда действующее значение линейного тока в  $\sqrt{3}$  раз больше действующего значения фазного тока:  $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$ .

Расчет **несимметричного режима** при  $Z_{\phi} \neq 0$  проводят с использованием эквивалентного преобразования фаз приемника из «треугольника» в «звезду» ( $Z'_a, Z'_b, Z'_c$ ), при этом получают эквивалентную схему для расчета линейных токов, аналогичную соединению «звезда»-«звезда»:



1. Находят **напряжение смещения нейтрали**  $U_{0'0}$ .

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

2. Определяют линейные токи:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{Z_L + Z'_a} = \frac{\underline{U}_{A0'}}{Z'_a}, \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{Z_L + Z'_b} = \frac{\underline{U}_{B0'}}{Z'_b}, \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{Z_L + Z'_c} = \frac{\underline{U}_{C0'}}{Z'_c}.$$

3. Фазные токи в фазах приемника определяют через линейные напряжения приемника:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}'_a \underline{I}_A - \underline{Z}'_b \underline{I}_B, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{Z}'_b \underline{I}_B - \underline{Z}'_c \underline{I}_C, \quad \underline{U}_{ca} = \underline{Z}'_c \underline{I}_C - \underline{Z}'_a \underline{I}_A,$$

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

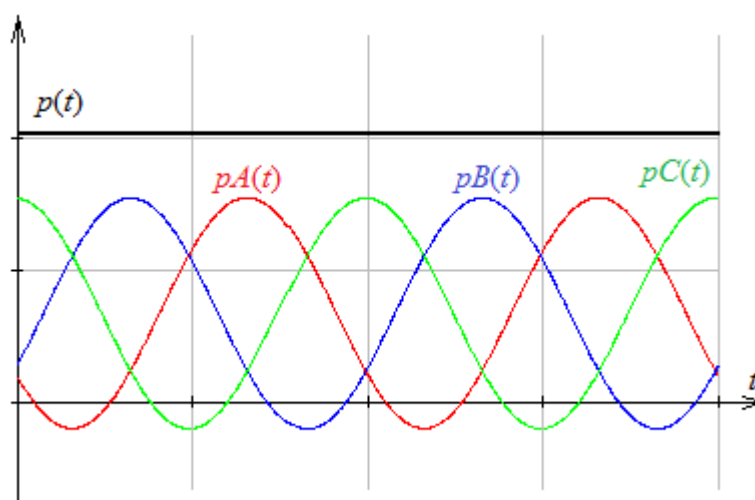
Проверка решения:  $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$

При идеальных проводах линии расчет фазных токов приемника проводят через линейные напряжения источника, а линейные токи находят из фазных по первому закону Кирхгофа.

#### 4.6 Мощность трехфазной цепи

Как известно, 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 при симметричном режиме  $p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = const.$

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.** На рисунке представлены графики мгновенных мощностей отдельных фаз и суммарная мощность в симметричном режиме.



Так как в электроэнергетике чаще имеют дело с линейным напряжением, выразим мощность через линейные токи и напряжения. Так при соединении звездой  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_\phi,$   $I_{\text{л}} = I_\phi,$  то  $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi.$  Здесь  $\varphi$  - угол сдвига фаз между фазным напряжением

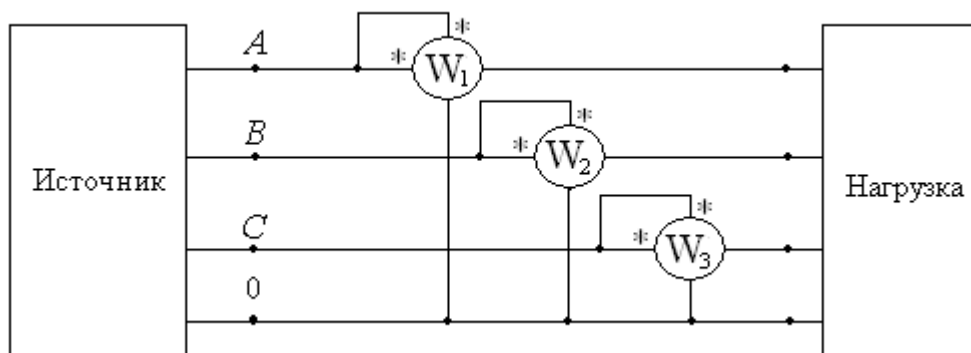
и фазным током. Аналогично определяются реактивная и полная мощности трехфазной цепи:  $Q = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \sin \varphi$  и  $S = \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}}$ .

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

## 4.7 Измерение мощности в трехфазных цепях

### Четырехпроводная система

В четырехпроводной 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 определяет активную мощность одной фазы, активная мощность системы равна сумме показаний всех ваттметров  $P = P_{\text{W}_1} + P_{\text{W}_2} + P_{\text{W}_3}$ .



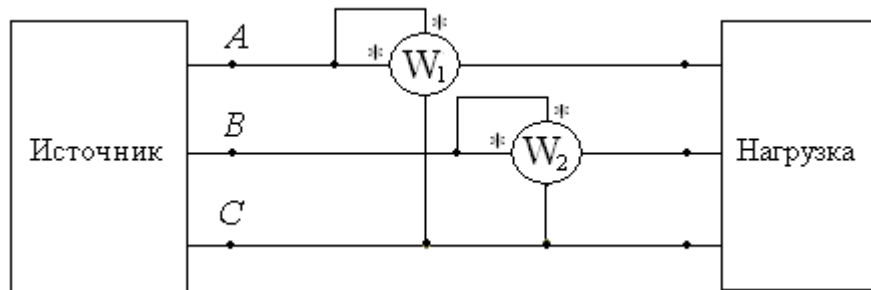
Для симметричной нагрузки активную мощность можно измерять одним ваттметром, включенным в любую фазу. Мощность системы будет равна  $P = 3P_{\text{W}}$ .

### Трехпроводная система

В симметричном режиме измерение активной мощности 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  $P = \sqrt{3}P_{\text{W}}$ .

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<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> 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.

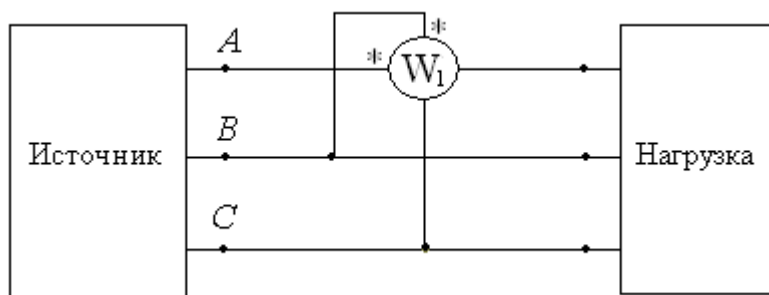


Активная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров  $P = P_{W_1} + P_{W_2}$ . При больших углах сдвига между фазным напряжением и

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.

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 измерения реактивной мощности можно использовать схему с одним ваттметром, при этом  $Q = -\sqrt{3}P$ .



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.