

Министерство науки и высшего образования РФ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторная работа № 9 по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

«Исследование трехфазной цепи»

Выполнил:	
Группа:	
Бригада:	
Подпись студента:	
Дата выполнения:	
Дата защиты:	
Оценка:	
Проверил:	
Подпись преподавателя:	

Москва 2025

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальная проверка соотношений для трехфазного генератора при соединении обмоток по схемам «звезда» и «треугольник» и исследование режимов работы трехфазной цепи при схеме соединения нагрузки «звезда».

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Трехфазной электрической цепью называется совокупность электрических цепей (фаз), в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе.

Термин «фаза» в этих цепях следует понимать также как составную часть трехфазной цепи. Каждая фаза имеет буквенное обозначение. В России фазы обозначаются заглавными буквами A , B , C . Им соответствует общепринятая цветовая маркировка Ж, З, К (желтый, зеленый и красный цвета для фаз A , B , C соответственно). Нулевой провод обозначается буквой N .

В качестве трехфазных источников, как правило, применяются синхронные генераторы. На статоре синхронного генератора расположены три обмотки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 120° . Трехфазные источники конструируются таким образом, чтобы в них индуцировались ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону:

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad e_C = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right).$$

Такая совокупность ЭДС в обмотках трехфазного генератора называется симметричной трехфазной системой ЭДС прямой последовательности (ПП). Ей соответствуют комплексные действующие значения ЭДС фаз:

$$\underline{E}_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ, \quad \underline{E}_B = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \angle -120^\circ, \quad \underline{E}_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \angle 120^\circ.$$

Обмотки генератора соединяются по схемам «звезда» (рис. 1а) или «треугольник» (рис. 2а). Выводам фазных обмоток генератора дают наименования «начало» и «конец». В трехфазных генераторах «начала» обозначаются первыми буквами латинского алфавита A , B и C , а «концы» – последними буквами x , y и z .

Подобным образом соединяются и маркируются вторичные обмотки трехфазных трансформаторов. Обмотки такого трансформатора также можно рассматривать как трехфазный источник ЭДС.

В схеме «звезда» все «концы» фазных обмоток генератора соединяют друг с другом (рис. 1а).

В схеме «треугольник» фазные обмотки генератора подключают друг к другу таким образом, чтобы «начало» одной обмотки соединялось с «концом» другой обмотки: $Ax \rightarrow By \rightarrow Cz \rightarrow A$ (рис. 2а).

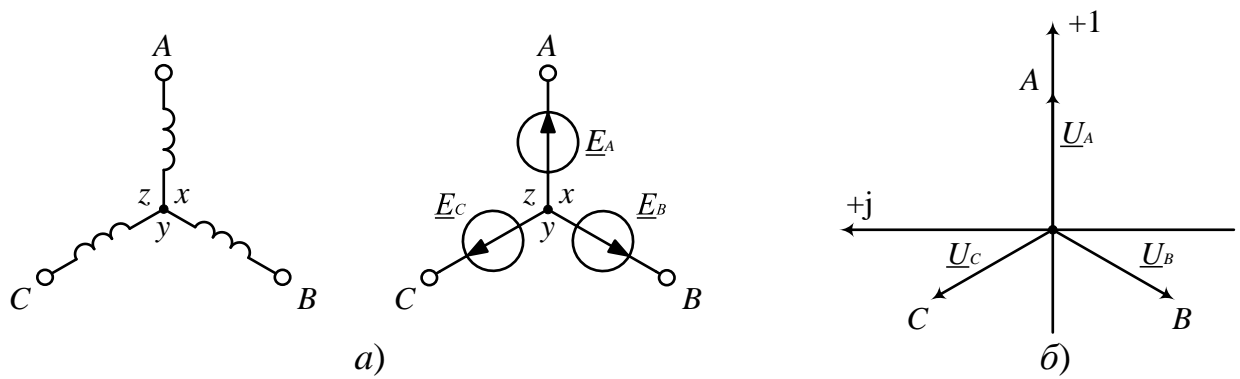


Рис. 1. Соединение обмоток генератора по схеме «звезда»

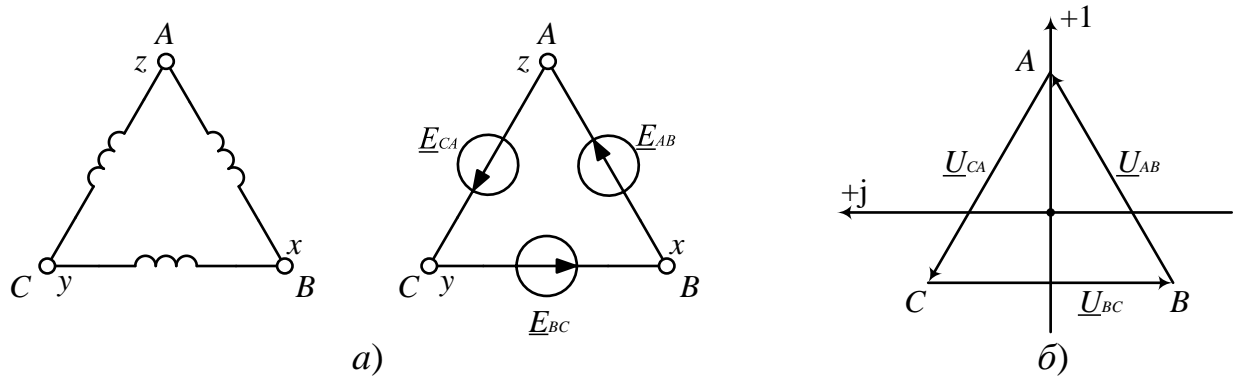


Рис. 2. Соединение обмоток генератора по схеме «треугольник»

Для идеального трёхфазного источника ЭДС справедливы следующие равенства:

$$e_A = u_A, e_B = u_B, e_C = u_C.$$

На рис. 1б и 2б представлены векторные диаграммы напряжений при различных схемах соединения обмоток генератора. Как правило, при использовании комплексной плоскости для задач расчета трехфазных цепей, ее «поворачивают» на 90° против часовой стрелки, чтобы фазное напряжение \underline{U}_A располагалась вертикально.

Трёхфазная нагрузка (приемник) по схеме «звезда» (рис. 3а) или по схеме «треугольник» (рис. 3б) соединяется аналогичным образом.

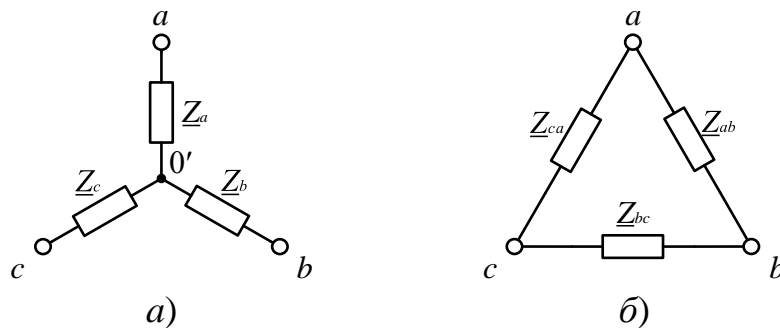


Рис. 3. Схемы соединения нагрузки

Схемы соединения обмоток источников питания и приемников не зависят друг от друга. В одной и той же цепи могут быть источники питания и приемники с разными схемами соединений.

При схеме «звезда» место соединения концов фазных обмоток генератора (приемника) называют нейтральной (нулевой) точкой. Провод, соединяющий нейтральные точки, называют нейтральным (нулевым) проводом. Остальные провода называют линейными (рис. 4а).

Лучи «звезды» или ветви «треугольника» называют фазами, а их сопротивления – фазными сопротивлениями. ЭДС, наводимые в фазных обмотках генератора или трансформатора, напряжения на фазах приемника и токи в них называют соответственно фазными ЭДС, напряжениями и токами. Их действующие значения могут обозначены как E_{ϕ} , U_{ϕ} , I_{ϕ} соответственно.

Напряжения между линейными проводами и токи в них называют линейными напряжениями и токами ($U_{л}$, $I_{л}$).

При соединении фазных обмоток в «звезду» линейные токи равны фазным $I_{л} = I_{\phi}$, а линейные напряжения определяются как разность фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B, \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C, \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{aligned}$$

Напряжение между нулевой точкой нагрузки (т. $0'$) и нулевой точкой источника (т. 0) $\underline{U}_{0'0}$ называется напряжением смещения нейтрали.

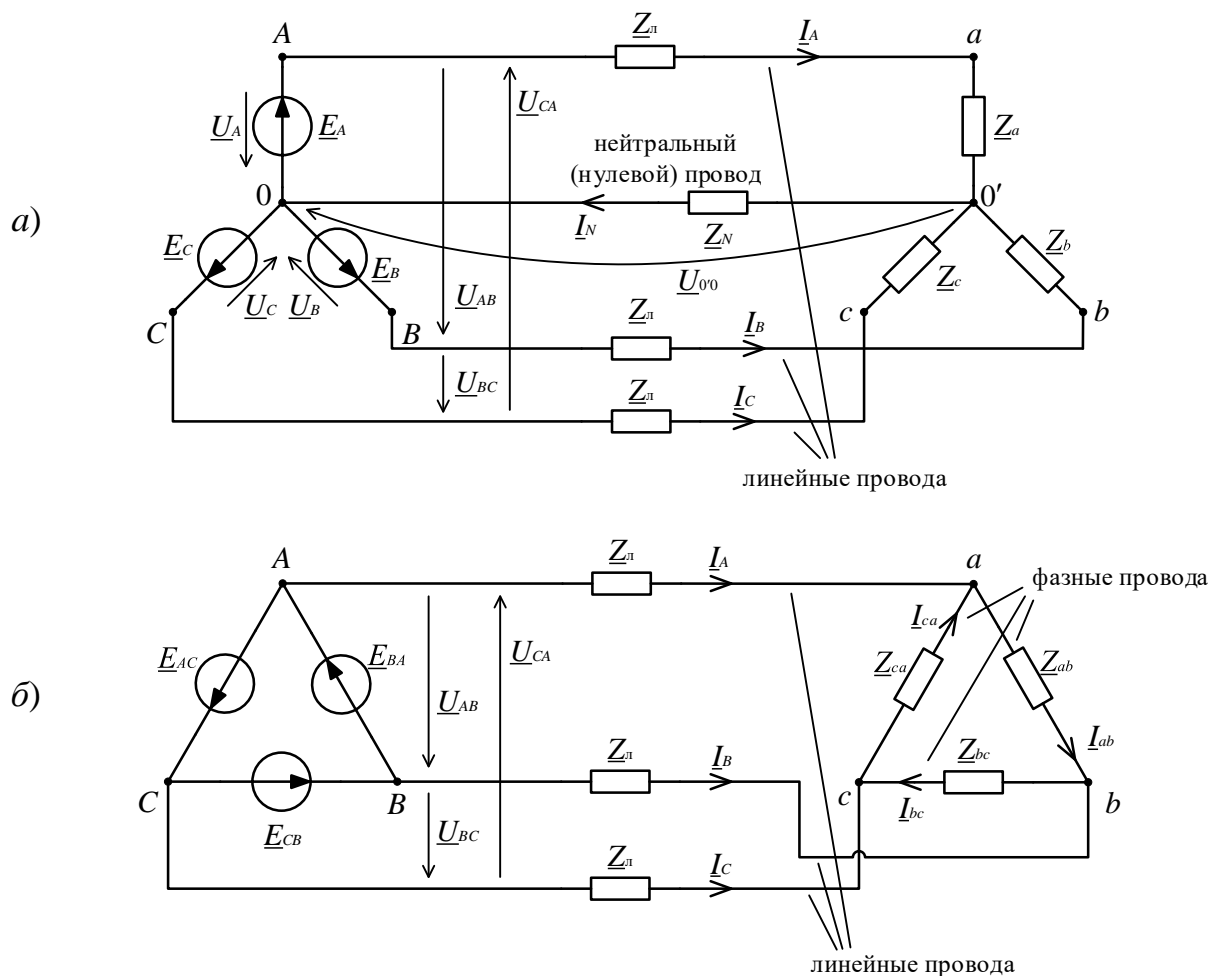


Рис. 4

При соединении фазных обмоток «треугольником» $U_{\phi} = U_{\text{л}}$ (рис. 4б).

Трехфазную нагрузку называют симметричной, если сопротивления ее фаз равны друг другу, то есть $Z_a = Z_b = Z_c$ или $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$.

Если к симметричному трехфазному генератору подключена симметричная трехфазная нагрузка, причем линейные провода имеют равные сопротивления, режим такой цепи называют симметричным. В таком режиме токи фаз сдвинуты друг относительно друга на 120° и равны по модулю.

Для записи величин ЭДС, напряжений и токов в трехфазных цепях используют фазный множитель a^2 :

$$a = 1 \angle 120^\circ,$$

причем $a^2 = 1 \angle 240^\circ$.

Симметричная система ЭДС ПП может быть записана с использованием фазных множителей:

$$\underline{E}_A = E_{\phi} \angle 0^\circ,$$

$$\underline{E}_B = E_{\phi} \angle -120^\circ = a^2 \underline{E}_A,$$

$$\underline{E}_C = E_{\phi} \angle 120^\circ = a \underline{E}_A.$$

При соединении генератора с приемником (нагрузкой) используют четырехпроводное (с нулевым проводом) и трехпроводное (без нулевого провода) соединения.

Симметричные режимы трехфазных цепей и алгоритмы их расчета

1. Четырехпроводная трехфазная цепь.

Для симметричного режима сопротивления приемников в фазах равны, т.е. $Z_a = Z_b = Z_c = Z$, сопротивления проводов $Z_{\text{л}}$ одинаковы (рис. 5а). В таком случае линейные напряжения $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$, т.е. в $\sqrt{3}$ больше фазного.

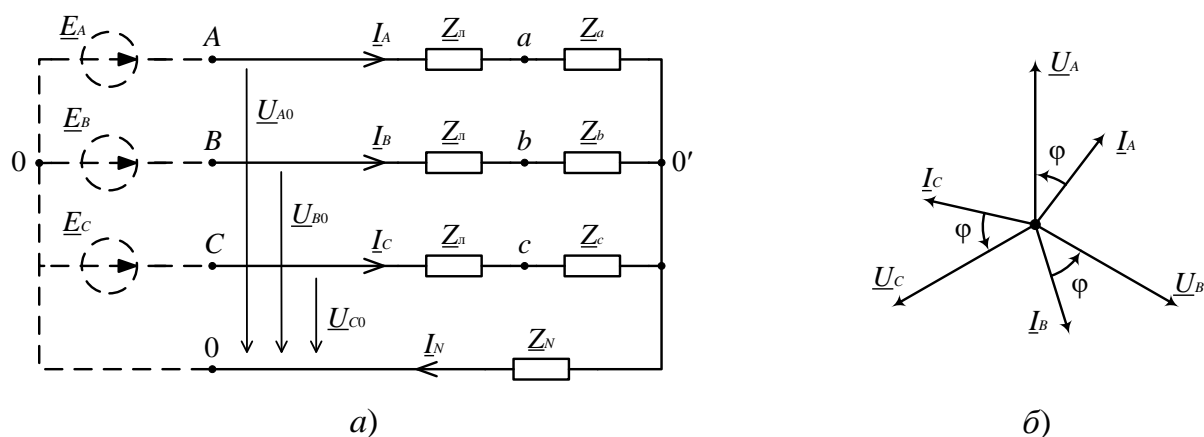


Рис. 5

Для расчета токов в фазах нагрузки (линейных проводах) применяют закон Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_{A0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}, \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_{B0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}, \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{C0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}},$$

где $\underline{U}_{A0} = U_\phi$, $\underline{U}_{B0} = U_\phi \angle -120^\circ$, $\underline{U}_{C0} = U_\phi \angle 120^\circ$. Ток в нейтральном проводнике $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$. На рис. 5б представлена векторная диаграмма для случая, когда сопротивление $\underline{Z} + \underline{Z}_л$ имеет активно-индуктивный характер ($\varphi > 0$).

При этом комплексные токи образуют симметричную тройку векторов:

$$\underline{I}_B = \underline{I}_A \cdot 1 \angle -120^\circ = a^2 \underline{I}_A, \\ \underline{I}_C = \underline{I}_A \cdot 1 \angle 120^\circ = a \underline{I}_A.$$

Фазные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{a0'} = \underline{I}_A \underline{Z}_a = \underline{U}_{A0} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}, \\ \underline{U}_{b0'} = \underline{I}_B \underline{Z}_b = \underline{U}_{B0} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}, \\ \underline{U}_{c0'} = \underline{I}_C \underline{Z}_c = \underline{U}_{C0} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}.$$

Линейные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{a0'} - \underline{U}_{b0'} = (\underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}} = \underline{U}_{AB} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}, \\ \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{b0'} - \underline{U}_{c0'} = (\underline{U}_{B0} - \underline{U}_{C0}) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}} = \underline{U}_{BC} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}, \\ \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{c0'} - \underline{U}_{a0'} = (\underline{U}_{C0} - \underline{U}_{A0}) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}} = \underline{U}_{CA} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}.$$

2. Трехпроводная трехфазная цепи при схеме соединения нагрузки «звезда».

Рассмотрим расчет режима трехпроводной трехфазной цепи при симметричном источнике, соединенном в «звезду».

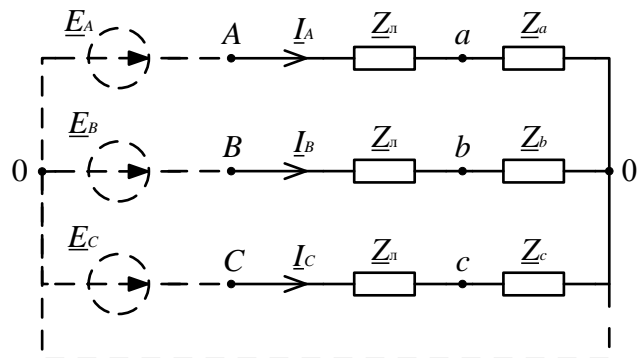


Рис. 6

В силу симметрии ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$) потенциалы узлов 0 и 0' равны, т.е. $\varphi_0 = \varphi_{0'}$. В таком случае на схеме замещения нейтральные точки нагрузки и генератора могут быть соединены короткозамкнутым участком цепи (нижняя пунктирная линия на рис. 6). В результате расчетная схема совпадает с предыдущей (рис. 5а), в которой токи находятся по закону Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_{A0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_{B0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{C0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}.$$

При этом комплексные токи также образуют симметричную тройку векторов.

Фазные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{a0'} = \underline{I}_A \underline{Z}_a = \underline{U}_{A0} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}},$$

$$\underline{U}_{b0'} = \underline{I}_B \underline{Z}_b = \underline{U}_{B0} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}},$$

$$\underline{U}_{c0'} = \underline{I}_C \underline{Z}_c = \underline{U}_{C0} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}.$$

Линейные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{a0'} - \underline{U}_{b0'} = (\underline{U}_{A0} - \underline{U}_{B0}) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}} = \underline{U}_{AB} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}},$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{b0'} - \underline{U}_{c0'} = (\underline{U}_{B0} - \underline{U}_{C0}) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}} = \underline{U}_{BC} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}},$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{c0'} - \underline{U}_{a0'} = (\underline{U}_{C0} - \underline{U}_{A0}) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}} = \underline{U}_{CA} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}}.$$

Примечание. Если источник имеет схему соединения «треугольник», расчет токов и напряжений в остальной части цепи может быть осуществлен путем эквивалентного преобразования трехфазного генератора «треугольник»-«звезда».

Несимметричные режимы трехфазных цепей и методики их расчета

1. Четырехпроводная трехфазная цепь.

Расчет режима для несимметричной нагрузки ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) целесообразно осуществлять в следующем порядке:

1) Находят напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{0'0}$ (рис. 7).

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

где $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_A}$, $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_B}$, $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_C}$, $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$.

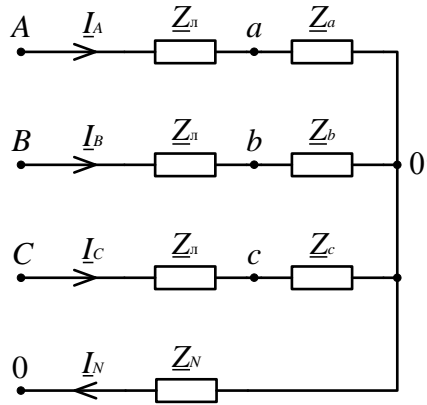


Рис. 7

2) Линейные токи и ток в нейтральном проводе определяются из выражений:

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

Фазные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{a0'} = \underline{I}_A \underline{Z}_a = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a} \underline{Z}_a,$$

$$\underline{U}_{b0'} = \underline{I}_B \underline{Z}_b = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b} \underline{Z}_b,$$

$$\underline{U}_{c0'} = \underline{I}_C \underline{Z}_c = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c} \underline{Z}_c.$$

Линейные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{a0'} - \underline{U}_{b0'} = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a} \underline{Z}_a - \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b} \underline{Z}_b,$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{b0'} - \underline{U}_{c0'} = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b} \underline{Z}_b - \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c} \underline{Z}_c,$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{c0'} - \underline{U}_{a0'} = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c} \underline{Z}_c - \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{0'0}}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a} \underline{Z}_a.$$

Если $\underline{Z}_N \rightarrow 0$, то напряжение смещения нейтрали отсутствует $\underline{U}_{0'0} = 0$. В этом случае токи находятся из выражений:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_a}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_b}, \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_л + \underline{Z}_c}, \quad \underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

2. Трехпроводная трехфазная цепь при схеме соединения нагрузки «звезда».

Схема имеет вид, представленный на рис. 6, но $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$. Порядок расчета соответствует тому, что был представлен несимметричной четырехпроводной системы, но в формулах $\underline{Y}_N = 0$. Напряжение смещения нейтрали в этом случае имеет вид:

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

Токи в фазах, линейные и фазные напряжения на нагрузке определяются аналогичным образом. Сумма линейных токов равна нулю $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В лабораторной работе исследуют трехфазный источник питания с различными схемами соединения обмоток, а также различные режимы трехфазных цепей, нагрузка в которых соединена по схеме «звезда».

Источником симметричного трехфазного напряжения является модуль **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Источник имеет шесть выводов: **1, 2** – «начало» и «конец» обмотки фазы *A* генератора; **3, 4** – «начало» и «конец» обмотки фазы *B* генератора; **5, 6** – «начало» и «конец» обмотки фазы *C* генератора. Действующее значение фазной ЭДС $E_A = E_B = E_C$ устанавливается с помощью регулятора **RP**. Ручка регулятора указывает на действующее значение линейного напряжения генератора при соединении фаз в звезду.

Линейные токи измеряют амперметрами **РА1; РА2; РА3** из блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ 25–250 мА**. Вольтметром **PV (2–15 В)** из блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** или **МУЛЬТИМЕТРОМ PP** измеряют фазные и линейные напряжения. Для измерений в нейтральном проводе используют мультиметр **PP**. Активную мощность в трехпроводной схеме трехфазной цепи измеряют ваттметром модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.

Трехфазную нагрузку собирают из элементов блоков **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ, МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ** и **МОДУЛЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ**.

Замечание. Используемые амперметры **РА1; РА2; РА3** имеют внутреннее сопротивление, которое необходимо учесть при оценке результатов измерений и теоретического расчета. **Перед проведением работы сопротивление амперметров необходимо измерить!**

4. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

4.1. Трехфазный генератор со схемой соединения обмоток «звезда»

Фазное напряжение симметричного источника $U_\phi = 7$ В, генератор в режиме холостого хода. Записать выражения для комплексных действующих значений ЭДС фаз *A*, *B* и *C*. Рассчитать значения линейных напряжений \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} , построить в масштабе векторную диаграмму с указанием векторов фазных и линейных напряжений фаз генератора.

4.2. Трехфазный генератор со схемой соединения обмоток «треугольник»

Фазное напряжение симметричного источника $U_\phi = 3$ В, генератор в режиме холостого хода. Записать выражения для комплексных действующих значений ЭДС фаз *A*, *B* и *C*. Рассчитать значения линейных напряжений \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} , построить в масштабе векторную диаграмму с указанием векторов фазных

(линейных) напряжений фаз генератора.

4.3. Четырехпроводная трехфазная цепь

Фазное напряжение источника $U_{\phi}=7$ В, генератор и нагрузка соединены в «звезду», нейтральный провод – идеальный. Рассчитать токи, построить векторные диаграммы токов и напряжений (в масштабе) для следующих режимов:

а) *Симметричный режим.*

Сопротивления резистивной нагрузки в фазах $R_A=R_B=R_C=150$ Ом.

б) *Обрыв фазы* одного линейного провода в соответствии с табл. 1; сопротивления нагрузок остальных фаз не изменяются.

Таблица 1

Номер бригады	Обрыв фазы	Короткое замыкание фазы
1,7	A	C
2,8	C	A
3,9	A	A
4,10	C	C
5,11	C	A
6,12	A	C

в) *Несимметричный режим.*

- Сопротивления резистивной нагрузки в фазах заданы в табл. 2.
- В одной из фаз – реактивная нагрузка (табл. 3).

Таблица 2

Номер бригады	Нагрузка в фазе А	Нагрузка в фазе В	Нагрузка в фазе С
1,7	$R_A=68$ Ом	$R_B=150$ Ом	$R_C=150$ Ом
2,8	$R_A=150$ Ом	$R_B=68$ Ом	$R_C=150$ Ом
3,9	$R_A=150$ Ом	$R_B=150$ Ом	$R_C=68$ Ом
4,10	$R_A=330$ Ом	$R_B=150$ Ом	$R_C=150$ Ом
5,11	$R_A=150$ Ом	$R_B=330$ Ом	$R_C=150$ Ом
6,12	$R_A=150$ Ом	$R_B=150$ Ом	$R_C=330$ Ом

Таблица 3

Номер бригады	В фазе А	В фазе В	В фазе С
1	$L=0,13$ Гн	$R=68$ Ом	$R=68$ Ом
2	$R=68$ Ом	$L=0,13$ Гн	$R=68$ Ом
3	$R=68$ Ом	$R=68$ Ом	$L=0,13$ Гн
4	$C=56$ мкФ	$R=47$ Ом	$R=47$ Ом
5	$R=47$ Ом	$C=56$ мкФ	$R=47$ Ом
6	$R=47$ Ом	$R=47$ Ом	$C=56$ мкФ
7	$L=0,13$ Гн	$R=47$ Ом	$R=47$ Ом
8	$R=47$ Ом	$L=0,13$ Гн	$R=47$ Ом
9	$R=47$ Ом	$R=47$ Ом	$L=0,13$ Гн
10	$C=56$ мкФ	$R=68$ Ом	$R=68$ Ом
11	$R=68$ Ом	$C=56$ мкФ	$R=68$ Ом
12	$R=68$ Ом	$R=68$ Ом	$C=56$ мкФ

4.4. Трехпроводная трехфазная цепь

Фазное напряжение источника $U_{\phi}=7$ В, генератор и нагрузка соединены в «звезду». Рассчитать токи, напряжение смещения нейтрали, напряжения на фазах приемника $U_{A0'}$, $U_{B0'}$, $U_{C0'}$. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

а) *Симметричный режим.*

Сопротивления резистивной нагрузки в фазах $R_A=R_B=R_C=150$ Ом.

б) *Обрыв фазы* одного линейного провода в соответствии с табл. 1; сопротивления нагрузок остальных фаз не изменяются.

в) *Короткое замыкание фазы* в соответствии с табл. 1; сопротивления нагрузок остальных фаз не изменяются.

г) *Несимметричный режим.*

- Сопротивления резистивной нагрузки в фазах заданы в табл. 2.
- В одной из фаз – реактивная нагрузка (табл. 3).

4.5. Измерение активной мощности трехпроводной трехфазной цепи

Нарисовать схему для измерения активной мощности трехпроводной трехфазной цепи двумя ваттметрами (см. Приложение 2). Для пунктов 3.4 а) и г) рассчитать активную мощность приемника и показания ваттметров. Составить баланс активных мощностей.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА СТУДЕНТОВ К РАБОТЕ

1. Обозначить на схеме рис. 3П линейные и фазные токи и напряжения. Как измерить эти величины?

2. Рассказать последовательность выполнения измерений в цепи на рис. 3П при различных режимах работы четырехпроводной трехфазной цепи: в симметричном режиме, при обрыве фазы нагрузки, в несимметричных режимах с резистивной и реактивной нагрузкой.

3. Рассказать последовательность выполнения измерений в цепи на рис. 3П при различных режимах работы трехпроводной трехфазной цепи: в симметричном режиме, при обрыве фазы нагрузки, в режиме короткого замыкания, в несимметричных режимах с резистивной и реактивной нагрузкой.

4. Как осуществляется определение порядка чередования фаз в трехпроводной трехфазной цепи?

5. Как измерить активную мощность в трехпроводной трехфазной цепи при помощи двух ваттметров?

6. Как наличие нейтрального провода влияет на режимы работы трехфазной цепи?

6. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Проверка правильности разметки фаз Определение «начал» и «концов» фаз источника

Примечание. Перед выполнением данного пункта рабочего задания рекомендуется ознакомиться с теоретическим материалом в Приложении 1.

- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- Регулятором напряжения **RP** установить фазное напряжение трехфазного источника питания (U_{12}) равным 7 В (проверить подключением вольтметра **PV** к клеммам **1** и **2**).

- Вольтметром **PV** измерить фазные напряжения U_{12} , U_{34} , U_{56} модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Измеренные значения занести в протокол измерений. Убедиться, что измеренные напряжения равны.

- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- Собрать трехфазный генератор модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** по схеме «звезда», соединив произвольно по одному из выводов каждой фазы источника в нейтральную точку (к примеру, выводы **2-3-6**, как показано на рис. 7). Изобразите схему выбранного соединения, дополнив соединительными линиями рис. 1Па.

- Включить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- Вольтметром **PV** измерить линейные напряжения между оставшимися выводами модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Измеренные значения занести в протокол измерений.

- Начертить одну из возможных ТДН трехфазного генератора с указанием положения точек **1, 2, 3, 4, 5, 6** соответствующих выводам модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- По ТДН определить, соответствует ли выбранное соединение выводов трехфазного источника питания соединению симметричного источника по схеме «звезда» (см. теоретическую справку). Если указанное условие не выполняется, изменить схему соединения выводов источника таким образом, чтобы схема соединения соответствовала соединению симметричного трехфазного источника по схеме «звезда», предварительно выключив тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- Включить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- Вольтметром **PV** измерить линейные напряжения между оставшимися выводами модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Измеренные значения занести в протокол измерений. Убедиться, что измеренные напряжения равны.

- Сделать вывод о том, какие клеммы модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)** соответствуют началам и концам фаз источника. Результат занести в протокол измерений.

- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

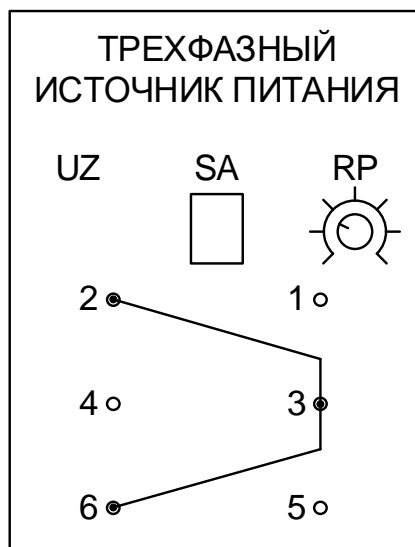


Рис. 7

Определение порядка чередования фаз

- Подключить трехфазный источник питания модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)** к фазоуказателю, собранному по схеме рис. 14.
- Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** значения резистивных сопротивлений фаз $R_2=R_3=150$ Ом. В фазе *A* (фаза *A* генератора выбирается произвольно) включить конденсатор емкостью $C=22$ мкФ из блока **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**. Включить тумблер **SA** модуля питания.
- Выполнить измерения линейных токов. Измеренные значения занести в табл. 1П. Выключить тумблер **SA** модуля питания.
- Выключить тумблеры **SA** модулей **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.
- По результатам измерений поставить в соответствие выводам модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ 1, 2, 3, 4, 5, 6**, принятую маркировку фаз генератора (*A, B, C, x, y, z*), заполнив пропуски на рис. 2Па.
- Зарисовать ТДН собранного трехфазного источника питания с указанием положения точек *A, B, C, x, y, z*.

Исследование трехфазного источника, соединенного «звездой», в режиме холостого хода

- Собрать трехфазный генератор модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** по схеме «звезда» (рис. 8а). Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **SA** и **SA1** модулей **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)** и **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.
- Регулятором напряжения **RP** установить фазное напряжение трехфазного источника питания U_{A0} (соответствует напряжению U_{12} в обозначениях выводов источника на стенде) равным 7 В (проверить подключением вольтметра **PV** по схеме рис. 8а).

- Вольтметром **PV** измерить фазные напряжения U_{A0} , U_{B0} , U_{C0} (в дальнейшем U_A , U_B , U_C) и линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Измеренные значения занести в протокол измерений. Проверить выполнения соотношений для симметричного источника.

- Использовать прибор **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** для измерения комплексных напряжений (потенциалов) \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C источника. Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 8б. Тумблер **SA2** модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** установить в положение **U2**. Провести измерение комплексных потенциалов \underline{U}_B и \underline{U}_C , приняв $\underline{U}_A = U_A \angle 0$.

- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

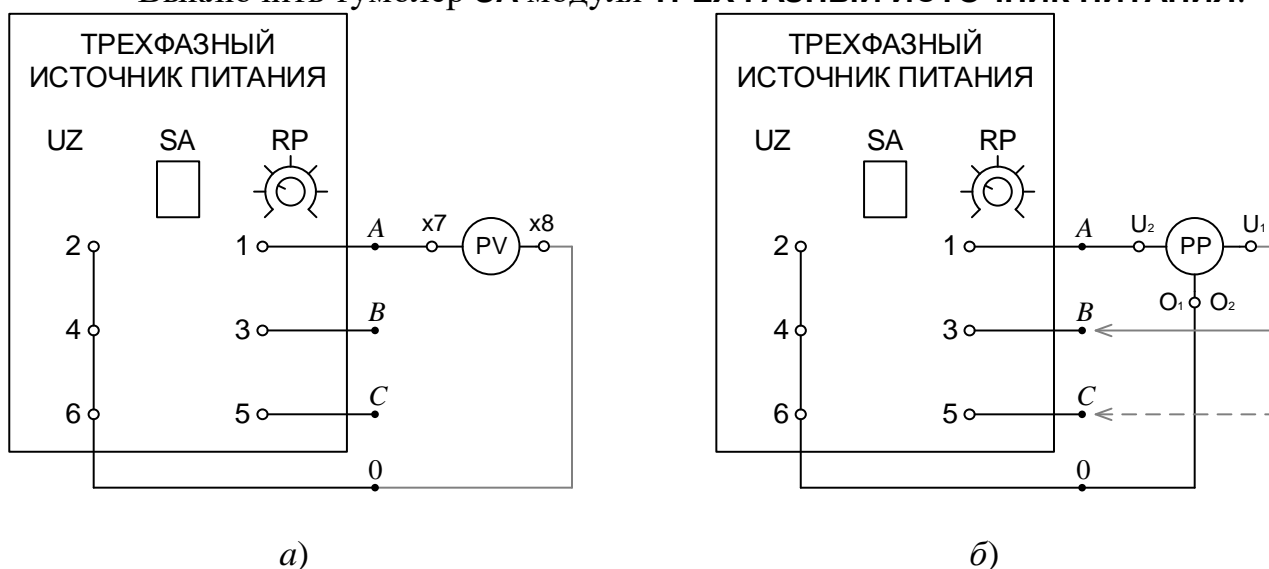


Рис. 8. Схема соединения генератора «звезда»

Исследование трехфазного источника, соединенного треугольником, в режиме холостого хода

- Собрать трехфазный генератор модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** по схеме «треугольник» (рис. 9). Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.

- Регулятором напряжения **RP** установить линейное (фазное) напряжение трехфазного источника питания U_{AB} (соответствует напряжению U_{13} в обозначениях выводов источника на стенде) равным 3 В (проверить подключением мультиметра **PP** в режиме измерения переменного напряжения по схеме рис. 9).

- Мультиметром **PP** в режиме измерения переменного напряжения измерить линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Измеренные значения занести в протокол измерений. Проверить выполнения соотношений для симметричного источника.

- Мультиметром **PP** в режиме измерения переменного тока измерить фазный ток генератора, соединенного треугольником, в режиме холостого

хода модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**. Измеренные значения занести в протокол измерений. Проверить выполнения соотношений для симметричного источника.

- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

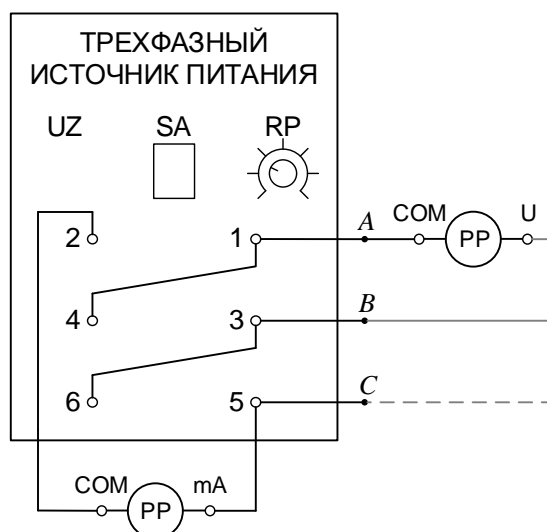


Рис. 9. Схема соединения генератора треугольником

Четырехпроводная трехфазная цепь

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 3П. Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** значения резистивных сопротивлений $R_A=R_B=R_C=150$ Ом. Мультиметр **PP** в нейтральном проводе включить в режим измерения переменного тока.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **SA** и **SA1** модулей **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** и **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**. Тумблер **SA2** модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** установить в положение **I2**.

- Регулятором напряжения **RP** установить фазное напряжение трехфазного источника питания U_A равным 7 В (проверить подключением вольтметра **PV**).

- *Симметричный режим.* Измерить амперметрами **PA1**, **PA2** и **PA3** токи фаз. Вольтметром **PV** измерить фазные напряжения на приемнике $U_{AO'}$, $U_{BO'}$, $U_{CO'}$. Рассчитать сопротивления фаз. Ток в нейтральном проводе измерить мультиметром **PP**. Измеренные значения напряжений, токов и величины сопротивлений фаз занести в табл. 2П протокола измерений. *Указанный порядок действий применить в остальных опытах.*

- *Обрыв фазы.* Провести опыт с обрывом линейного провода одной из фаз (табл. 1). Выполнить измерения и занести их в табл. 1П. Восстановить цепь.

- *Несимметричный режим при резистивной нагрузке.* Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** значения сопротивлений резисторов R_A , R_B , R_C в соответствии с данными табл. 2. Выполнить измерения, данные занести в табл. 2П.

- *Несимметричный режим при реактивной нагрузке.* Выбрать нагрузку на фазу в соответствии с данными табл. 2 из **МОДУЛЯ РЕЗИСТОРОВ (R)**, **МОДУЛЯ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (C)** и **МОДУЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО (L_a)**. Выполнить измерения, данные занести в табл. 2П.

- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

Трехпроводная трехфазная цепь

- Переключить мультиметр **PP** в нейтральном проводе на режим измерения переменного напряжения. Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** значения резистивных сопротивлений фаз $R_A=R_B=R_C=150$ Ом.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Включить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

- *Симметричный режим.* Выполнить приборами **PA1**, **PA2** и **PA3** измерения токов фаз. Вольтметром **PV** (2–15 В) измерить фазные напряжения на приемнике $U_{A0'}$, $U_{B0'}$, $U_{C0'}$; мультиметром **PP** – напряжение смещения нейтрали $U_{0'0}$. Рассчитать сопротивления фаз. Измеренные значения напряжений и токов фаз занести в табл. 3П. протокола измерений. *Указанный порядок действий применять в остальных режимах трехпроводной цепи.*

- Ваттметром модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** определить показания P_1 при включение токовой цепи модуля в линию *A*, затем P_2 при включении токовой цепи модуля в линию *C*. Измеренные значения занести в табл. 3П.

- *Обрыв фазы.* Провести опыт с обрывом линейного провода одной из фаз (табл. 1). Выполнить измерения токов и напряжений и занести данные в табл. 2П. Восстановить цепь.

- *Короткое замыкание фазы.* Закоротить фазу *A* или *C* (табл. 1), где включена токовая цепь модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** (соединить проводом точки **I2** и **0'**). Для измерения *тока короткого замыкания* использовать амперметр модуля. Измерения остальных токов и напряжений выполнить согласно данным выше рекомендациям. Измеренные значения занести в табл. 3П. Восстановить цепь.

- *Несимметричный режим при резистивной нагрузке.* Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** сопротивления R_A , R_B , R_C в соответствии с данными табл. 2. Выполнить измерения токов, напряжений и мощностей. Измеренные значения занести в табл. 3П.

- *Несимметричный режим при реактивной нагрузке.* Выбрать нагрузку в фазу в соответствии с данными табл. 2 из **МОДУЛЯ РЕЗИСТОРОВ (R)**, **МОДУЛЯ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (C)** и **МОДУЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО (L_a)**. Выполнить измерения токов, напряжений и мощностей. Измеренные значения занести в табл. 3П.

- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

- Протокол измерений утвердить и подписать у преподавателя.

7. ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 9

Проверка правильности разметки фаз

Фазные напряжения источника: $U_{12} = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $U_{34} = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $U_{56} = \underline{\hspace{1cm}}$ В.

Проверка соотношения $U_{12} = U_{34} = U_{56} = \underline{\hspace{1cm}}$ В.

ТРЕХФАЗНЫЙ
ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

UZ	SA	RP
2 ◦		1 ◦
4 ◦		3 ◦
6 ◦		5 ◦

a) б)

Рис. 1П

Линейные напряжения (опыт): $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В.

Линейные напряжения (проверка): $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В; $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В.

Проверка соотношения $U_{\underline{\hspace{1cm}}} = U_{\underline{\hspace{1cm}}} = U_{\underline{\hspace{1cm}}} = \underline{\hspace{1cm}}$ В.

Начала фаз: ; концы фаз: .

За вывод фазы *A* принимается вывод .

Таблица 1П

Режим работы трехфазной цепи	$I_{л1}, \text{мА}$	$I_{л2}, \text{мА}$	$I_{л3}, \text{мА}$
фаза клеммы <u> </u> (A): $C=22 \text{ мкФ}$			
фаза клеммы <u> </u> : $R=150 \text{ Ом}$			
фаза клеммы <u> </u> : $R=150 \text{ Ом}$			

ТРЕХФАЗНЫЙ
ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

UZ	SA	RP
2 ◦ (<u> </u>)		1 ◦ (<u> </u>)
4 ◦ (<u> </u>)		3 ◦ (<u> </u>)
6 ◦ (<u> </u>)		5 ◦ (<u> </u>)

a) б)

Рис. 2П

Исследование трехфазного источника, соединенного звездой, в режиме

ХОЛОСТОГО ХОДА

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 8а, б.

Напряжения источника: $U_A = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_B = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_C = \underline{\hspace{2cm}}$ В;
 $U_{AB} = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_{BC} = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_{CA} = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

Проверка соотношения $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\Phi}$, $\underline{\hspace{4cm}}$.

Комплексные фазные напряжения источника:

$\underline{U}_A = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $\underline{U}_B = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $\underline{U}_C = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

Исследование трехфазного источника, соединенного треугольником, в режиме холостого хода

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 9.

Напряжения источника: $U_{AB} = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_{BC} = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_{CA} = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

Ток в фазах источника: $I_{\Phi} = \underline{\hspace{2cm}}$ мА.

Проверка соотношения $I_{\Phi} = 0$, $\underline{\hspace{4cm}}$.

Четырехпроводная трехфазная цепь

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 3П.

Напряжения источника: $U_A = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_B = \underline{\hspace{2cm}}$ В; $U_C = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

Сопротивления амперметров: $\underline{\hspace{4cm}}$

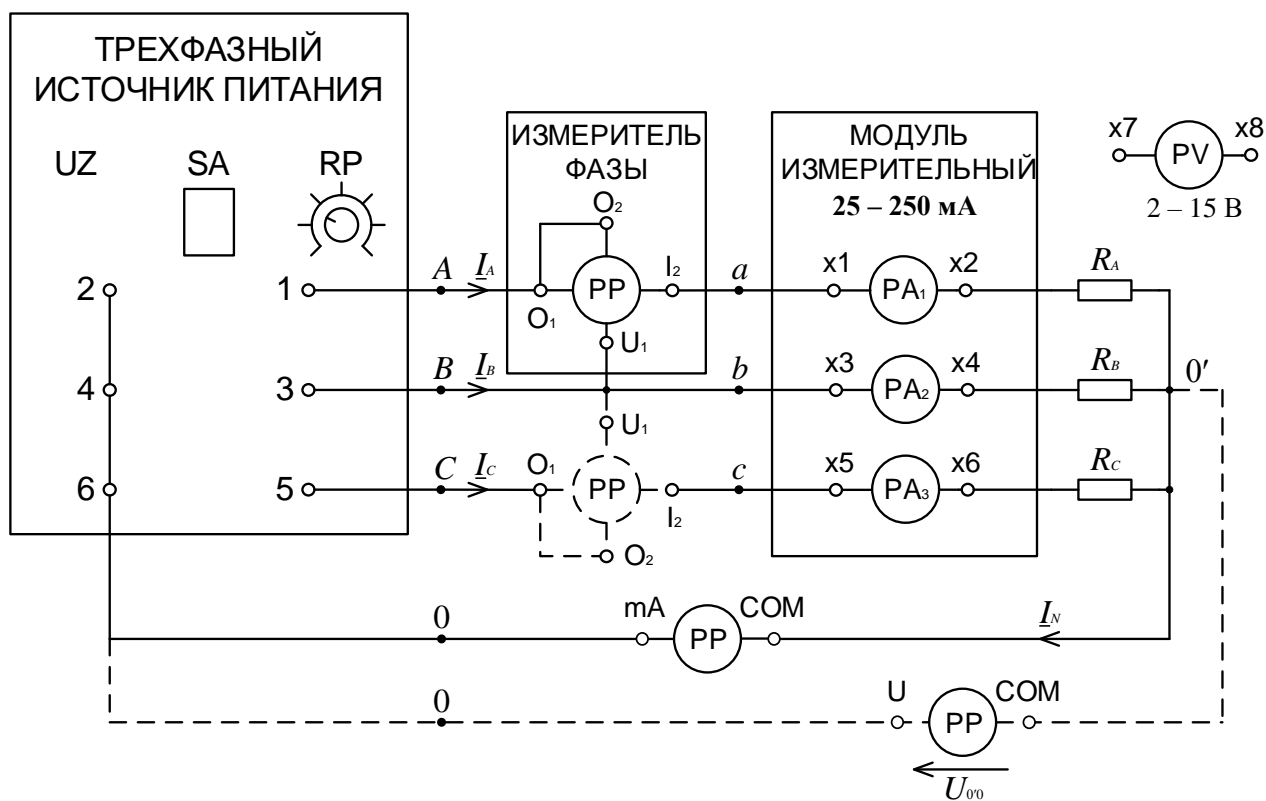


Рис. 3П

Результаты измерений представлены в табл. 2П.

Таблица 2П

Режим работы трехфазной цепи	$U_{A0'}$, В	$U_{B0'}$, В	$U_{C0'}$, В	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_N , мА
Симметричный $R_A=R_B=R_C=$ Ом							
Обрыв фазы фаза А фаза В фаза С							
Несимметричный $R_A=$ Ом, $R_B=$ Ом, $R_C=$ Ом							
Несимметричный с реактивной нагрузкой фаза А фаза В фаза С							

Трехпроводная трехфазная цепь

Результаты измерений представлены в табл. 3П.

Таблица 3П

Режим работы трехфазной цепи	$U_{A0'}$, В	$U_{B0'}$, В	$U_{C0'}$, В	$U_{0'0}$, В	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	P_1 , Вт	P_2 , Вт
Симметричный $R_A=R_B=R_C=$ Ом									
Обрыв фазы фаза А фаза В фаза С								—	—
Короткое замыкание фазы фаза А фаза В фаза С								—	—
Несимметричный $R_A=$ Ом, $R_B=$ Ом, $R_C=$ Ом									
Несимметричный с реактивной нагрузкой фаза А фаза В фаза С									

8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Корректно оформленная подготовка к работе.
2. Нарисовать схемы замещения трехфазной цепи для каждого опыта, указав положительные направления токов. По результатам измерений (табл. 1П, 2П и 3П) построить топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов для каждого режима четырехпроводной и трехпроводной трехфазной цепи. Сравнить с диаграммами из подготовки к работе.

Примечание. Векторная диаграмма для несимметричного режима трехпроводной цепи при реактивной нагрузке строится по указанию преподавателя.

3. Рассчитать активную мощность трехпроводной цепи в симметричном и несимметричном режимах, сравнить с результатами измерений. Проверить выполнение выражения $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi$ в симметричном режиме.
4. Сделать письменный вывод о проделанной работе.

9. ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Приведите основные соотношения в трехфазной системе с соединением фазных обмоток источника и нагрузки звездой с нулевым проводом и без него.
2. Будут ли отличаться результаты эксперимента, если в нулевом проводе в качестве измерительного прибора будет использован стрелочный амперметр с внутренним сопротивлением порядка 10 Ом? Как учесть при расчете внутреннее сопротивление амперметра?
3. Как проводится измерение активной мощности трехфазной системы при наличии нулевого провода?
4. Проведите расчет активной мощности трехпроводной системы при обрыве одной фазы по опытным данным и сравните результат с теоретическим расчетом по показаниям ваттметров.
5. Проведите расчет активной мощности трехпроводной системы при несимметричной резистивной нагрузке по опытным данным и сравните результат с теоретическим расчетом по показаниям ваттметров.
6. Проведите расчет активной мощности трехпроводной системы при реактивной нагрузке в одной фазе по опытным данным и сравните результат с теоретическим расчетом по показаниям ваттметров.
7. Для каких трехфазных систем можно применить измерение активной мощности методом двух ваттметров? Почему?
8. Приведите схему подключения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной системы при обрыве одной фазы; рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров; рассчитайте активную мощность по опытным данным; сравните результаты.
9. Приведите схему подключения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной системы при коротком замыкании одной фазы; рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров; рассчитайте активную мощность по опытным данным; сравните результаты.
10. Приведите схему подключения двух ваттметров для измерения

активной мощности трехфазной системы при несимметричной резистивной нагрузке; рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров; рассчитайте активную мощность по опытным данным; сравните результаты.

11. Приведите схему подключения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной системы при реактивной нагрузке в одной фазе; рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров; рассчитайте активную мощность по опытным данным; сравните результаты.

12. Как используют фазоуказатель? Как изменятся результаты эксперимента, если вместо емкостной нагрузки использовать индуктивную нагрузку ($X_L=X_C$)?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Разметка «начал» и «концов» фазных обмоток генератора

В том случае, если выводы трехфазного источника питания не промаркированы, возникает задача определения выводов фаз *A, B, C*.

Подход к маркировке фаз генератора может быть продемонстрирован на следующем примере.

Пусть измеренные в схеме (рис. 10) фазные напряжения оказались равны $U_{12} = U_{34} = U_{56} = 12,7$ В. После соединения фаз источника в звезду, как показано на рис. 11 измеренные между оставшимися клеммами напряжения оказались равны $U_{16} = U_{36} = 12,7$ В и $U_{13} = 22$ В. Такие значения напряжений не соответствуют линейным напряжениям симметричной системы ЭДС генератора, собранного по схеме «звезда». Построив одну из возможных топографических диаграмм напряжений, можно выяснить, клеммы какой из фазных обмоток следует поменять местами для получения симметричной тройки напряжений.

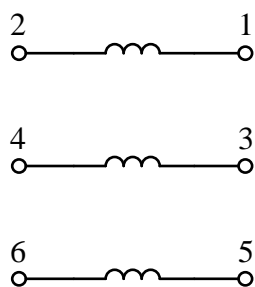


Рис. 10

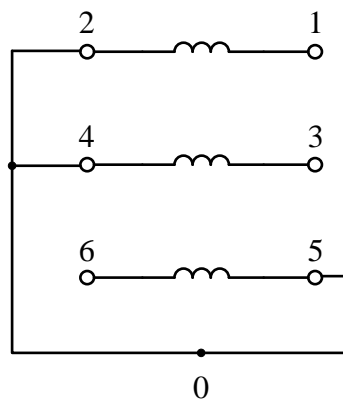


Рис. 11

Примем условно обмотку 1-2 за фазу *A*, расположив вектор напряжения \underline{U}_{12} вертикально. Диаграмма в этом случае имеет вид несимметричной звезды (рис. 12). Для получения симметричной тройки векторов фазных напряжений источника, необходимо соединить между собой клеммы 2, 4, 6 (вместо клемм 2, 4, 5). Такому соединению соответствует диаграмма напряжений, показанная на рис. 13. Все три линейные напряжения в соответствии с ней равны между собой $U_{13} = U_{35} = U_{51} = 22$ В. Следовательно, можно утверждать, что клеммы 1, 3, 5 являются, например, началами фазных обмоток, а 2, 4, 6 – их концами.

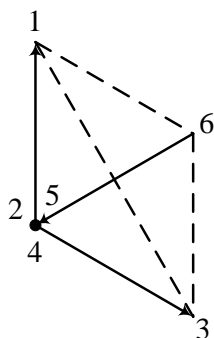


Рис. 12

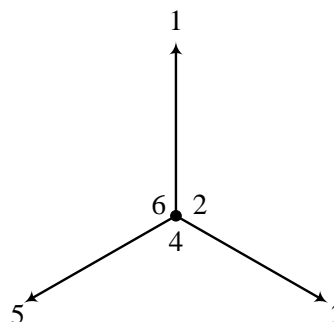


Рис. 13

Следующим этапом в маркировке выводов трехфазного источника питания является определение фаз A , B , C . Для решения данной задачи используют специальный прибор, называемый фазоуказателем.

Схема замещения фазоуказателя представлена на рис. 14. Сопротивления емкостного элемента X_C и резисторов R_2 , R_3 выбираются равными друг другу, то есть $R_2=R_3=X_C$.

Обмотки генератора присоединяют к фазоуказателю, как это показано на рис. 14, приняв, например, обмотку 1-2 за фазу A . Заметим, что за фазу A можно принять любую другую обмотку. Оставшиеся клеммы генератора 3, 5 подсоединяются произвольно к клеммам Φ_2 , Φ_3 фазоуказателя, например, 3 – к Φ_2 , 5 – к Φ_3 .

В трехфазной цепи (рис. 14) фазоуказатель представляет собой несимметричную нагрузку. Вследствие этого напряжения на резисторах R_2 и R_3 не равны друг другу, что позволяет определить расположение фаз B и C по показаниям амперметров A_2 и A_3 . Фаза B источника в таком случае подключена к тому из двух амперметров, показание которого больше.

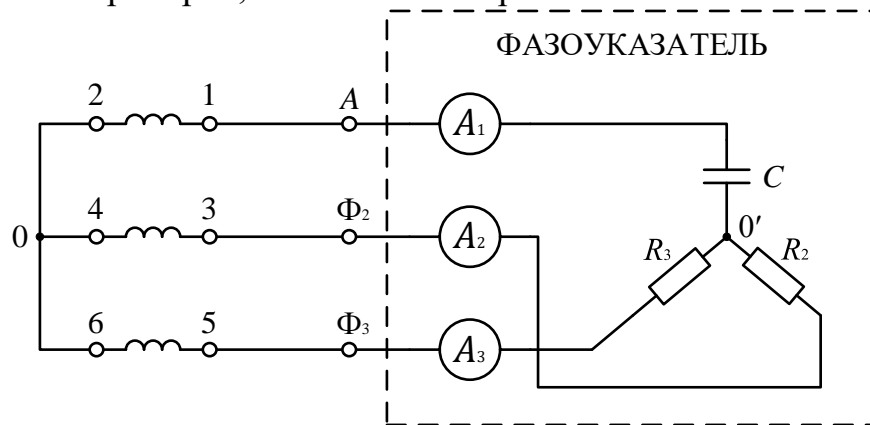


Рис. 14. Схема замещения фазоуказателя

Для обоснования указанного факта используется топографическая диаграмма напряжений цепи.

В общем виде рассчитывается напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{0'0}$ с учетом $R_2=R_3=X_C=R$, $\underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A$, $\underline{E}_C = a \underline{E}_A$. По формуле двух узлов:

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\frac{\underline{E}_A}{-jX_C} + \frac{\underline{E}_B}{R} + \frac{\underline{E}_C}{R}}{\frac{1}{-jX_C} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{\underline{E}_A (j + a^2 + a)}{\frac{1}{R} (j + 1 + 1)} = \underline{E}_A \frac{-1 + j}{2 + j} = 0,63 \underline{E}_A \angle 108^\circ \text{ В.}$$

Такому напряжению $\underline{U}_{0'0}$ соответствует положение точки $0'$, представленное на ТДН (рис. 15) (принимается, что $\underline{E}_A = E_A \angle 0^\circ \text{ В}$). Как видно из диаграммы, модуль напряжения $\underline{U}_{B0'}$ больше, чем $\underline{U}_{C0'}$, поэтому при указанном подключении (рис. 14) в соответствии с законом Ома положение фазы B действительно может быть определено через сравнение показаний амперметров A_2 и A_3 .

Таким образом, если $I_{A2} > I_{A3}$, то выводу фазы B соответствует клемма 3

генератора, а выводу фазы C – клемма 5; иначе, если $I_{A2} < I_{A3}$, – наоборот (B – 5, C – 3).

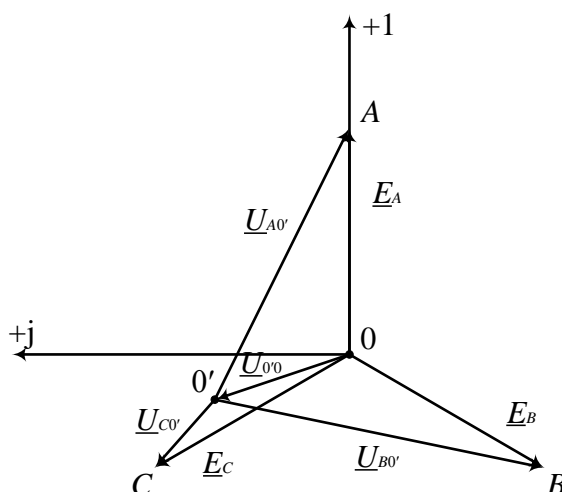
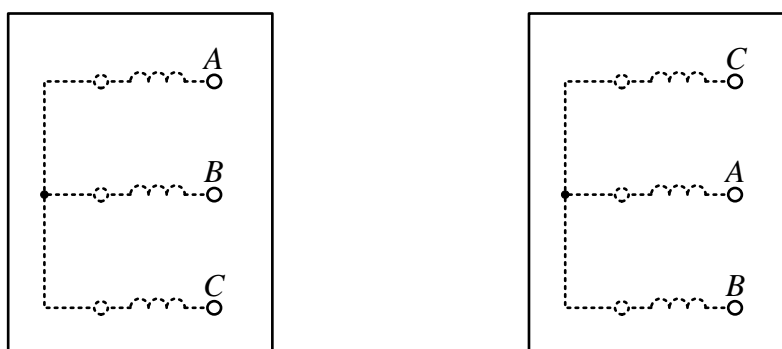


Рис. 15

Примечание. На практике при определении чередования фаз решается вопрос о порядке следования комплексных напряжений на векторной диаграмме друг за другом. К примеру, расположения фаз A, B, C и C, A, B (рис. 16) соответствуют их одинаковому чередованию.

Маркировка выводов трехфазного источника



Порядок чередования фаз

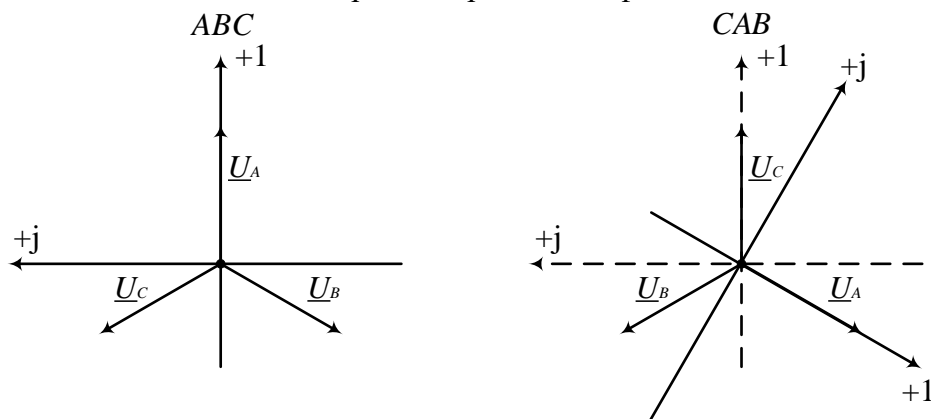


Рис. 16

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Измерение мощностей в трехфазных трехпроводных цепях

В трехпроводной трехфазной цепи для измерения активной мощности применяют схему двух ваттметров (рис. 17). Данная схема применима как для симметричной, так и для несимметричной трехфазной цепи.

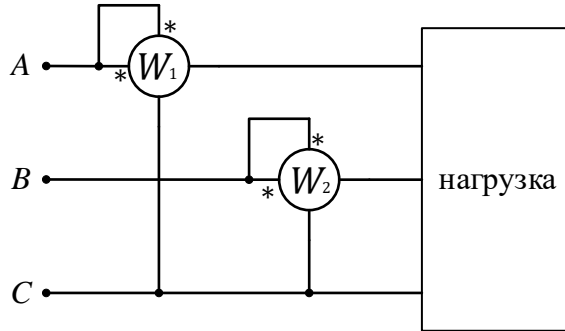


Рис. 17

Активная мощность нагрузки в таком случае равна алгебраической сумме показаний ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2}.$$

Измерить активную мощность с помощью двух ваттметров можно и иным образом (рис. 18).

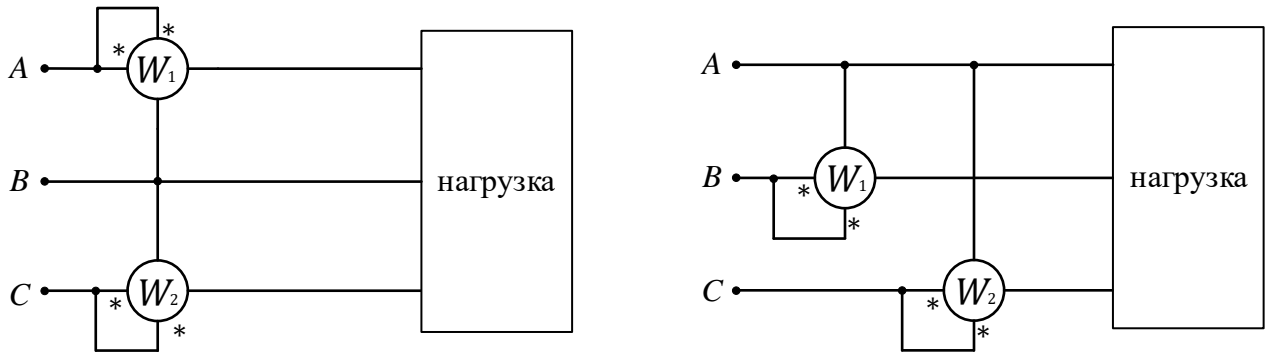


Рис. 18