

Министерство науки и высшего образования РФ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

**Лабораторная работа № 9
по дисциплине «Теоретические основы электротехники»**

**Исследование трехфазной цепи
с соединением фаз приемника звездой»**

Студент:	
Группа:	
Преподаватель:	

Москва 2026

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальная проверка соотношений для трехфазного генератора при соединении его фазных обмоток по схемам «звезда» и «треугольник», исследование симметричного и несимметричного режимов работы трехфазной цепи с соединением фаз приемника «звездой».

2. КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Трехфазная электрическая цепь; фазные и линейные напряжения (токи); схема соединения «звезда»; схема соединения «треугольник»; трехпроводная (четырёхпроводная) система; нейтральная (нулевая) точка; нейтральный (нулевой) провод; симметричная (несимметричная) трехфазная цепь; измерение мощностей в трехфазных цепях.

3. 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).

Трехфазные источники¹ 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 **фазных ЭДС**:

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

Обмотки генератора соединяются по схемам «звезда» (рис. 1а) или «треугольник» (рис. 2а). Выводы фазных обмоток генератора называют «началами» и «концами». В трехфазных генераторах² «начала» обозначаются первыми буквами латинского алфавита *A*, *B* и *C*, а «концы» – последними буквами *x*, *y* и *z*.

¹В качестве трехфазных источников, как правило, применяются синхронные генераторы. На их неподвижной части, называемой статором, располагаются три обмотки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 120° .

²Подобным образом также соединяются и маркируются вторичные обмотки трехфазных трансформаторов. Обмотки такого трансформатора 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).

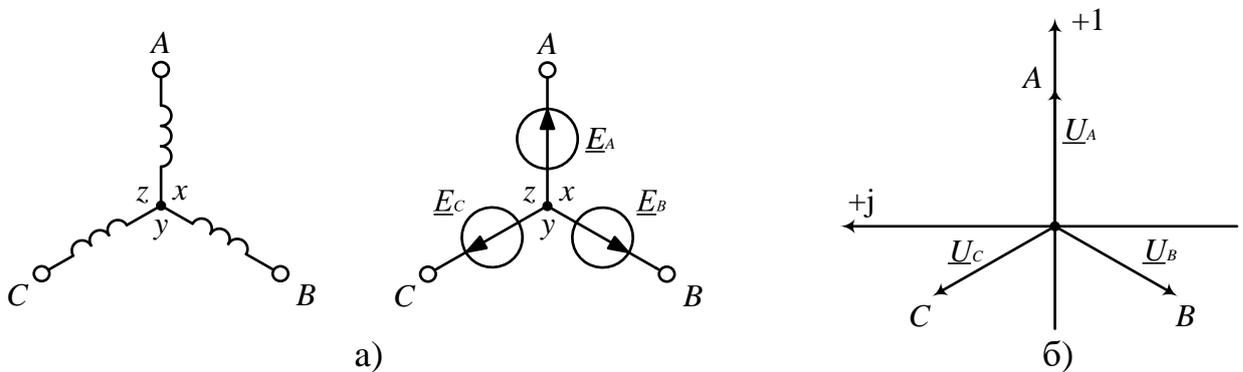


Рис. 1. Соединение обмоток генератора по схеме «звезда»

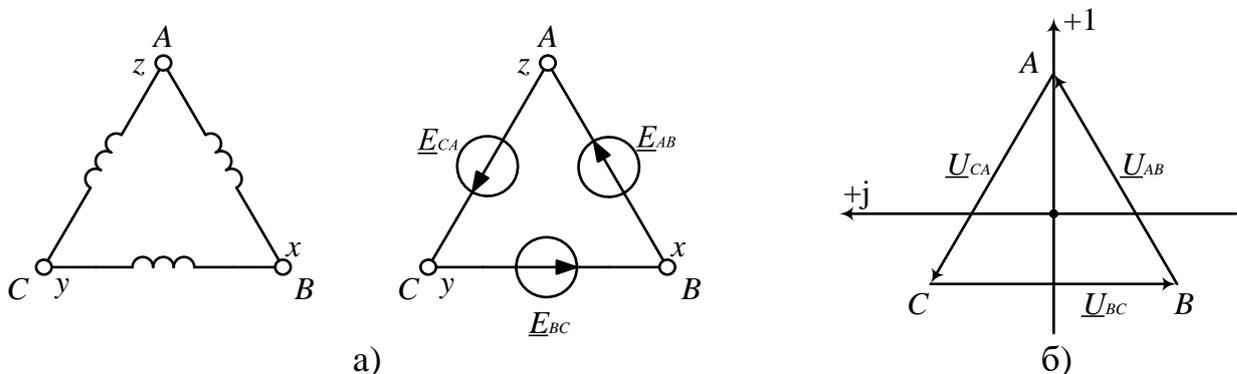


Рис. 2. Соединение обмоток генератора по схеме «треугольник»

Фазные напряжения определяется разностью потенциалов начала и конца фазных обмоток и обозначаются u_A, u_B, u_C . При учете сопротивлений фазных обмоток и наличии токов в них фазное напряжение не равно фазной ЭДС. Для идеального трехфазного источника принимают, что фазные ЭДС и фазные напряжения совпадают:

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

Трехфазная нагрузка (приемник) по схеме «звезда» (рис. 3а) или по схеме «треугольник» (рис. 3б) соединяется аналогичным образом. Лучи «звезды» или ветви «треугольника» называют фазами, а их сопротивления – фазными сопротивлениями приемника.

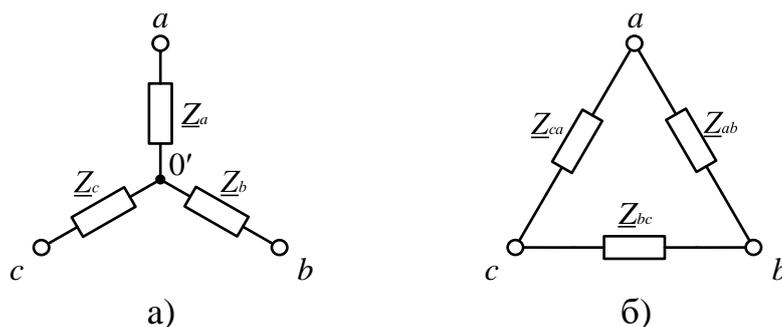


Рис. 3. Схемы соединения фаз трехфазной нагрузки

Примечание. Схемы соединения фаз источников питания и приемников не зависят друг от друга. В одной и той же цепи могут быть источники и приемники с разными схемами соединений фаз. В данной работе проводится исследование трехфазной цепи при соединении источника и приемника в «звезду».

При соединении «звездой» место соединения концов фазных обмоток генератора (приемника) называют **нейтральной (нулевой) точкой**. 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. Три провода, соединяющие фазы генератора и приемника называют линейными проводами. Напряжения между линейными проводами и токи в линейных проводах называют **линейными напряжениями и токами** с действующими значениями $U_\text{л}$, $I_\text{л}$.

При соединении фазных обмоток в «звезду» линейные напряжения определяются как разность фазных напряжений:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Для симметричного источника ЭДС ПП, соединенного в «звезду», действующее значение линейного напряжения $U_\text{л} = \sqrt{3}U_\phi$. При соединении фазных обмоток по схеме «треугольник» $U_\text{л} = U_\phi$.

На рис. 1б и 2б представлены векторные диаграммы комплексов фазных напряжений при соединении фазных обмоток генератора по схеме «звезда» и «треугольник». Как правило, при изображении векторных диаграмм трехфазных напряжений и токов комплексную плоскость «поворачивают» так, чтобы вещественная ось +1 располагалась вертикально.

На рис. 4 представлена схема **четырёхпроводной трехфазной цепи**, четвертый нулевой, или нейтральный провод (обозначается буквой N) соединяет нулевые точки источника и приемника. При таком соединении линейные токи равны токам в фазах генератора и приемника ($I_\text{л} = I_\phi$). Нейтральный провод может быть идеальным ($Z_N = 0$) или неидеальным ($Z_N \neq 0$). Напряжение между нулевой точкой трехфазной нагрузки (т. $0'$) и нулевой точкой трехфазного источника (т. 0) $\underline{U}_{0'0}$ называется **напряжением смещения нейтрали**. Для идеального нейтрального провода $\underline{U}_{0'0} = 0$. При расчетах принимают $\varphi_0 = 0$, а на практике нулевая точка трехфазного генератора заземляется. Ток в нейтральном проводе определяется суммой линейных (фазных) токов $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$.

Примечание. Нулевой провод на практике позволяет обеспечить заданные фазные напряжения источника на фазах нагрузки при неравенстве ее фазных сопротивлений. При $Z_N = 0$ каждая фаза может быть рассчитана независимо от остальных фаз.

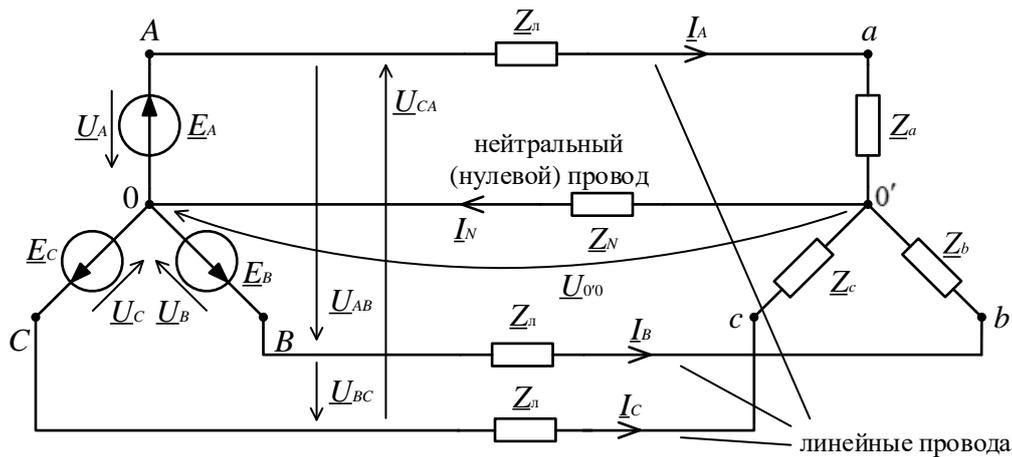


Рис. 4. Четырехпроводная трехфазная цепь

При отсутствии нейтрального провода осуществляется расчет **трехпроводной трехфазной цепи**, в таком случае сумма линейных (фазных) токов должна быть равна нулю $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

Порядок расчета трехфазных цепей простейшей конфигурации определяется схемами соединения фаз генератора и нагрузки, соотношениями между фазными сопротивлениями, наличием (отсутствием) нулевого провода и его сопротивлением. Далее рассматриваются способы расчета таких трехфазных цепей, а также методы измерения мощности в них.

Методики расчета трехфазных цепей

Четырехпроводная трехфазная цепь.

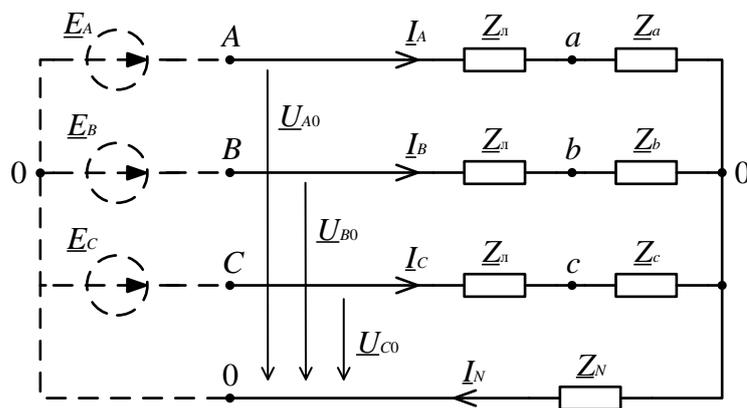


Рис. 5. Расчетная схема четырехпроводной трехфазной цепи

Расчет токов и напряжений четырехпроводной трехфазной цепи (рис. 5) при несимметричной нагрузке ($Z_a \neq Z_b \neq Z_c$) целесообразно осуществлять в следующем порядке:

- 1) Находят напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{0'0}$:

$$\underline{U}_{0'0} = \frac{\underline{U}_A Y_A + \underline{U}_B Y_B + \underline{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \quad (*)$$

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

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

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

Проверка расчета осуществляется по первому закону Кирхгофа:

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

Фазные напряжения на нагрузке:

$$\underline{U}_{a0'} = \underline{I}_A \underline{Z}_a, \quad \underline{U}_{b0'} = \underline{I}_B \underline{Z}_b, \quad \underline{U}_{c0'} = \underline{I}_C \underline{Z}_c.$$

Линейные напряжения на нагрузке:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{U}_{a0'} - \underline{U}_{b0'} = \underline{I}_A \underline{Z}_a - \underline{I}_B \underline{Z}_b, \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{U}_{b0'} - \underline{U}_{c0'} = \underline{I}_B \underline{Z}_b - \underline{I}_C \underline{Z}_c, \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{U}_{c0'} - \underline{U}_{a0'} = \underline{I}_C \underline{Z}_c - \underline{I}_A \underline{Z}_a. \end{aligned}$$

Для идеального нейтрального провода напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{0'0} = 0$. В этом случае токи определяются фазными напряжениями источника:

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

при этом ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа:

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

Для **симметричной нагрузки** сопротивления приемников в фазах равны $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$, сопротивления проводов $\underline{Z}_л$ одинаковы. В таком случае потенциалы узлов 0 и 0' равны³, $\underline{U}_{0'0} = 0$. Ток в фазе A определяется фазным напряжением источника:

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

а токи остальных фаз:

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

В **симметричном режиме**⁴ ток в нейтральном проводе равен нулю:

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

Фазные и линейные напряжения на нагрузке также образуют симметричную систему («тройку») ПП.

Как правило, расчет комплексов трехфазных токов и напряжений сопровождается построением векторных диаграмм. Для проверки расчетов могут составляться уравнения балансов активной и реактивной мощностей трехфазной цепи.

³Это может быть показано путем рассмотрения соотношения (*) при $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$.

⁴Симметричный режим трехфазной цепи достигается при симметричных генераторе, линии и нагрузке (такую трехфазную цепь называют симметричной).

Трехпроводная трехфазная цепь при схеме соединения нагрузки «звезда».

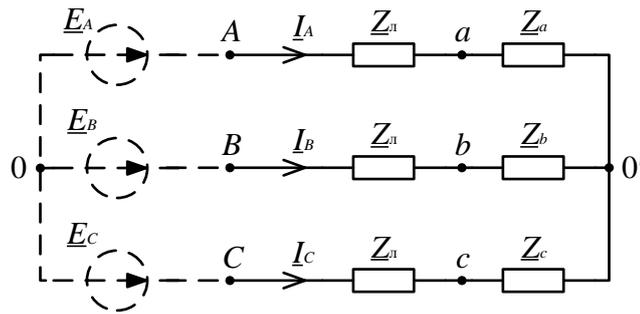


Рис. 6. Расчетная схема трехпроводной трехфазной цепи

На рис. 6 представлена схема трехпроводной трехфазной цепи. Порядок расчета соответствует тому, что был представлен для четырехпроводной трехфазной цепи, но с учетом $\underline{Y}_N = 0$. 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. Расчет напряжения смещения нейтрали и линейных токов должен обеспечивать выполнение первого закона Кирхгофа $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

При **симметричной нагрузке** $\underline{U}_{0'0} = 0$. Ток в фазе A определяется фазным напряжением источника:

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

при этом токи остальных фаз

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

Фазные и линейные напряжения на нагрузке также образуют симметричные тройки ПП.

Так же, как и ранее, расчет комплексов трехфазных токов и напряжений может сопровождаться построением векторных диаграмм и проверкой баланса мощностей.

Измерение мощности в трехфазных цепях

В четырехпроводной цепи для измерения активной мощности применяют схему трех ваттметров. При симметричном режиме мощность может быть определена с помощью одного ваттметра. В данной работе такие измерения не рассматриваются.

В трехпроводной трехфазной цепи для измерения активной мощности применяют схему двух ваттметров. Данная схема применима как для симметричной, так и для несимметричной трехфазной цепи. Два ваттметра включают в любые две фазы, согласовывая вход (помечен *) токовой обмотки и обмотки напряжения прибора с выбранной фазой, второй конец обмотки напряжения прибора соединяют с третьей («свободной») фазой. На рис. 7 ваттметры расположены в фазах *A* и *B*, свободной фазой остается фаза *C*.

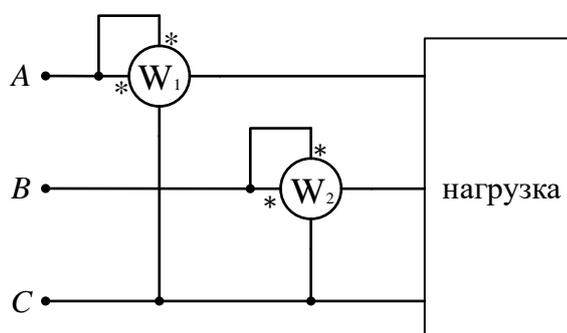


Рис. 7. Включение ваттметров в фазы *A* и *B*

На рис. 8 показаны схемы включения ваттметров в фазы *A* и *B* (используется в лабораторной работе) и в фазах *B* и *C*.

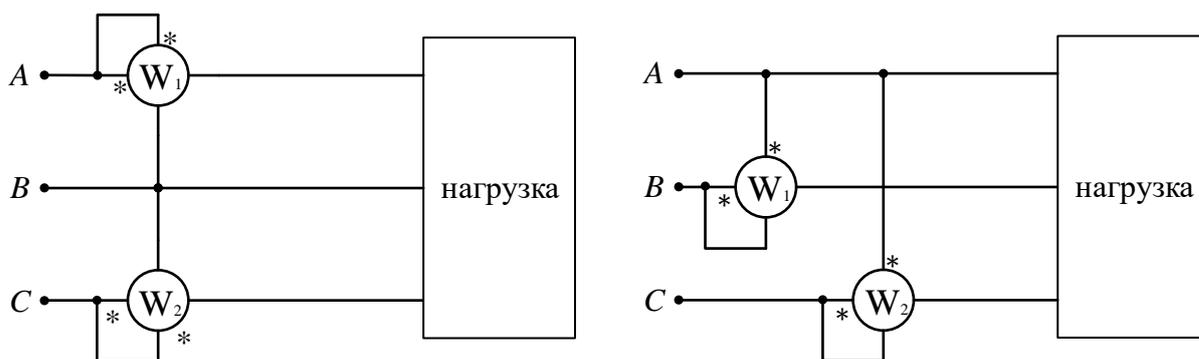


Рис. 8. Включение ваттметров для измерения активной мощности трехфазной нагрузки

Активная мощность трехфазной нагрузки в таком случае равна сумме показаний ваттметров $P = P_{W1} + P_{W2}$.

4. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

4.1. Используя обозначение фазных обмоток генератора (см. рис. 9), изобразить схему соединения «звезда» с маркировкой начал и концов обмоток. Считая источник идеальным, записать выражения для комплексных действующих значений его фазных и линейных напряжений, если $U_{\phi} = 7$ В. Построить в масштабе векторную диаграмму с указанием векторов фазных и линейных напряжений генератора.

4.2. Используя обозначение фазных обмоток генератора (см. рис. 9), изобразить схему соединения «треугольник» с маркировкой начал и концов обмоток. Записать выражения для комплексных действующих значений линейных напряжений источника, если $U_{\phi} = 3$ В. Построить в масштабе векторную диаграмму с указанием векторов фазных (линейных) напряжений генератора.

4.3. Фазное напряжение источника $U_{\phi} = 7$ В. Для четырехпроводной трехфазной цепи, считая сопротивление нейтрального провода пренебрежимо малым, изобразить расчетную схему и определить токи, построить векторные диаграммы токов и напряжений 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	<i>A</i>	<i>C</i>
2,8	<i>C</i>	<i>A</i>
3,9	<i>A</i>	<i>A</i>
4,10	<i>C</i>	<i>C</i>
5,11	<i>C</i>	<i>A</i>
6,12	<i>A</i>	<i>C</i>

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 <i>A</i>	Нагрузка в фазе <i>B</i>	Нагрузка в фазе <i>C</i>
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 <i>A</i>	В фазе <i>B</i>	В фазе <i>C</i>
1	$L = 0,13 \text{ Гн}$	$R = 68 \text{ Ом}$	$R = 68 \text{ Ом}$
2	$R = 68 \text{ Ом}$	$L = 0,13 \text{ Гн}$	$R = 68 \text{ Ом}$
3	$R = 68 \text{ Ом}$	$R = 68 \text{ Ом}$	$L = 0,13 \text{ Гн}$
4	$C = 56 \text{ мкФ}$	$R = 47 \text{ Ом}$	$R = 47 \text{ Ом}$
5	$R = 47 \text{ Ом}$	$C = 56 \text{ мкФ}$	$R = 47 \text{ Ом}$
6	$R = 47 \text{ Ом}$	$R = 47 \text{ Ом}$	$C = 56 \text{ мкФ}$
7	$L = 0,13 \text{ Гн}$	$R = 47 \text{ Ом}$	$R = 47 \text{ Ом}$
8	$R = 47 \text{ Ом}$	$L = 0,13 \text{ Гн}$	$R = 47 \text{ Ом}$
9	$R = 47 \text{ Ом}$	$R = 47 \text{ Ом}$	$L = 0,13 \text{ Гн}$
10	$C = 56 \text{ мкФ}$	$R = 68 \text{ Ом}$	$R = 68 \text{ Ом}$
11	$R = 68 \text{ Ом}$	$C = 56 \text{ мкФ}$	$R = 68 \text{ Ом}$
12	$R = 68 \text{ Ом}$	$R = 68 \text{ Ом}$	$C = 56 \text{ мкФ}$

4.4. Фазное напряжение источника $U_{\phi} = 7 \text{ В}$. Для трехпроводной трехфазной цепи (без нейтрального провода) изобразить расчетную схему и определить токи, напряжение смещения нейтрали, напряжения на фазах приемника $U_{A0'}$, $U_{B0'}$, $U_{C0'}$ построить векторные диаграммы токов и напряжений для следующих режимов.

а) Симметричный режим.

Сопровитления резистивной нагрузки в фазах $R_A = R_B = R_C = 150 \text{ Ом}$.

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. Изобразить схему для измерения активной мощности трехпроводной трехфазной цепи двумя ваттметрами⁵. Для пунктов 4.4 рассчитать показания ваттметров и активную мощность приемника. Составить уравнение баланса активных мощностей трехфазной трехпроводной цепи.

⁵ В лабораторной работе ваттметры включены в фазы *A* и *C*

5. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Источником симметричного трехфазного напряжения является модуль **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)** (рис. 9). 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. Вывод концов обмоток окрашен в черный цвет, для начала обмоток использована общепринятая цветовая маркировка – желтый, зеленый и красный цвета для фаз *A, B, C* соответственно. Действующее значение фазной ЭДС (фазного напряжения) устанавливается с помощью регулятора **RP**. Ручка регулятора указывает на действующее значение линейного напряжения генератора при соединении фазных обмоток «звездой».

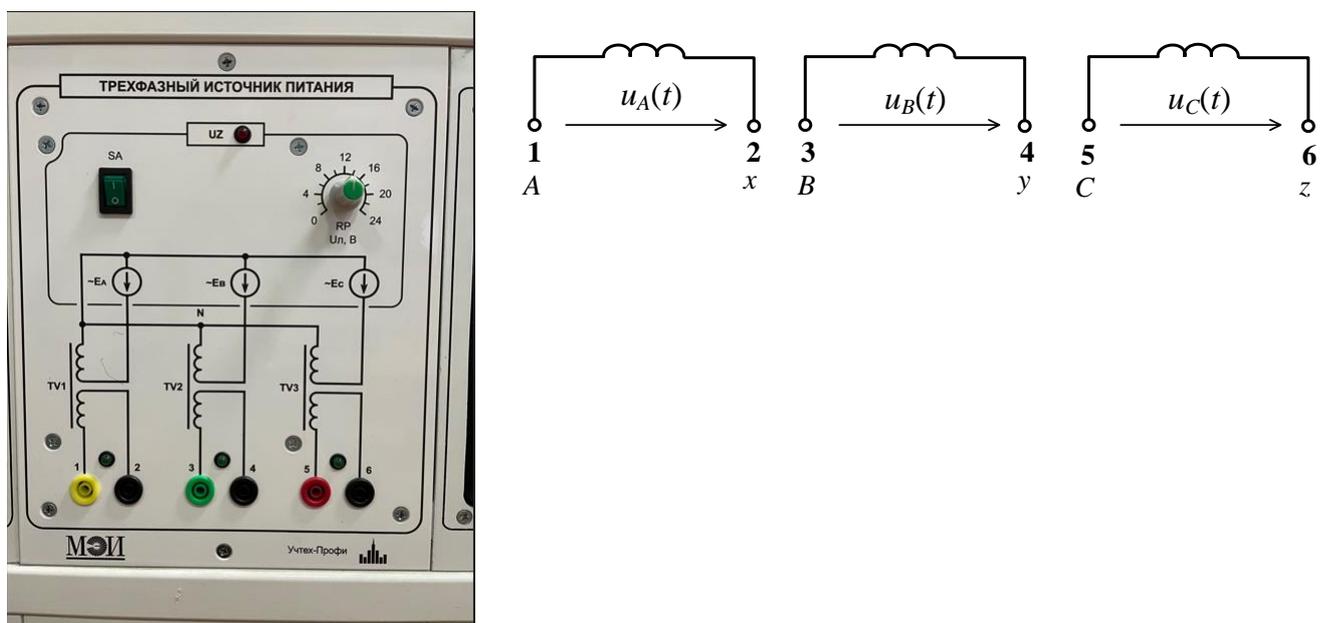


Рис. 9. Модуль **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** и схемное изображение фазных обмоток

Линейные токи измеряют амперметрами **РА1; РА2; РА3** из блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ 25–250 мА**. **Цифровым вольтметром В7-38** или **МУЛЬТИМЕТРОМ РР** измеряют фазные и линейные напряжения, напряжение на измерительном сопротивлении. Действующее значение напряжения и тока, сдвиг фаз между комплексными напряжениями, сдвиг фаз между комплексным напряжением и комплексным током, активную мощность участка измеряют приборами модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.

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

Примечание. 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.**

4.1. Проверка симметрии фазных напряжений источника

- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **SA1** модулей **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** и **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ**.
- Установить регулятор **RP** в положение 12 В. Провести измерение фазных напряжений U_{A0} , U_{B0} , U_{C0} (в дальнейшем U_A , U_B , U_C) модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**. Измеренные значения занести в протокол измерений.
- Использовать прибор **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** для определения комплексных фазных напряжений (потенциалов выводов) источника. Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 10. Тумблер **SA2** модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** установить в положение **U2**. Провести измерение комплексных потенциалов \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C , приняв $\underline{U}_A = U_A \angle 0$. Занести результаты в протокол измерений. Сделать вывод о симметрии фазных напряжений.

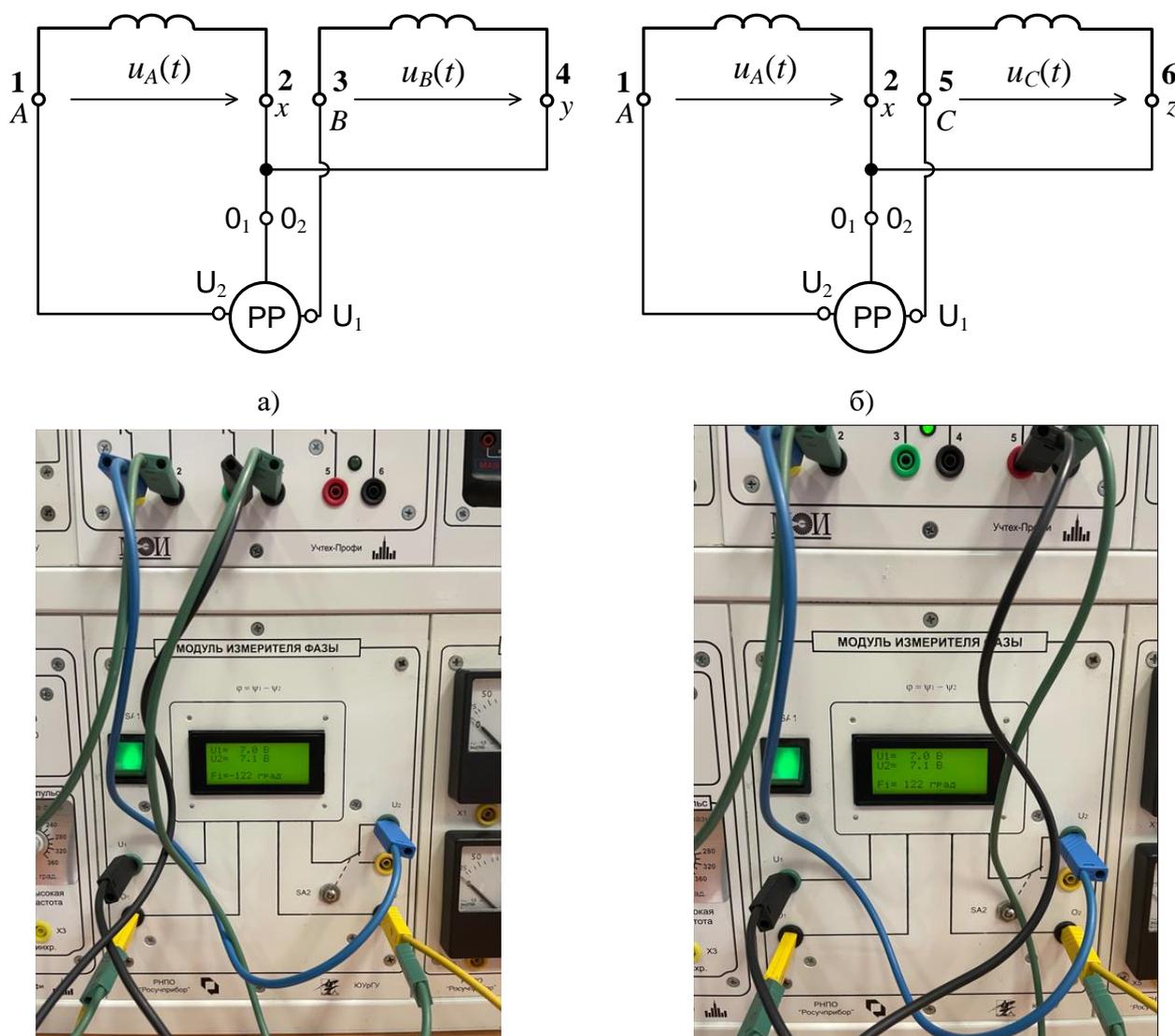


Рис. 10. Схема для определения комплексных фазных напряжений источника:

а) \underline{U}_A , \underline{U}_B ; б) \underline{U}_A , \underline{U}_C

4.2. Исследование трехфазного источника с соединением фазных обмоток «звездой»

- Собрать трехфазный генератор модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** по схеме «звезда». Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **SA** и **SA1** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ (UZ)**.
- Регулятором напряжения **RP** установить линейное напряжение трехфазного источника питания, равное 12 В. Измерить фазные напряжения 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 выполнение соотношений для симметричного источника.

4.3. Исследование трехфазного источника с соединением фазных обмоток «треугольник»

- Собрать трехфазный генератор модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** по схеме «треугольник». 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} , равное 3 В (проверить подключением вольтметра в режиме измерения переменного напряжения).
- 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.
- Выключить тумблер **SA** модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

4.4. Четырехпроводная трехфазная цепь

- Собрать трехфазный генератор модуля **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ** по схеме «звезда». Установить фазное напряжение источника 7 В. **Цифровым вольтметром В7-38** или **МУЛЬТИМЕТРОМ PP** в соответствующем режиме провести измерение внутреннего сопротивления амперметров и измерительного сопротивления 1 Ом из блока **МОДУЛЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ**. Результаты измерений занести в протокол.
- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П. Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** $R_A = R_B = R_C = 150$ Ом. Для определения тока в нейтральном проводе четырехпроводной трехфазной цепи с $Z_N \approx 0$ включить в

нулевой провод измерительное сопротивление⁶ $R_{\text{изм}} = 1 \text{ Ом}$ из блока **МОДУЛЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ**.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Включить выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **SA** и **SA1** модулей **ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ**.

- Регулятором напряжения **RP** установить фазное напряжение трехфазного источника питания, равное 7 В (проверить подключением вольтметра).

- **Симметричный режим.** Измерить амперметрами **РА1**, **РА2** и **РА3** токи фаз. **Цифровым вольтметром В7-38** или **МУЛЬТИМЕТРОМ РР** измерить фазные напряжения на приемнике $U_{A0'}$, $U_{B0'}$, $U_{C0'}$ и напряжение на измерительном сопротивлении. Рассчитать действующее значение тока в нейтральном проводе $I_N = \frac{U_{R_{\text{изм}}}}{R_{\text{изм}}}$. Измеренные значения напряжений, токов и значение тока в

нейтральном проводе 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 расчет действующего значения тока в нейтральном проводе, данные занести в табл. 2П. 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 и расчет действующего значения тока в нейтральном проводе, 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 (La)**. Выполнить измерения и расчет действующего значения тока в нейтральном проводе, данные занести в табл. 2П.

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

4.5. Трехпроводная трехфазная цепь

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 2П. Установить в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** $R_A = R_B = R_C = 150 \text{ Ом}$. Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

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

- **Симметричный режим.** **Цифровым вольтметром В7-38** или **МУЛЬТИМЕТРОМ РР** измерить фазные напряжения на приемнике $U_{A0'}$, $U_{B0'}$, $U_{C0'}$ и напряжение смещения нейтрали $U_{0'0}$. Измеренные значения напряжений

⁶ При включении амперметра или мультиметра в режиме измерения переменных токов в нейтральный провод нарушается условие его идеальности.

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 включении 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. 3П. Восстановить цепь.

- **Короткое замыкание фазы.** Провести опыт с коротким замыканием фазы (табл. 1), где включена токовая цепь модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** (соединить проводом точки I_2 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 и напряжений. Ваттметром модуля **ИЗМЕРИТЕЛЬ ФАЗЫ** определить показания P_1 при включении токовой цепи модуля в линию A , затем P_2 при включении токовой цепи модуля в линию C . 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 и напряжений. 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.

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

6. ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 9

Проверка симметрии фазных напряжений источника

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 10.

Комплексные фазные напряжения источника:

$$\underline{U}_A = \text{_____ В}; \underline{U}_B = \text{_____ В}; \underline{U}_C = \text{_____ В}.$$

Вывод:

Исследование трехфазного источника с соединением фазных обмоток «звездой»

Фазные напряжения источника: $U_A = \text{_____ В}$, $U_B = \text{_____ В}$, $U_C = \text{_____ В}$.

Линейные напряжения источника: $U_{AB} = \text{_____ В}$, $U_{BC} = \text{_____ В}$, $U_{CA} = \text{_____ В}$.

Проверка соотношения $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$, _____.

Исследование трехфазного источника с соединением фазных обмоток «треугольник»

Линейные напряжения источника: $U_{AB} = \text{_____ В}$, $U_{BC} = \text{_____ В}$, $U_{CA} = \text{_____ В}$.

Проверка соотношения $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$, _____.

Четырехпроводная трехфазная цепь

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 2П.

Фазные напряжения источника: $U_A = \text{_____ В}$, $U_B = \text{_____ В}$, $U_C = \text{_____ В}$.

Сопротивления амперметров: $R_{\text{РА1}} = \text{_____ Ом}$, $R_{\text{РА2}} = \text{_____ Ом}$, $R_{\text{РА3}} = \text{_____ Ом}$.

Измерительное сопротивление: $R_{\text{изм}} = \text{_____ Ом}$

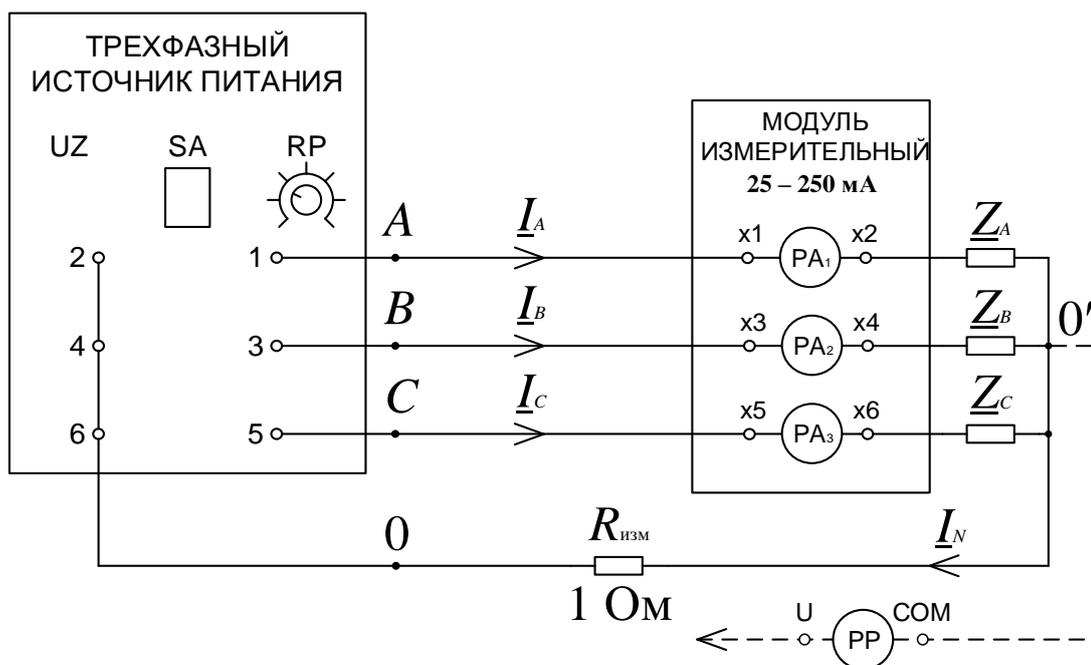


Рис. 1П

Результаты измерений представлены в табл. 1П.

Таблица 1П

Режим работы трехфазной цепи	$U_{A0'},$ В	$U_{B0'},$ В	$U_{C0'},$ В	$I_A,$ мА	$I_B,$ мА	$I_C,$ мА	$I_N = \frac{U_{R_{изм}}}{R_{изм}},$ мА
Симметричный $R_A = R_B = R_C =$ Ом							
Обрыв фазы⁷ фаза A фаза B фаза C							
Несимметричный $R_A =$ Ом, $R_B =$ Ом, $R_C =$ Ом							
Несимметричный с реактивной нагрузкой⁸ фаза A фаза B фаза C							

Трехпроводная трехфазная цепь

⁷ Указать, в какой фазе обрыв и какие сопротивления в двух других фазах

⁸ Указать параметры фазных нагрузок

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 2П.

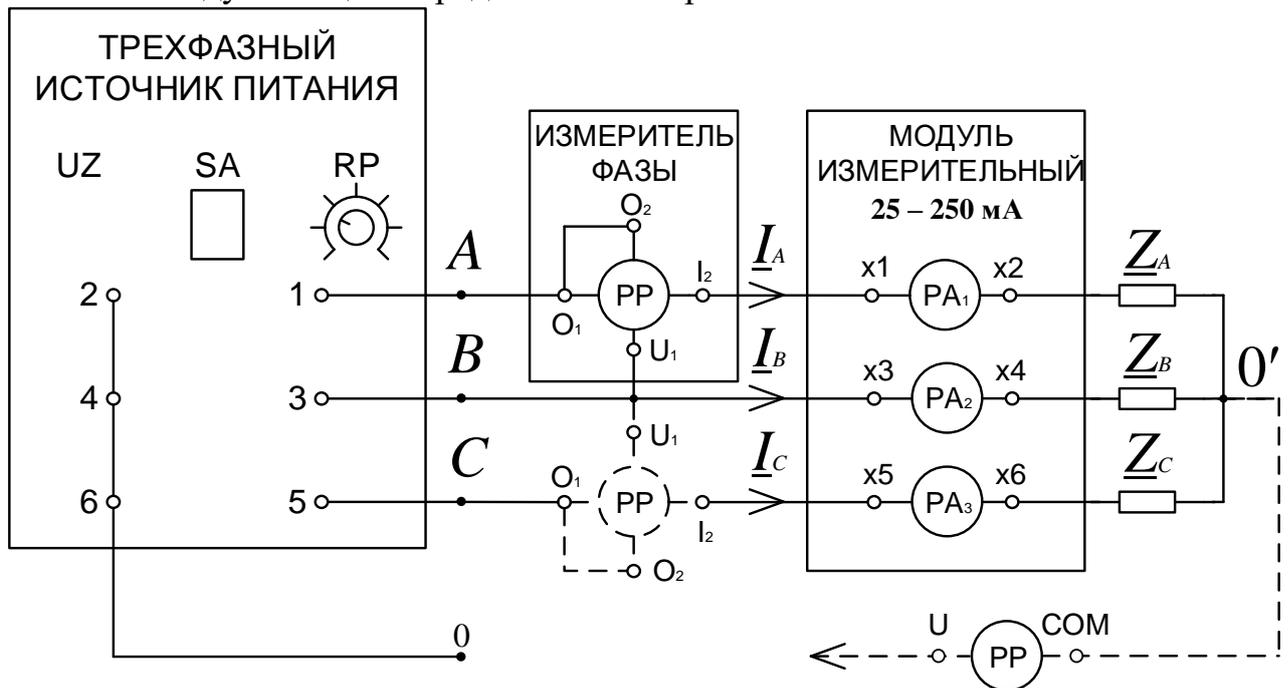


Рис. 2П

Результаты измерений представлены в табл. 2П.

Таблица 2П

Режим работы трехфазной цепи	$U_{AO'}$, В	$U_{BO'}$, В	$U_{CO'}$, В	$U_{O'O}$, 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 <i>A</i> фаза <i>B</i> фаза <i>C</i>								—	—
Короткое замыкание фазы фаза <i>A</i> фаза <i>B</i> фаза <i>C</i>								—	—
Несимметричный $R_A =$ Ом, $R_B =$ Ом, $R_C =$ Ом									
Несимметричный с реактивной нагрузкой фаза <i>A</i> фаза <i>B</i> фаза <i>C</i>									

7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Корректно оформленная подготовка к работе. Векторные диаграммы строятся на миллиметровой или линованной бумаге с указанием масштаба.

2.1. Изобразить схемы замещения трехфазной цепи для каждого опыта, указав условно-положительные направления токов.

2.2. По результатам измерений (табл. 1П, табл. 2П) 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.

8. ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. 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 его при расчете?

2. Как проводится измерение активной мощности трехфазной системы при наличии нулевого провода?

3. Составить уравнение баланса активных мощностей при резистивной нагрузке в симметричном и несимметричном режимах, используя опытные данные.

4. Для каких трехфазных систем можно применить измерение активной мощности методом двух ваттметров? Почему?

5. Приведите схему подключения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной системы при обрыве одной фазы. Рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров и по опытным данным. Сравните результаты.

6. Приведите схему подключения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной системы при коротком замыкании одной фазы. Рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров и по опытным данным. Сравните результаты.

7. Приведите схему подключения двух ваттметров в фазах A и B для измерения активной мощности трехфазной системы в исследуемых режимах (по указанию преподавателя). Рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров.

8. Приведите схему подключения двух ваттметров в фазах B и C для измерения активной мощности трехфазной системы исследуемых режимов (по указанию преподавателя). Рассчитайте активную мощность по показаниям ваттметров.