

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

**С.А. Васюков, О.И. Мисеюк**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

*Учебно-методическое пособие*

**Москва**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**

**МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**2023**

УДК 621.319

ББК 31.2

Издание доступно в электронном виде на портале [ebooks.bmstu.ru](http://ebooks.bmstu.ru) по адресу: [http://ebooks.bmstu.press/catalog/.....](http://ebooks.bmstu.press/catalog/)

Факультет «Фундаментальные науки»

Кафедра «Электротехника и промышленная электроника»

*Рекомендовано Научно-методическим советом  
МГТУ им. Н.Э.Баумана в качестве учебно-методического пособия*

Рецензент

Васюков С.А., Мисеюк О.И.

Исследование трехфазных электрических цепей: учебно – методическое пособие по выполнению лабораторной работы по курсам «Электротехника и электроника» С.А.Васюков, О.И.Мисеюк – М.: Изд. – во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2023 – 27,[2] с.: ил.

В пособии изложены основные теоретические сведения по трехфазным цепям, даны определения трехфазного источника питания и трехфазного потребителя. Рассмотрено соединение источника и потребителя треугольником и звездой при симметричной и несимметричной нагрузке. Приведены способы измерения активной мощности. Представлены задание, порядок выполнения и методические указания к проведению работы, а также контрольные вопросы.

Для студентов 2 – 4 курсов МГТУ им. Н.Э.Баумана, обучающихся по программам бакалавриата и специалитета на факультетах машиностроительной направленности и изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

© Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	4
1.1. Трехфазный источник питания .....	4
1.2. Способы соединения фаз генератора и нагрузки .....	7
1.3. Симметричный режим работы трехфазной цепи.....	9
1.4. Несимметричный режим работы трехфазной цепи.....	12
1.5. Мощность несимметричной трехфазной цепи .....	15
2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	17
2.1. Измерение напряжений трехфазного источника питания.....	17
2.2. Измерение напряжений и токов при соединении .....	19
трехфазного потребителя звездой.....	19
2.2.1. Симметричная резистивная нагрузка .....	19
2.2.2. Несимметричная резистивная нагрузка .....	23
2.2.3. Несимметричная смешанная нагрузка .....	23
2.3. Измерение мощности трехфазной нагрузки «методом двух ваттметров» .....	24
2.4. Построение векторных диаграмм.....	25
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ .....	25
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	26
ЛИТЕРАТУРА.....	26

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В современном высшем техническом образовании, ориентированном на формирование профессиональных компетенций, большое внимание уделяется подготовке специалистов, владеющих как теоретическими знаниями, так и современными методами исследования. Особенно ценится умение проводить исследования физических процессов и свойств объектов с использованием технических средств, выбором методов измерений, обработки и представления результатов. Это умение во многом формируется в ходе лабораторных практикумов.

При выполнении лабораторных работ по дисциплине «Электротехника и электроника» преследуются две цели: первая – закрепление на практике основных положений курса, вторая – приобретение студентами навыков самостоятельной работы с электроизмерительными приборами.

Цепи трехфазного тока нашли широкое применение как в промышленности, так и в повседневной жизни. Их расчет, особенно с применением комплексного метода, является составной частью подготовки современного инженера. Теория трехфазных цепей необходима студентам при изучении курса электрических машин и аппаратов. Именно поэтому лабораторная работа по изучению трехфазных цепей является одной из базовых работ курса электротехники.

Лабораторная работа предназначена для бакалавров и специалистов обучающихся на кафедре «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

*Цель лабораторной работы:* приобретение навыков самостоятельного исследования основных свойств, законов и режимов работы трехфазных электрических цепей при соединении источника и нагрузки звездой, овладение техникой экспериментирования с использованием электроизмерительных приборов; освоение методов исследования симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи с нейтральным проводом и без него.

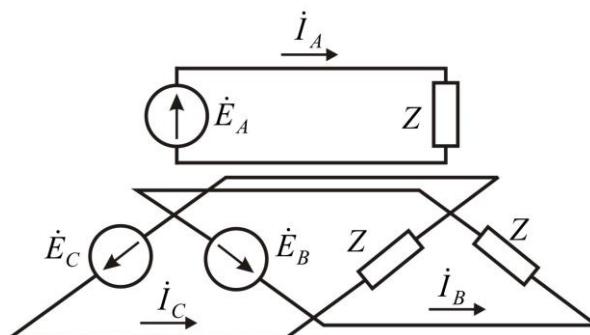
## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. Трехфазный источник питания

Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют равные по величине ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга на одну треть периода, или, что то же, на

угол  $120^\circ$ . Эти три составные части трехфазной цепи называются фазами и им будут приписываться буквенные обозначения  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

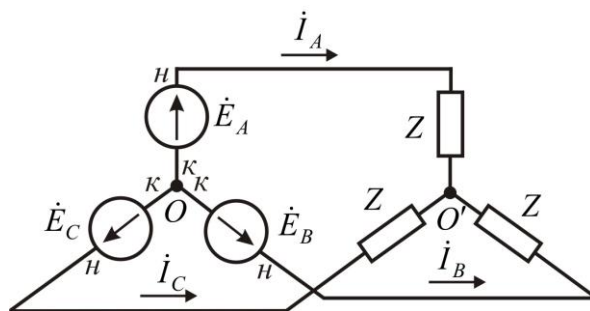
На рис. 1.1 схематично показана трехфазная цепь, фазы которой электрически не связаны друг с другом. Такие трехфазные цепи называются *несвязанными* (в настоящее время не применяются).



**Рис. 1.1** Несвязанная трехфазная цепь

Таким образом, термином «фаза» в электротехнике обозначаются два понятия: угол, определяющий стадию периодического процесса, и составная часть многофазной цепи.

Фазы  $A$ ,  $B$  и  $C$  с нагрузкой  $Z$  изображены на рис. 1.1 под углом  $120^\circ$  для того, чтобы подчеркнуть, что ЭДС  $\dot{E}_A$ ,  $\dot{E}_B$  и  $\dot{E}_C$  сдвинуты друг относительно друга на одну треть периода. При равенстве амплитуд ЭДС и одинаковых сопротивлений в фазах токи  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  также равны по величине и сдвинуты друг относительно друга на одну треть периода, образуя так называемый трехфазный ток. Сумма этих токов в любой момент времени равна нулю, поэтому если три провода, по которым токи возвращаются к источникам, объединить в один провод то ток в этом проводе будет равен нулю. При отсутствии в проводе тока излишним в данном случае является и сам провод; от него можно отказаться, перейдя, таким образом, к схеме, приведенной на рис. 1.2.

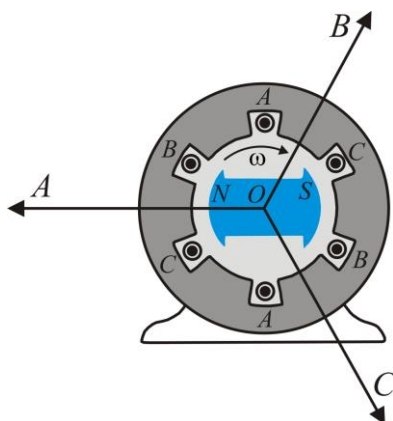


**Рис. 1.2.** Связанная электрическая цепь

В результате этого достигается экономия материала проводов; кроме того, по сравнению с несвязанной трехфазной цепью исключаются потери мощности от токов  $I_A, I_B$  и  $I_C$  в обратных проводах.

Трехфазная цепь, фазы которой соединены электрически, представляет собой одну из разновидностей связанных трехфазных цепей (см. рис. 1.2).

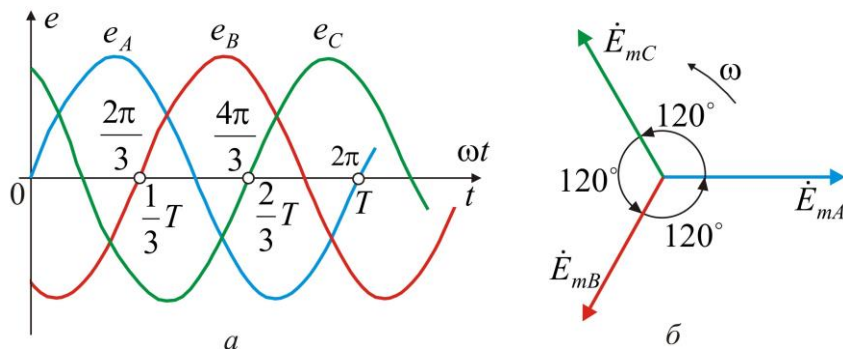
Для получения связанной трехфазной цепи не требуются отдельные однофазные генераторы, а используется трехфазный генератор (рис. 1.3).



**Рис. 1.3.** Устройство трехфазного синхронного генератора

Обмотки, в которых наводятся ЭДС, помещаются в пазах статора. Обмотки фаз сдвинуты друг относительно друга на угол  $120^\circ / p$ , где  $p$  – число пар полюсов. В случае двухполюсного генератора (см. рис. 1.3)  $p = 1$  и угол равен  $120^\circ$ .

При вращении ротора со скоростью  $\omega$ , в силу идентичности трех обмоток генератора в обмотках наводятся ЭДС  $e$ , имеющие одинаковые амплитуду и частоту, причем эти ЭДС сдвинуты по фазе по отношению друг к другу на одну треть периода  $T$  (рис. 1.4, а). Векторы, изображающие эти ЭДС, равны по модулю и расположены под углом  $120^\circ$  (рис. 1.4, б).



**Рис. 1.4.** Временные диаграммы (а) и векторная диаграмма (б) фазных ЭДС трехфазного генератора

Мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора, показанные на рис. 1.4, а, аналитически выражаются следующим образом:

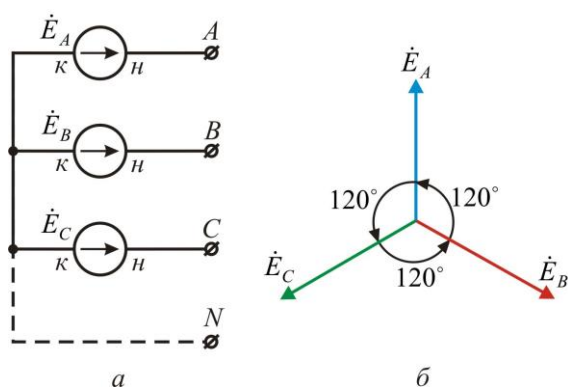
$$e_A = E_m \sin \omega t; e_B = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); e_C = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}),$$

что иллюстрируется векторной диаграммой (см. рис. 1.4, б).

## 1.2. Способы соединения фаз генератора и нагрузки

Каждая фазная обмотка имеет две крайние точки или два вывода, которые условно называются *началом* и *концом* обмотки. За начало обмотки генератора обычно принимается тот вывод, к которому направлена положительная ЭДС. На рис. 1.2 одноименные выводы фазных обмоток генератора обозначены буквами «н» (начало) и «к» (конец).

Показанное на схеме рис. 1.2 соединение обмоток трехфазного генератора называется *звездой*: все концы фазных обмоток генератора соединены в одной общей точке. Иногда для упрощения рисунка фазы генератора изображают не под углом  $120^\circ$ , а параллельно (рис. 5, а).

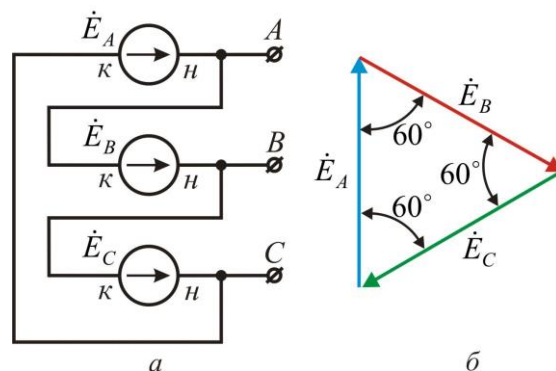


**Рис. 1.5.** Соединение трехфазного генератора звездой: а – схема; б – векторная диаграмма ЭДС

Общая точка фазных обмоток генератора называется *нейтральной точкой*. В зависимости от требований нейтральная точка может быть присоединена к отдельному выводу, обозначенному на рис. 1.5, а буквой *N*.

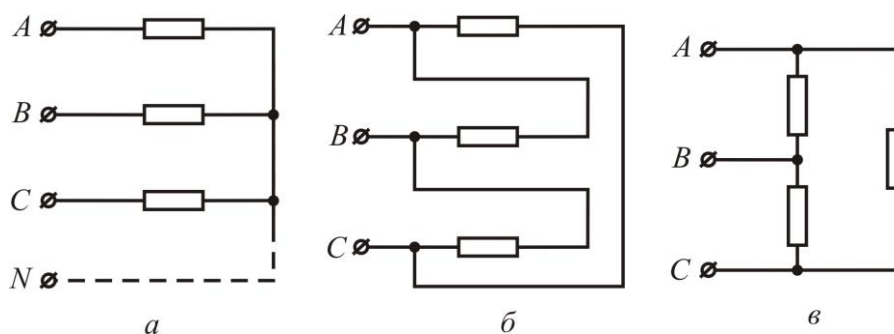
При соединении обмоток трехфазного генератора треугольником (рис. 1.6, а) начало одной фазной обмотки соединяется с концом следующей по порядку фазной обмотки так, что все три обмотки образуют замкнутый треугольник, причем направления ЭДС в контуре треугольника совпадают и сумма ЭДС равна нулю. Общие точки соединенных обмоток генератора связаны с выводами, к которым присоединяются линейные провода или нагрузка.

При отсутствии нагрузки, т.е. при режиме холостого хода, в обмотках генератора, соединенных треугольником, ток не циркулирует, так как сумма трех фазных ЭДС равна нулю (рис. 1.6, б).



**Рис. 1.6.** Соединение трехфазного генератора треугольником:  
а – схема; б – векторная диаграмма ЭДС

Нагрузка в трехфазной цепи также может быть соединена звездой (рис. 1.7, а) или треугольником (рис. 1.7, б, в).



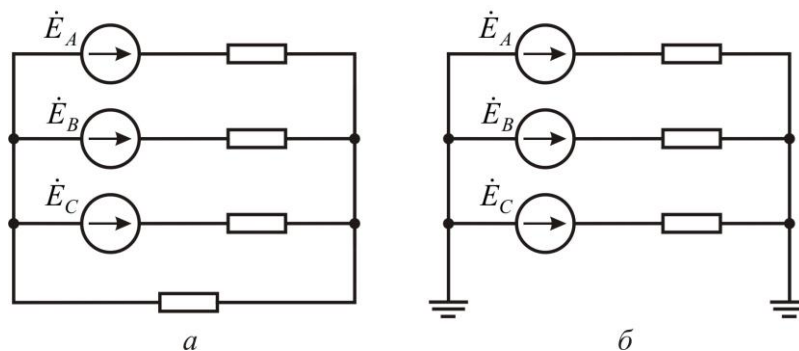
**Рис. 1.7.** Соединение нагрузки звездой (а) и треугольником (б, в)

На практике применяются различные комбинации соединений, например: 1) генератор может быть соединен звездой, а нагрузка – звездой или треугольником; 2) генератор может быть соединен треугольником, а нагрузка – звездой или треугольником.

Соединение нагрузки звездой без нейтрального провода (см. рис. 1.2) применяется только при одинаковой нагрузке всех трех фаз. Между тем условие равномерной загрузки фаз на практике не всегда выполняется (например, в случае осветительной нагрузки). При неравномерной нагрузке напряжения на фазах, т. е. на сопротивлениях нагрузки фаз, получаются неодинаковыми. Кроме того, в схеме рис. 1.2 недопустимым является включение или отключение одной фазы нагрузки.

В этом отношении соединение нагрузки треугольником имеет преимущество: сопротивления фаз, т. е. сторон треугольника, могут быть неодинаковы и даже, в крайнем случае, могут включаться и отключаться независимо друг от друга.

Такая же возможность имеется при соединении генератора и нагрузки звездой, если их нейтральные точки соединены нейтральным проводом (рис. 1.8, *а*) или объединены общей шиной «земля» (рис. 1.8, *б*).



**Рис. 1.8.** Соединение звезда – звезда с нейтральный проводом (*а*) и заземленными нейтральными точками (*б*)

Электродвижущие силы, наводимые в фазных обмотках генератора, напряжения на фазах нагрузки и токи в них называются соответственно фазными ЭДС, напряжениями и токами и обозначаются  $E_{\phi}$ ,  $U_{\phi}$  и  $I_{\phi}$ .

Провода, соединяющие фазы генератора и нагрузки называются линейными проводами. Напряжения между линейными проводами и токи в них называются линейными напряжениями и токами и обозначаются  $U_{л}$  и  $I_{л}$ .

При соединении фаз звездой фазные токи равны линейным токам:  $I_{\phi} = I_{л}$ . При соединении фаз треугольником фазное напряжение равно соответствующему линейному напряжению:  $U_{\phi} = U_{л}$ .

Различают симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. При симметричном режиме комплексные сопротивления всех трех фаз одинаковы и ЭДС образуют симметричную систему; в противном случае имеет место несимметричный режим.

### 1.3. Симметричный режим работы трехфазной цепи

Введем фазовый оператор

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Умножение вектора на оператор  $a$  означает поворот вектора на  $120^\circ$  в положительном направлении (против хода часовой стрелки).

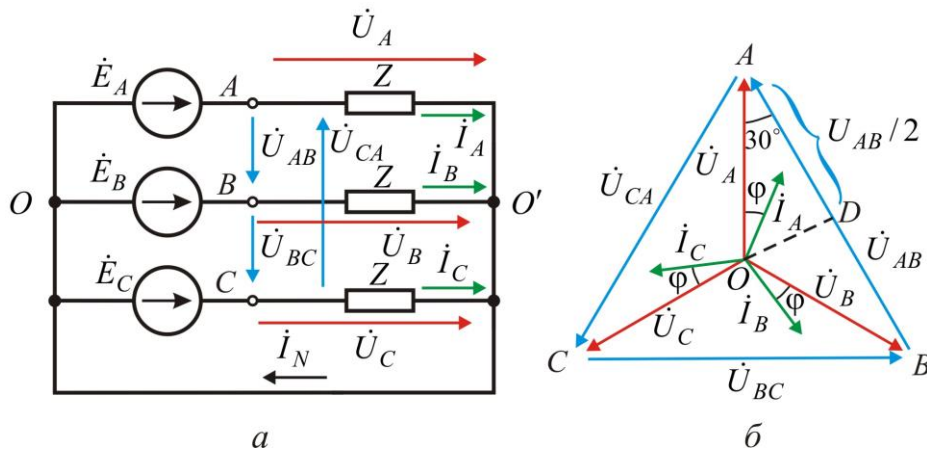
Соответственно умножение вектора на множитель  $a^2$  означает поворот вектора на  $240^\circ$  в положительном направлении или, что то же, поворот его на  $120^\circ$  в отрицательном направлении.

Очевидно, что

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Если ЭДС фазы  $A$  равна  $\dot{E}_A$ , то ЭДС фаз  $B$  и  $C$  равны соответственно:  
 $\dot{E}_B = a^2 \dot{E}_A$ ;  $\dot{E}_C = a \dot{E}_A$ .

В простейшем случае симметричного режима работы трехфазной цепи, когда генератор и активно-индуктивная нагрузка соединены звездой (рис. 1.9, а), векторная диаграмма имеет вид, показанный на рис. 1.9, б.



**Рис. 1.9.** Симметричный режим работы трехфазной цепи при соединении звездой:  
 а – трехфазная цепь; б – векторная диаграмма.

Ток в каждой фазе отстает от ЭДС той же фазы на угол  $\varphi = \arctg(x/r)$ , где  $r$  и  $x$  – активное и реактивное сопротивления фаз.

Токи в фазах при наличии нейтрального провода:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z}; \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z} = \frac{a^2 \dot{E}_A}{Z} = a^2 \dot{I}_A; \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{Z} = \frac{a \dot{E}_A}{Z} = a \dot{I}_A.$$

Наличие нейтрального провода не вносит при симметричном режиме никаких изменений, так как сумма токов трех фаз равна нулю и ток в нейтральном проводе отсутствует:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = (1 + a^2 + a) \dot{I}_A = 0.$$

Линейные напряжения определяются как разности соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_A (1 - a^2) = \sqrt{3} \dot{U}_A \cdot e^{j30^\circ}, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_A (a^2 - a) = \sqrt{3} \dot{U}_A \cdot e^{-j90^\circ}, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_A (a - 1) = \sqrt{3} \dot{U}_A \cdot e^{j150^\circ}, \end{aligned}$$

т. е.  $\dot{U}_{AB}$  опережает по фазе  $\dot{U}_A$  на  $30^\circ$ , причем модуль  $U_{AB}$  в  $\sqrt{3}$  раз превышает  $U_A$ .

Из треугольника  $AOD$  (см. рис. 1.9, б) имеем:

$$AD = \frac{U_{AB}}{2} = OA \cos 30^\circ = U_A \cos 30^\circ = U_A \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow U_{AB} = \sqrt{3}U_A,$$

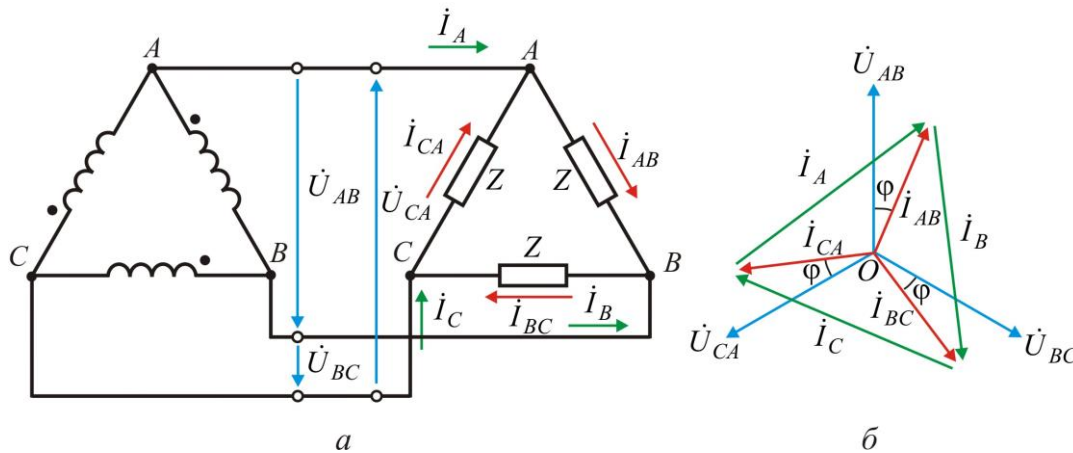
или

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

В случае соединения треугольником (рис. 1.10) линейные токи определяются в соответствии с первым законом Кирхгофа как разности фазных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC},$$

причем  $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$ .



**Рис. 1.10.** Симметричный режим работы трехфазной цепи при соединении треугольником:

*a* – трехфазная цепь; *б* – векторная диаграмма

Активная мощность симметричной трехфазной нагрузки равна утроенной мощности любой фазы:

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi.$$

Ввиду того что при соединении нагрузки звездой  $U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$  и  $I_{л} = I_{\phi}$ , а при соединении нагрузки треугольником  $U_{л} = U_{\phi}$  и  $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$ , активная мощность трехфазной цепи независимо от вида соединения выражается через линейные напряжения и ток следующим образом:

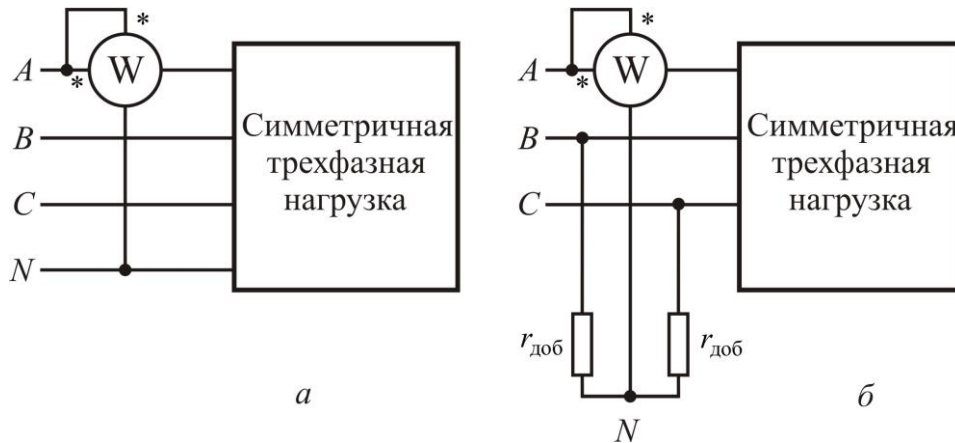
$$P = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi,$$

где  $\varphi$  - угол сдвига фазного тока относительно одноименного фазного напряжения.

Аналогичным образом для реактивной и полной мощностей симметричной трехфазной нагрузки имеем

$$Q = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi, S = \sqrt{3}U_{л} I_{л}.$$

Если нейтральная точка симметричной трехфазной нагрузки выведена, то активная мощность может быть измерена одним ваттметром, включенным по схеме, которая приведена на рис. 1.11, а (одноименные выводы последовательной и параллельной цепей ваттметра отмечены на рис. 1.11, а звездочками). Утроенное показание ваттметра равно суммарной активной мощности трех фаз.



**Рис. 1.11.** Измерение активной мощности при симметричном режиме

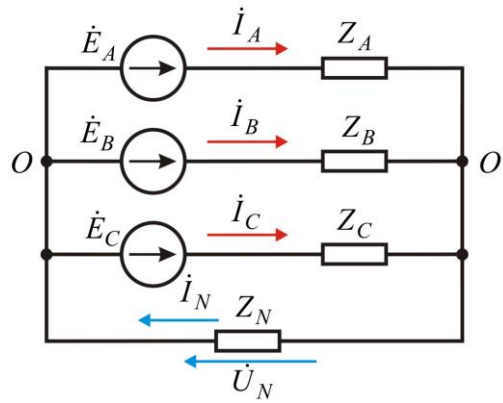
Если нейтральная точка не выведена или нагрузка соединена треугольником, то можно воспользоваться схемой рис. 1.11, б, где параллельная цепь ваттметра и два добавочных активных сопротивления  $r_{доб}$ , равные по величине сопротивлению параллельной цепи ваттметра, образуют искусственную нейтральную точку  $N$ .

#### 1.4. Несимметричный режим работы трехфазной цепи

Несимметрия в трехфазной цепи может быть вызвана различными причинами: 1) неодинаковым сопротивлением фаз (несимметричная нагрузка); 2) несимметричным коротким замыканием (например, между двумя фазами или фазой и нейтральным проводом); 3) размыканием фазы; 4) неравенством ЭДС и т.п.

Токи и напряжения в трехфазной цепи при несимметричном режиме можно рассчитывать теми же методами, которые применяются для расчета однофазных цепей. Рассмотрим несколько вариантов схем соединения нагрузки.

1. Несимметричная трехфазная цепь, соединенная звездой, с нейтральным проводом (рис. 1.12).



**Рис. 1.12.** Случай несимметричной нагрузки трехфазной цепи при соединении звездой с нейтральным проводом

Поскольку в схеме имеются только два узла, целесообразно в данном случае определить узловое напряжение (напряжение смещения) между нейтральными точками  $O'$  и  $O$  по формуле:

$$\dot{U}_{O'O} = \dot{U}_N = \frac{Y_A \dot{E}_A + Y_B \dot{E}_B + Y_C \dot{E}_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \quad (1.1)$$

где  $Y_A, Y_B, Y_C, Y_N$  - проводимости соответствующих ветвей.

После этого найдем токи:

$$\begin{aligned} \dot{i}_A &= Y_A (\dot{E}_A - \dot{U}_N); \\ \dot{i}_B &= Y_B (\dot{E}_B - \dot{U}_N); \\ \dot{i}_C &= Y_C (\dot{E}_C - \dot{U}_N). \end{aligned}$$

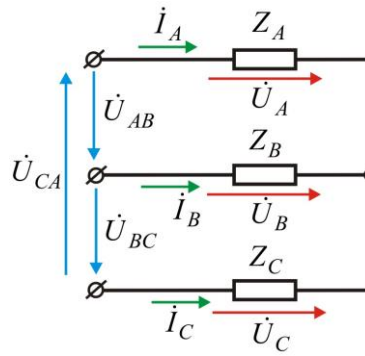
В симметричной трехфазной цепи  $Y_A = Y_B = Y_C$ , и поэтому при  $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$  узловое напряжение  $\dot{U}_N$  равно нулю.

Случаю размыкания какой-либо фазы или нейтрального провода соответствует равенство нулю проводимости данной фазы или нейтрального провода.

При отсутствии нейтрального провода, полагая в (1.1)  $Y_N = 0$ , имеем:

$$\dot{U}_N = \frac{Y_A \dot{E}_A + Y_B \dot{E}_B + Y_C \dot{E}_C}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

2. Несимметричная трехфазная нагрузка, соединенная звездой (без нейтрального провода), с заданными линейными напряжениями на выводах, рис. 1.13.



**Рис. 1.13.** Случай несимметричной нагрузки трехфазной цепи при соединенная звездой без нейтрального провода

Если заданы линейные напряжения  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$  на выводах нагрузки, соединенной звездой, то токи в фазах звезды определяются следующим образом.

Обозначив фазные напряжения на выводах нагрузки через  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  (см. рис. 1.13), получим

$$\dot{I}_A = Y_A \dot{U}_A; \dot{I}_B = Y_B \dot{U}_B; \dot{I}_C = Y_C \dot{U}_C,$$

где  $Y_A$ ,  $Y_B$  и  $Y_C$  - проводимости фаз нагрузки.

Равенство нулю суммы токов трех фаз записывается в виде:

$$Y_A \dot{U}_A + Y_B \dot{U}_B + Y_C \dot{U}_C = 0. \quad (1.2)$$

Фазные напряжения  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  могут быть выражены через  $\dot{U}_A$  и заданные линейные напряжения:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_{AB}; \dot{U}_C = \dot{U}_{CA} + \dot{U}_A. \quad (1.3)$$

После подстановки выражения (1.2) в уравнения (3) получаем

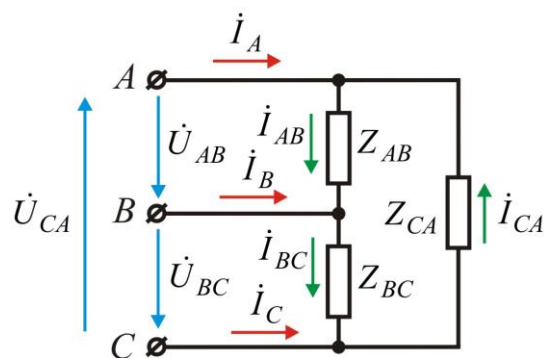
$$\dot{U}_A = \frac{Y_B \dot{U}_{AB} - Y_C \dot{U}_{CA}}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

Круговой заменой индексов находят:

$$\dot{U}_B = \frac{Y_C \dot{U}_{BC} - Y_A \dot{U}_{AB}}{Y_A + Y_B + Y_C}; \dot{U}_C = \frac{Y_A \dot{U}_{CA} - Y_B \dot{U}_{BC}}{Y_A + Y_B + Y_C}.$$

По фазным напряжениям нагрузки находятся фазные токи.

3. Несимметричная трехфазная нагрузка, соединенная треугольником, с заданными напряжениями на выводах (рис. 1.14).



**Рис. 1.14.** Несимметричная трехфазная цепь, соединенная треугольником

Если на выводах несимметричной трехфазной нагрузки, соединенной треугольником, заданы линейные напряжения  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$  (см. рис. 1.14), то токи в сопротивлениях нагрузки описываются выражениями

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad \dot{i}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \quad \dot{i}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}.$$

Токи в линии определяются как разности соответствующих токов нагрузки:

$$\dot{I}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA}, \quad \dot{I}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB}, \quad \dot{I}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC}.$$

Если на выводах несимметричной трехфазной нагрузки, соединенной треугольником, заданы фазные напряжения  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  источника, соединенного в звезду, то линейные напряжения на выводах нагрузки находятся как разности соответствующих фазных напряжений; в результате чего задача сводится к только что рассмотренному случаю (см. рис. 1.14).

### 1.5. Мощность несимметричной трехфазной цепи

Пользуясь комплексной формой записи мощности, можно написать общее выражение для мощности трехфазной цепи:

$$\tilde{S} = \dot{U}_A \dot{I}_A^* + \dot{U}_B \dot{I}_B^* + \dot{U}_C \dot{I}_C^*. \quad (1.4)$$

Действительная часть этого выражения представляет собой активную мощность

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C. \quad (1.5)$$

В соответствии с выражением (1.5) суммарная активная мощность, потребляемая несимметричной трехфазной цепью, может быть измерена при помощи трех ваттметров, включенных на подведенные к данной цепи фазные напряжения и одноименные с ними токи. Активная мощность равна сумме показаний трех ваттметров. Такой метод измерения применяется при наличии нейтрального провода (рис. 1.15) или искусственно созданной нейтральной точки.

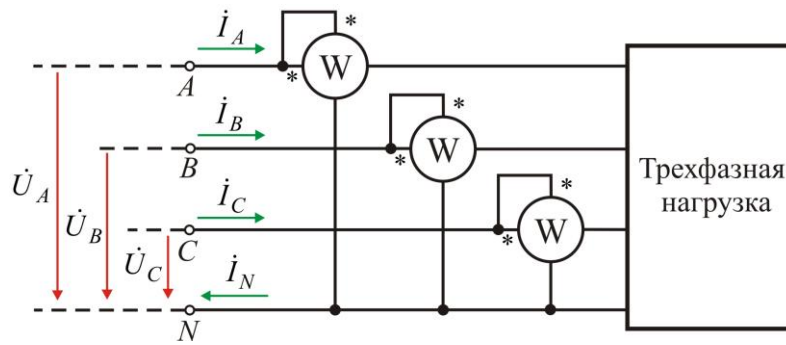


Рис. 1.15. Схема измерения мощности при наличии нейтрального провода

При отсутствии нейтрального провода измерение может быть произведено с помощью двух ваттметров (рис. 1.16).

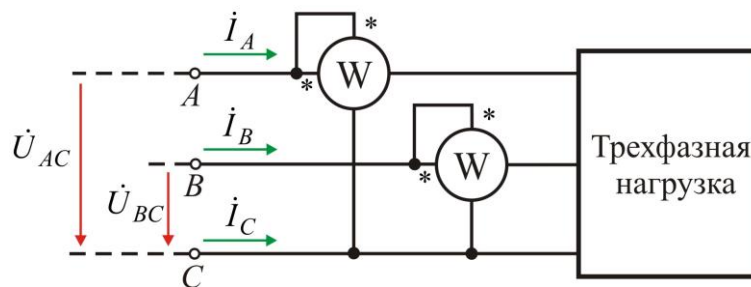


Рис. 1.16. Схема измерения мощности методом «двух ваттметров»

В соответствии с первым законом Кирхгофа для схемы, приведенной на рис. 1.16,

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Выражение такого же вида справедливо и для сопряженных токов:

$$I_A^* + I_B^* + I_C^* = 0 \Rightarrow I_C^* = -I_A^* - I_B^*. \quad (1.6)$$

Подставляя (1.6) в (1.4), получаем:

$$\tilde{S} = (\dot{U}_A - \dot{U}_C) I_A^* + (\dot{U}_B - \dot{U}_C) I_B^* = \dot{U}_{AC} I_A^* + \dot{U}_{BC} I_B^*. \quad (1.7)$$

В соответствии с выражением (1.7) при измерении активной мощности методом «двух ваттметров» к одному из них подводится напряжение  $\dot{U}_{AC}$  и ток  $\dot{I}_A$ , а ко второму – напряжение  $\dot{U}_{BC}$  и ток  $\dot{I}_B$  (см. рис. 1.16). Показания ваттметров складываются алгебраически.

Круговой заменой  $A$ ,  $B$  и  $C$  в выражении (1.7) можно получить выражения для других равноценных вариантов включения двух ваттметров.

## 2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.1. Измерение напряжений трехфазного источника питания

Перед началом выполнения лабораторной работы изучите описание лабораторного стенда (см.: Васюков С.А., Мисеюк О.И. «Стенд и приборы для исследования электрических цепей»: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Электротехника» и «Электротехника и электроника». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.).

Электрическая схема трехфазного источника питания приведена на рис. 2.1, монтажная – на рис. 2.2.

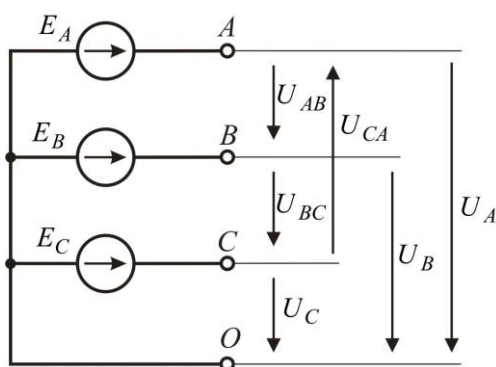


Рис. 2.1. Электрическая схема трехфазного источника питания

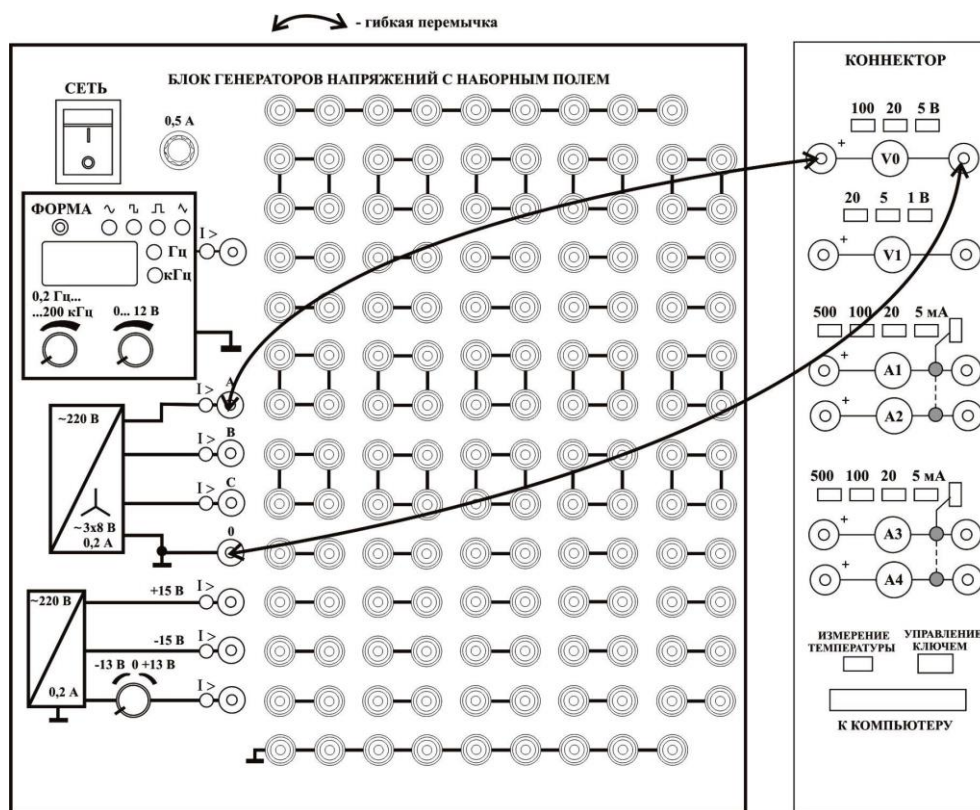


Рис. 2.2. Монтажная схема трехфазного источника питания

Для проведения измерений включите общее питание стенда, тумблер питания однофазного источника и тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ. Соедините проводами (см. рис. 2.2) виртуальный вольтметр V0 коннектора с выходами А и 0 трехфазного источника.

Активируйте левой кнопкой мыши иконку «ВП ТОЭ» на рабочем столе компьютера. В открывшейся вкладке **Приборы I** (рис. 2.3, а), установите приборы V0, V1, A1 для измерения действующих значений напряжения и тока. В окне **Приборы I** указателем мыши выберите вкладку **Меню**, в раскрывшемся списке активируйте вкладку **Приборы II** (рис. 2.3, б). Установите во второй паре виртуальных приборов V0-A1 вкладку **Активная мощность P**.

Измерьте фазное напряжение  $U_A$ , результат занесите в табл. 2.1. Переноса измерительные провода вольтметра V0 на другие выводы трехфазного источника питания, измерьте остальные фазные и линейные напряжения. Результаты отобразите в таблице 1. Убедитесь в симметрии источника питания и выполнении соотношения  $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$ . По окончании измерений выключите тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ.

Таблица 2.1

### Результаты измерений

Фазные напряжения			Линейные напряжения		
$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$



а

б

Рис. 2.3. Активация виртуальных приборов I (а) и приборов II (б)

## 2.2. Измерение напряжений и токов при соединении трехфазного потребителя звездой

Электрическая схема при соединении трехфазного источника и потребителя звездой приведена на рис. 2.4.

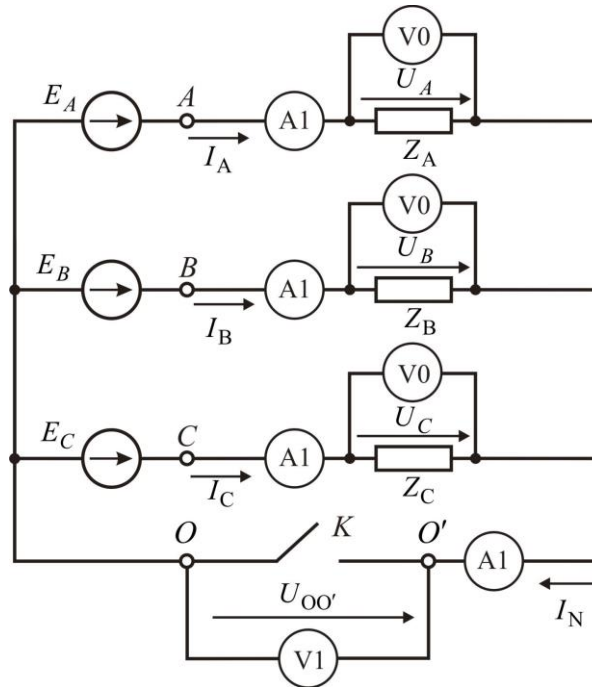


Рис. 2.4. Электрическая схема при соединении звездой

Здесь  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  - нагрузка в фазах  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответственно. Фазные токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  и ток в нейтральном проводе  $I_N$  измеряются поочередно, подключением виртуального амперметра A1. Фазные напряжения  $U_A, U_B, U_C$  измеряются поочередно, подключением виртуального вольтметра V0. Напряжение смещения нейтрали  $U_{OO'}$  (ключ  $K$  разомкнут, нейтральный провод отсутствует) измеряется виртуальным вольтметром V1.

Соберите монтажную схему, рис. 2.5.

### 2.2.1. Симметричная резистивная нагрузка

Замкните ключ (см. рис. 2.4, 2.5), соединяющий нейтральную точку источника  $O$ , с нейтральной точкой  $O'$  нагрузки. Включите тумблер СЕТЬ БЛОКА ГЕНЕРАТОРОВ. Измерьте фазное напряжение  $U_A$  (виртуальный вольтметр V0), фазный ток  $I_A$  (виртуальный амперметр A1) и активную мощность фазы  $P_A$  (вкладка **Приборы II**). Занесите показания в табл. 2.2 (графа «С нейтральным проводом»).

Разомкните ключ, проведите аналогичные измерения и занесите показания в табл. 2.2 (графа «Без нейтрального провода»).

Удалите жесткую перемычку  $П_B$  (см. рис. 2.5). Отсоедините измерительные провода виртуального амперметра  $A1$  от фазы  $A$  и присоедините их в той же полярности к клеммам, где ранее находилась жесткая перемычка  $П_B$ . Установите жесткую перемычку в фазу  $A$  (на место, где прежде были присоединены провода виртуального амперметра).

Замкните ключ, измерьте фазное напряжение  $U_B$ , фазный ток  $I_B$  и активную мощность фазы  $P_B$ . Занесите показания в табл. 2.2 (графа «С нейтральным проводом»).

Разомкните ключ, проведите аналогичные измерения и занесите показания в табл. 2.2 (графа «Без нейтрального провода»).

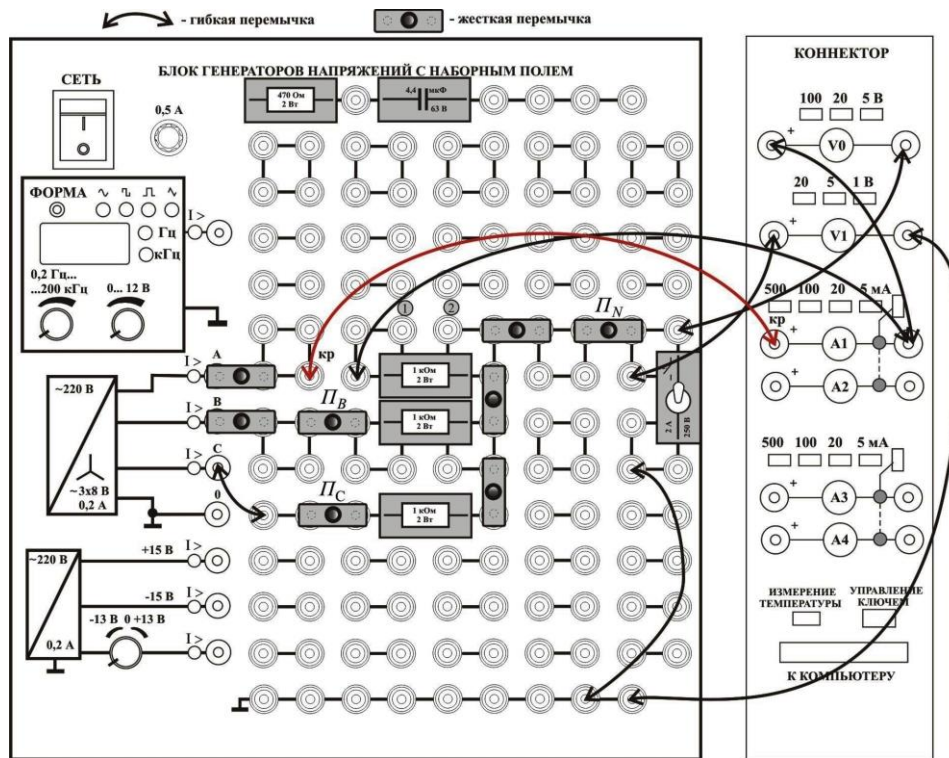


Рис. 2.5. Монтажная схема

Удалите жесткую перемычку  $П_C$  (см. рис. 2.5). Отсоедините измерительные провода виртуального амперметра  $A1$  от фазы  $B$  и присоедините их в той же полярности к клеммам, где ранее находилась жесткая перемычка  $П_C$ . Установите жесткую перемычку в фазу  $B$  (на место, где прежде были присоединены провода виртуального амперметра).

Таблица 2.2

Измеряемые величины	Нагрузка при соединении фаз звездой					
	симметричная активная $Z_A = Z_B = Z_C = R = 1 \text{ кОм}$		несимметричная активная $Z_B = Z_C = R = 1 \text{ кОм};$ $Z_A = R = 320 \text{ Ом}$		несимметричная смешанная $Z_B = Z_C = R = 1 \text{ кОм}; Z_A = 1 \text{ кОм}$ параллельно с конденсатором емкостью $C = 4,4 \text{ мкФ}$	
	С нейтральным проводом	Без нейтрального провода	С нейтральным проводом	Без нейтрального провода	С нейтральным проводом	Без нейтрального провода
Фазные токи, мА						
$I_A$						
$I_B$						
$I_C$						
Ток нейтрали $I_N$ , мА		0		0		0
Фазные напряжения, В						
$U_A$						
$U_B$						
$U_C$						
Напряжение смещения $U_{00'}$ , В	0		0		0	

Окончание табл.2.2

Измеряемые величины	Нагрузка при соединении фаз звездой					
	симметричная активная $Z_A = Z_B = Z_C = R = 1 \text{ кОм}$		несимметричная активная $Z_B = Z_C = R = 1 \text{ кОм};$ $Z_A = R = 320 \text{ Ом}$		несимметричная смешанная $Z_B = Z_C = R = 1 \text{ кОм}; Z_A = 1 \text{ кОм}$ параллельно с конденсатором емкостью $C = 4,4 \text{ мкФ}$	
	С нейтральным проводом	Без нейтрального провода	С нейтральным проводом	Без нейтрального провода	С нейтральным проводом	Без нейтрального провода
Измеренные мощности, мВт						
$P_A$						
$P_B$						
$P_C$						
$\sum P_{\text{изм}}$						
Расчитанные мощности, мВт						
$P_A$						
$P_B$						
$P_C$						
$\sum P_{\text{расч}}$						

Замкните ключ, измерьте фазное напряжение  $U_C$ , фазный ток  $I_C$  и активную мощность фазы  $P_C$ . Занесите показания в табл. 2.2 (графа «С нейтральным проводом»).

Разомкните ключ, проведите аналогичные измерения и занесите показания в табл. 2.2 (графа «Без нейтрального провода»).

По результатам измерений, рассчитайте мощность трехфазного потребителя  $\sum P_{\text{изм}} = P_A + P_B + P_C$  с нейтральным проводом и без него.

Удалите жесткую перемычку нейтрального провода  $П_N$  (см. рис. 2.5). Отсоедините измерительные провода виртуального амперметра А1 от фазы С и присоедините их в той же полярности к клеммам, где ранее находилась жесткая перемычка  $П_N$ . Установите жесткую перемычку в фазу С (на место, где прежде были присоединены провода виртуального амперметра).

Замкните ключ, измерьте ток нейтрального провода  $I_N$ . Занесите показания в табл. 2.2 (графа «С нейтральным проводом»).

Разомкните ключ, измерьте вольтметром V1 напряжение смещения нейтрали  $U_{OO'}$  и занесите показания в табл. 2.2 (графа «Без нейтрального провода»).

Установите все соединения в соответствии с первоначальной монтажной схемой (см. рис. 2.5).

### 2.2.2. Несимметричная резистивная нагрузка

Вставьте мини блок 470 Ом в гнезда ① и ② (см. рис. 2.5). Таким образом, в фазе А оказываются включенными параллельно резисторы с сопротивлениями 1 кОм и 470 Ом, а активное сопротивление фазы А становится равным  $Z_A = R \approx 320$  Ом.

Выполните те же измерения, что и в пункте 2.2.1, заносая результаты в табл. 2.2.

Установите все соединения в соответствии с первоначальной монтажной схемой (см. рис. 2.5).

### 2.2.3. Несимметричная смешанная нагрузка

Вставьте мини блок конденсатора емкостью  $C=4,4$  мкФ в гнезда ① и ②. Таким образом, в фазе А оказываются включенными параллельно резистор с сопротивлением 1 кОм и конденсатор емкостью 4,4 мкФ.

Выполните те же измерения, что и в пункте 2.2.1, заносая результаты в табл. 2.2.

Рассчитайте мощности фаз и мощность трехфазной нагрузки.

Для всех случаев рассчитайте мощности фаз и мощность трехфазной нагрузки по формулам соответственно

$$P_A = \frac{U_A^2}{R_A}; P_B = \frac{U_B^2}{R_B}; P_C = \frac{U_C^2}{R_C}, \sum P_{\text{расч}} = P_A + P_B + P_C,$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – измеренные фазные напряжения.

### 2.3. Измерение мощности трехфазной нагрузки «методом двух ваттметров»

Измерения проводятся для несимметричной смешанной нагрузки без нейтрального провода.

Соедините правый вывод виртуального вольтметра V0 с выводом В трехфазного источника (рис. 2.6). Проконтролируйте, чтобы ключ в нейтральном проводе был разомкнут.

**Важно!** При таком способе соединения на виртуальный вольтметр V0 подается напряжение  $U_{AB}$ , а на виртуальный амперметр A1 – ток  $I_A$ .

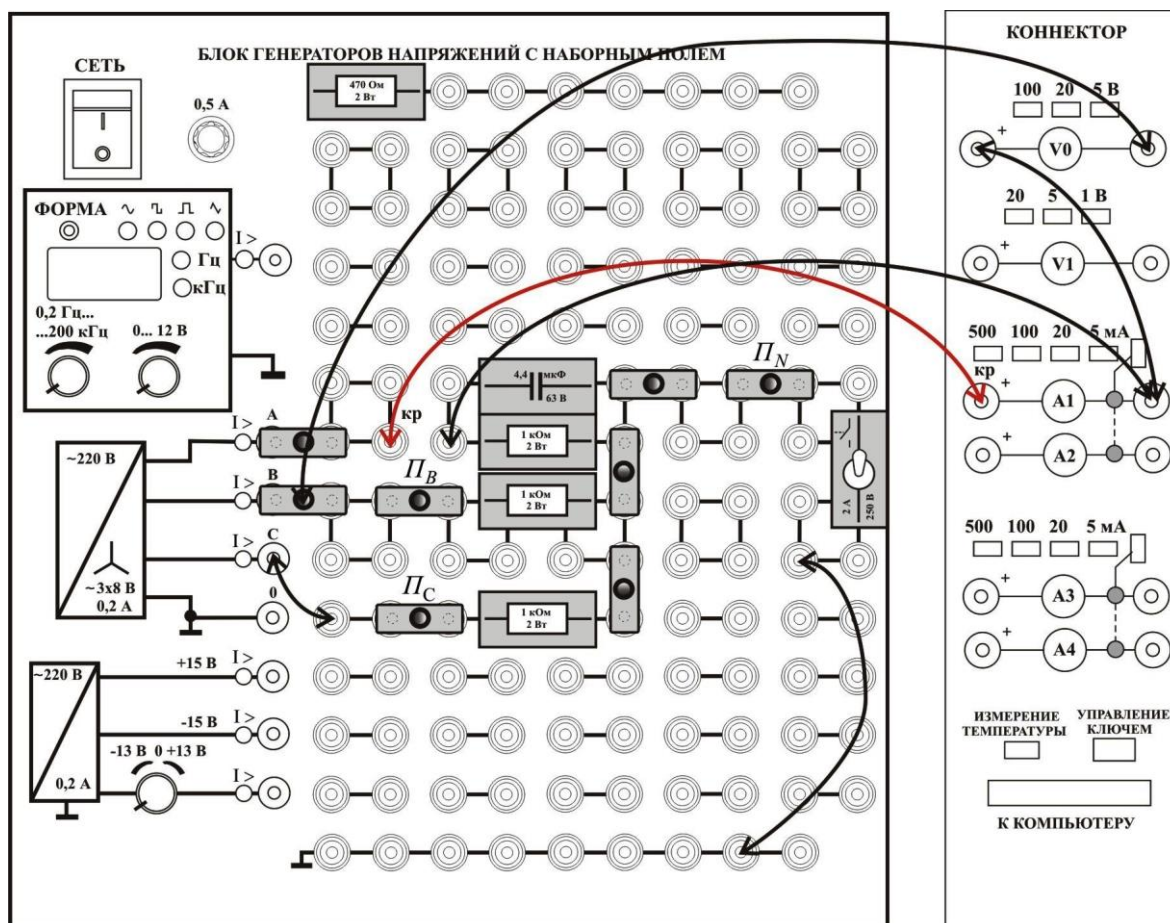


Рис. 2.6. Монтажная схема при измерении мощности «методом двух ваттметров»

Измерьте, используя вкладку **Приборы II**, мощность первого ваттметра  $P_1$ .

Удалите жесткую перемычку  $П_C$  (см. рис. 2.6). Отсоедините измерительные провода виртуального амперметра  $A1$  от фазы  $B$  и присоедините их в той же полярности, где ранее находилась жесткая перемычка  $П_C$ . Установите жесткую перемычку в фазу  $B$ .

**Важно!** При таком способе соединения на виртуальный вольтметр  $V0$  подается напряжение  $U_{CB}$ , а на виртуальный амперметр  $A1$  – ток  $I_C$ .

Измерьте, используя вкладку **Приборы II**, мощность второго ваттметра  $P_2$ .

Рассчитайте мощность трехфазного потребителя при измерении методом «двух ваттметров»  $\sum P_{\text{дв. вольтм.}} = P_1 + P_2$ , и сравните полученное значение с измеренным  $\sum P_{\text{изм.}}$ . Объясните, почему при проведенных измерениях  $\sum P_{\text{дв. вольтм.}}$  равна мощности трехфазного потребителя.

#### 2.4. Построение векторных диаграмм

Постройте по результатам измерений векторные диаграммы для всех шести случаев нагрузки. Используйте координатную сетку или миллиметровую бумагу. Построения проводите в выбранном масштабе, с использованием линейки и циркуля.

На каждой диаграмме отобразите векторы линейных напряжений  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  (В), векторы фазных напряжений  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  (В), векторы фазных токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  (мА), вектор тока в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  (мА) при нагрузке с нейтральным проводом и вектор напряжения смещения нейтрального провода  $\dot{U}_{O'O'}$  (В) при несимметричной нагрузке без нейтрального провода.

После выполнения всех расчетов результаты показать преподавателю и, получив его разрешение, выключить питание стенда.

#### ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Форма отчета или предоставляется студентам в электронном виде лектором потока, или распечатывается с сайта кафедры <http://fn.bmstu.ru/learning-work-fs-7/laboratory-works-fs-7> (дата обращения 09.01.2023).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая трехфазная цепь называется симметричной?
2. Поясните, что называется фазными и линейными напряжениями и токами.
3. Докажите теоретически, что при симметричной нагрузке ток в нулевом проводе отсутствует.
4. Как измерить мощность симметричной цепи?
5. Как измерить мощность несимметричной цепи с нейтральным проводом?
6. Как измерить мощность несимметричной цепи без нейтрального провода?
7. Поясните теоретически метод «двух ваттметров».
8. Объясните, почему при соединении звездой  $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$ .
9. Какие способы соединения трехфазного источника и нагрузки вы знаете?

## ЛИТЕРАТУРА

- Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. В 3 ч. Ч. 1. М.: Энергия, 1970. 592 с.
- Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н.* Электротехника. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 551 с.
- Касаткин А.С., Немцов М.В.* Электротехника. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 544 с.