

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
КАФЕДРА РАДИОФИЗИКИ

ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Учебное пособие

Казань 2024

УДК 621.391

Издается по решению
Учебно-методической комиссии института физики
протокол № 06 от 12 февраля 2024 г.

Автор

Кандидат физ.-мат. наук, доцент В.А. Тюрин,

Рецензент

кандидат физ.-мат. наук, доцент Р.И. Гумеров

Цепи трехфазного тока: учебное пособие / В.А. Тюрин. – Казань: Казанский федеральный университет, 2024. – 27 с.

Учебное пособие «Цепи трехфазного тока» предназначено для студентов второго курса, приобретающих навыки экспериментальных исследований в лаборатории по «Электротехнике и электронике» кафедры радиофизики КФУ. В пособии изложены общие вопросы, касающиеся системы трехфазных источников энергии и трехфазной нагрузки. Уделено внимание реализации конкретных включений типа «звезда» и «треугольник», а также вопросам симметрии нагрузки и аварийных ситуаций. Изложены алгоритмы экспериментальных измерений напряжения, тока и мощности в трехфазных цепях. Объем пособия достаточен для восприятия трехфазных цепей, как важнейшего элемента системы современного энергоснабжения.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Определение трехфазной системы. Получение трехфазного тока	4
2	Фаза трехфазной цепи. Соединение фаз генератора и нагрузки	6
3	Соединение фаз генератора и приемника «звездой»	6
3.1	Четырехпроводное соединение обмоток генератора «звезда с нулевым проводом»	6
3.2	Связь между линейными и фазными напряжениями	7
4	Соединение обмоток трехфазного генератора «треугольником»	8
5	Нагрузка в трёхфазной системе	10
5.1	Подключение нагрузки «звездой»	10
5.1.1	Симметричная нагрузка.	10
5.1.2	Несимметричная нагрузка	12
5.1.3	Аварийные режимы при включении нагрузки «звездой»	13
5.2	Подключение нагрузки «треугольником»	14
6	Мощность трехфазной системы	16
7	Измерение мощности в трехфазной сети	16
7.1	Метод одного ваттметра	17
7.2	Метод трёх ваттметров	17
7.3	Метод двух ваттметров	17
7.4	Измерение энергии в трехфазной сети	18
	Литература	19
8	Задание на проведение эксперимента	21
	I. Подключение нагрузки «звездой»	21
	Задание 1.1.	22
	Задание 1.2.	23
	II. Подключение нагрузки «треугольником»	24
	Задание 2.1	25
	III. Измерение мощности	26
	Задание 3.1	26

Цель учебного пособия – помощь при подготовке теоретической части лабораторной работы «Цепи трехфазного тока», а также знакомство с особенностями экспериментального исследования трехфазных цепей.

1. Определение трехфазной системы. Получение трехфазного тока

Трехфазная цепь – это совокупность трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки (нагрузок) и соединительных проводов [1 - 10].

Трехфазной системой ЭДС (напряжений) называется совокупность трёх электрически связанных однофазных систем одного генератора, в которых с одинаковой частотой действуют одинаковые по значению ЭДС, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120 градусов.

Трехфазная система переменного тока была разработана, а затем практически освоена выдающимся русским инженером-электротехником М. О. Доливо-Добровольским (1862 – 1919) в 1891 г. Им были разработаны трехфазные генератор, трансформатор и асинхронный двигатель. Простое устройство, относительная дешевизна, высокая надежность в эксплуатации трехфазных генераторов, трансформаторов и двигателей, более экономичная передача энергии на расстояние по сравнению с однофазной системой способствовали широкому промышленному внедрению трехфазной системы переменного тока по всему миру.

Простейший трёхфазный генератор, показанный на рисунке 1.1, состоит из двух основных частей: статора и ротора. На статоре – неподвижной части генератора, расположены три одинаковые обмотки, смещенные одна относительно

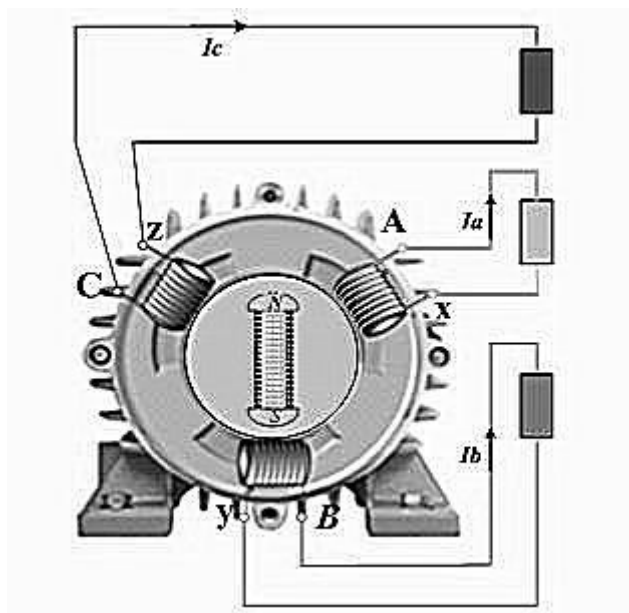


Рис. 1.1. Простейший трехфазный генератор

другой на 120° по внутренней поверхности сердечника. Начала обмоток обозначают буквами *A, B, C*, а их концы — буквами *X, Y, Z*. Каждую обмотку генератора и её электрическую цепь называют фазой. Цвета шин фаз стандартизированы: *AX* - желтый, *BY* – зелёный, *CZ* - красный для удобства технического обслуживания и для маркировки на станциях и подстанциях.

Подвижная часть генератора – ротор – это мощный электромагнит с обмоткой, получающей питание от источника постоянного тока. При вращении ротора будет вращаться и его

магнитный поток. В результате этого в каждой обмотке статора наводится синусоидальная ЭДС с максимальной амплитудой $E_{mA} = E_{mB} = E_{mC} = E_m$. Между ЭДС соседних фаз образуется угол сдвига по фазе относительно ЭДС соседней обмотки на 120° . Частота изменения ЭДС – f , пропорциональна скорости вращения ротора. Принимая за начало отсчета момент времени, когда ЭДС – E_A , в обмотке Ax равна нулю, то при вращении ротора против часовой стрелки уравнения ЭДС можно записать в следующем виде:

$$e_A(t) = E_m \sin \omega t, \quad (1.1)$$

тогда ЭДС второй обмотки:

$$e_B(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad (1.2)$$

а ЭДС третьей обмотки:

$$e_C(t) = E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \quad (1.3)$$

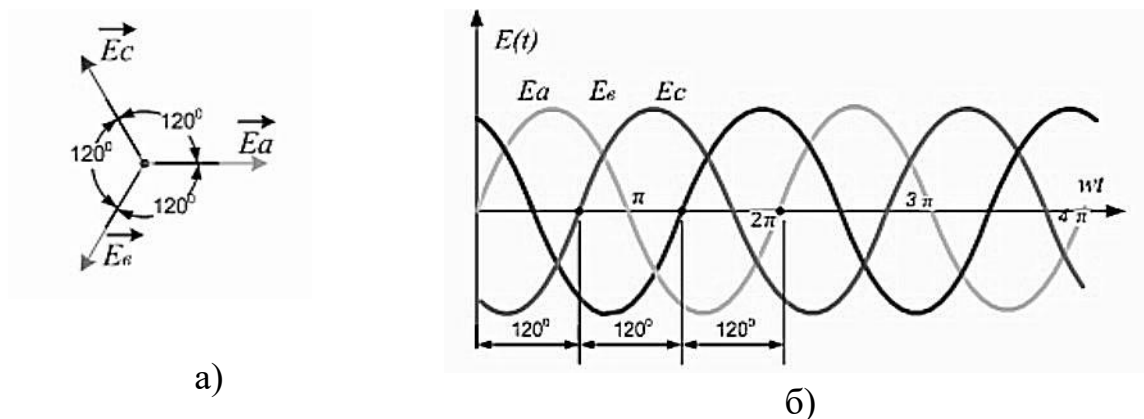


Рис. 1.2. Векторная(а) и временная (б) диаграммы ЭДС в фазных обмотках генератора

Этим уравнениям соответствуют векторная и временная диаграммы ЭДС, изображенные на рисунках 1.2, а и б. Если принять за исходный вектор ЭДС E_A , то ЭДС E_B отстает от E_A на 120° , а ЭДС E_C отстает от E_B тоже на 120° . Следовательно, максимальных значений ЭДС в фазах достигают сначала в фазе A , затем в B и далее в C . Векторы ЭДС вращаются против часовой стрелки и мимо неподвижной вертикальной оси они будут проходить в таком же порядке. То есть ЭДС всех фаз трехфазного генератора принимают максимальные (амплитудные) значения в последовательности $A-B-C$, которую принято называть прямой последовательностью фаз ЭДС.

Преимущества генерирования и преобразования электрической энергии в трехфазных цепях по сравнению с однофазными цепями заключается в следующем:

- меньшее количество меди и стали в одном трехфазном трансформаторе по сравнению с количеством материалов в трех однофазных трансформаторах;

- простота получения вращающегося магнитного поля в электродвигателях переменного тока и меньшие пульсации момента вращения на валу трехфазных генераторов и двигателей;
- элементы системы – трехфазный синхронный генератор, трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор – просты в производстве, экономичны и надежны в работе.

2. Фаза трехфазной цепи. Соединение фаз генератора и нагрузки

Под *фазой трехфазной цепи* понимают участок цепи, по которой протекает одинаковый ток. Под фазой понимается также аргумент ($\omega t - \Psi$) синусоидальной функции. Таким образом, в зависимости от рассматриваемого вопроса, фаза – это либо участок трехфазной цепи, либо аргумент гармонической функции [1 - 10].

Как уже говорилось, начала обмоток генератора (фазы) обозначают буквами A, B и C , а концы – X, Y и Z . Нагрузки соответствующих фаз обозначают строчными буквами соответственно a, b, c и x, y, z , рисунок 2.1. Выдающимся русским ученым М.О. Доливо-Добровольским предложены две схемы соединения – звездой и треугольником, которые применяются и в настоящее время. При соединении звездой концы обмоток статора X, Y и Z соединяются в одной точке N , называемой *нейтралью* (иногда эту точку обозначают символом «0» ноль), а начала обмоток выходят на линии электропередач (рис. 2.1, а слева). При соединении треугольником конец одной обмотки статора соединяется с началом другой обмотки. Ответвления от начала обмоток выходят на линии электропередач рисунок (2.1, б справа). Трехфазная нагрузка также может быть соединена по схеме «звезда» и «треугольник» (рисунок 2.1, а и б справа).

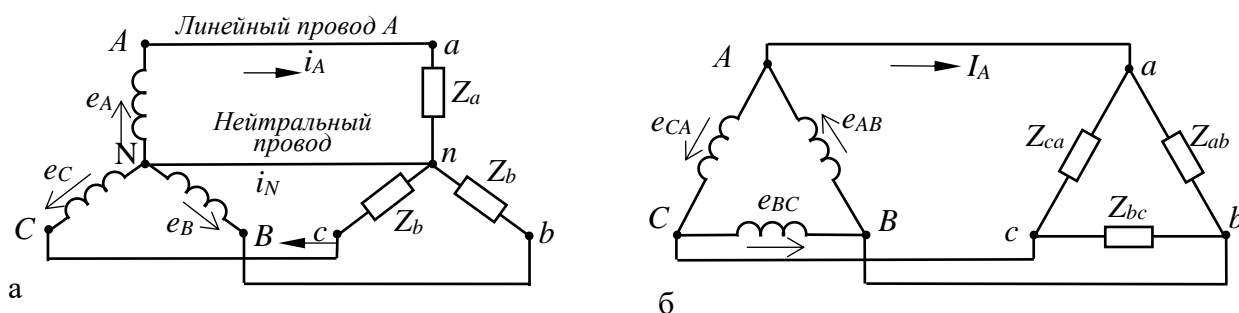


Рис. 2.1. Способы соединения обмоток генератора «звездой» (а) и «треугольником» (б)

3. Соединение фаз генератора и приемника звездой

3.1. Четырехпроводное соединение обмоток генератора «звезда с нулевым проводом»

При соединении обмоток звездой их концы X, Y и Z соединяют в одну точку 0 , называемую нулевой точкой или нейтралью (N) генератора.

От нулевой точки к потребителям энергии прокладывают нулевой или нейтраль-

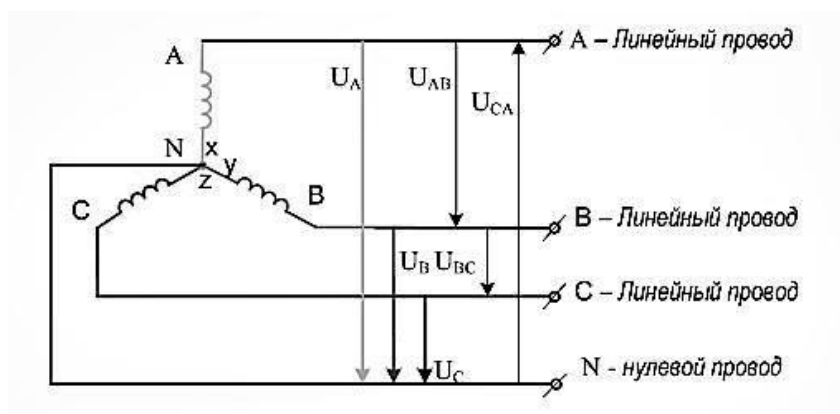


Рис. 3.1. Линейные и фазные напряжения при соединении «звезда с нулевым проводом»

ный провод. Кроме нулевого к потребителям энергии прокладывают три линейных провода, которые соединяются с началами обмоток A , B и C . Каждый линейный провод представляет собой отдельную фазу. Полученная таким образом система называется звездой с нулевым проводом – четырёхпроводная линия.

Напряжения между линейным и нулевым проводом (между началом и концом обмоток генератора) называют фазными напряжениями и обозначают U_A , U_B , U_C (в общем виде – U_ϕ). Токи в фазных обмотках генератора называются фазными токами I_A , I_B , I_C .

Напряжения между линейными проводами (т. е. между началами обмоток) называют линейными напряжениями и обозначают U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} (в общем виде – U_L). Причем порядок индексов указывает положительное направление этих напряжений во внешней цепи, например, U_{AB} направлено от A к B .

Токи в линейных проводах называются линейными токами I_A , I_B , I_C .

3.2. Связь между линейными и фазными напряжениями

На рисунке 3.2 показана векторная диаграмма фазных и линейных напряжений. Установим связь между фазными и линейными напряжениями.

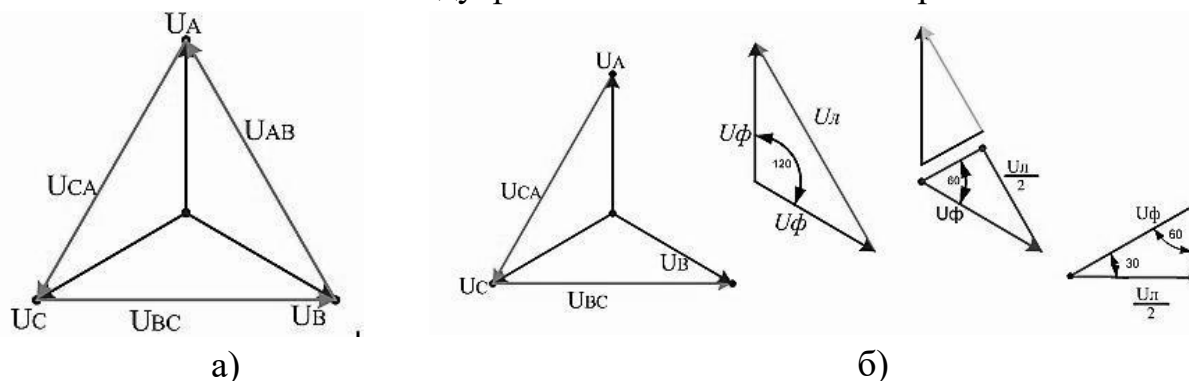


Рис. 3.2. Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений (а), определение связи между U_L и U_ϕ (б)

Выделим из векторной диаграммы, показанной на рисунке 3.2б, треугольник, образуемый парой векторов фазных напряжений и вектором линейного напряжения. Выделенный треугольник – с тупым углом, мы не умеем решать такие треугольники, поэтому разделим его на два прямоугольных треугольника. Полученные прямоугольные треугольники образуются векторами одного фазного напряжения и половинкой вектора линейного напряжения. Кроме этого, известны все его углы. Поскольку $\sin 60^\circ = \sqrt{3}/2$, то

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (3.1)$$

Фазные токи, протекающие по обмоткам генератора, после выхода в ЛЭП (линию электропередачи) становятся линейными, то есть:

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}. \quad (3.2)$$

При соединении обмоток «звездой» -

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}} \text{ и } I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}.$$

На практике существуют стандартные значения номинального напряжения сети: 660/380 В, 380/220 В, 220/127 В.

4. Соединение обмоток трехфазного генератора «треугольником»

Для соединения обмоток генератора треугольником (рисунок 4.1) конец первой обмотки *X* соединяют с началом второй обмотки *B*, конец второй обмотки *Y* с началом третьей обмотки *C* и конец третьей обмотки *Z* с началом первой обмотки *A*. От начала каждой обмотки *A*, *B*, *C* к потребителям энергии прокладывают линейный провод. Нулевой провод при этом соединении отсутствует. Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником получают трехпроводную, электрически связанную трехфазную систему. На рисунке 4.1 показаны напряжения, действующие в трёхфазной системе при соединении обмоток треугольником. Видно, что линейные напряжения генератора U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} являются в то же время и фазными

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}, \quad (4.1)$$

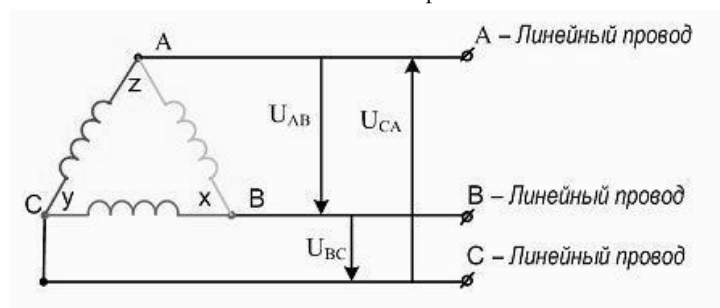


Рис. 4.1. Линейные и фазные напряжения при соединении по схеме «Треугольник»

поскольку к линейным проводам A и B включена обмотка $A - X$, а к линейным проводам B и C – обмотка $B - Y$.

Связь между фазными и линейными токами можно выяснить, проанализировав их направления в некоторый момент времени на рисунке 4.2.

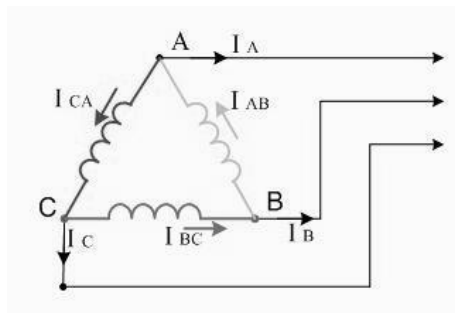


Рис. 4.2. Токи в трёхфазной системе при соединении обмоток генератора «треугольником»

Уравнения, связывающие линейные и фазные токи, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Линейные и фазные токи в системе «Треугольник»

Узел А:	$\vec{I}_{BC} = \vec{I}_B + \vec{I}_{CA}$	$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}$
Узел В:	$\vec{I}_{BC} = \vec{I}_B + \vec{I}_{AB}$	$\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}$
Узел С:	$\vec{I}_{CA} = \vec{I}_C + \vec{I}_{BC}$	$\vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}$

Векторная диа-

грамма токов и напряжений для соединения «треугольник» показана на рисунке 4.3.

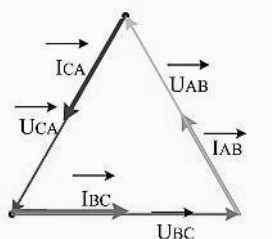
Пусть токи совпадают

по фазе с напряжением одноименных фаз. Это возможно, когда нагрузка чисто активна. Вынесем вектора токов параллельно себе и преобразуем их в трёхпалую звезду фазных токов (рисунок 4.4). После чего построим вектор любого линейного тока, например, линейного тока I_B (в проводе B) по уравнению. После выполнения указанных операций, получаем треугольник, аналогичный треугольнику напряжений (рисунок 4.4б) при исследовании соединения «звезда». В результате

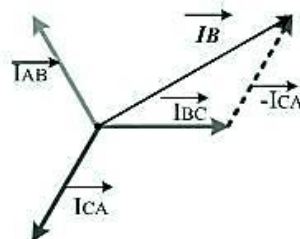
$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}. \quad (4.2)$$

При соединении обмоток треугольником -

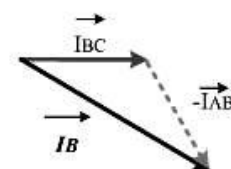
$$U_L = U_{\phi} \text{ и } I_L = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}.$$



а)



б)



в)

Рис. 4.3. Векторная диаграмма токов и напряжений (а), связь между фазными и линейными токами (б), (в) при соединении по схеме «Треугольник»

5. Нагрузка в трёхфазной системе

Нагрузку в трёхфазной системе, равно как и обмотки генератора можно включить, соединяя звездой или треугольником. В зависимости от равномерности загрузки фаз, трёхфазная система может быть симметричной и несимметричной.

5.1. Подключение нагрузки «звездой»

Рассмотрим схему трёхфазной цепи при трехпроводном соединении потребителей «звездой» (рисунок 5.1).

- $U_{\phi A}, U_{\phi B}, U_{\phi C}$ – фазные напряжения или напряжения на каждой фазе (напряжения между началом и концом соответствующей фазы); $I_{\phi A}, I_{\phi B}, I_{\phi C}$ – фазные токи – токи в фазах приемника;
 - U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные или междуфазные напряжения (между двумя линейными проводами, напряжения между началами двух соседних фаз или совсем просто – между двумя фазами);
 - I_A, I_B, I_C – линейные токи – токи в линиях электропередачи. Для схемы соединения звездой (рисунок 4.1) очевидно равенство фазных и линейных токов. Независимо от характера нагрузки:
- $$\vec{I}_{Al} = \vec{I}_{A\phi}; \quad \vec{I}_{Bl} = \vec{I}_{B\phi}; \quad \vec{I}_{Cl} = \vec{I}_{C\phi}; \quad \vec{I}_l = \vec{I}_\phi.$$

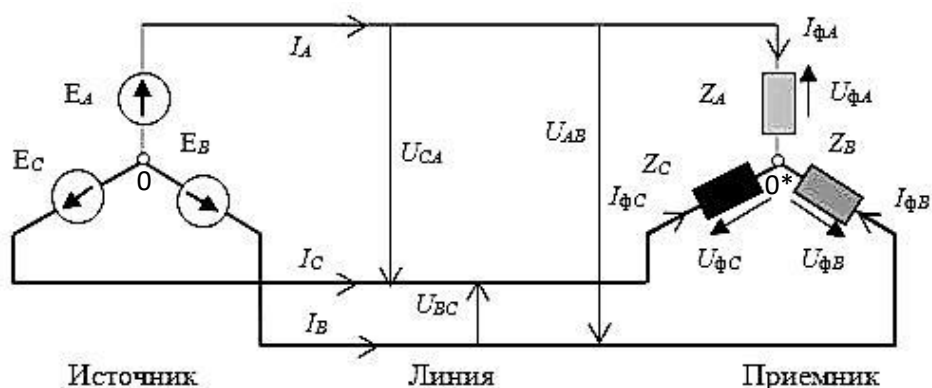


Рис. 5.1. Схема трехпроводного соединения потребителей «звездой»

5.1.1. Симметричная нагрузка.

При симметричной (равномерной) нагрузке сопротивления всех фаз – одинаковы

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi, \quad (5.1)$$

$$(|Z_a| = |Z_b| = |Z_c| = |Z_\phi|, \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_\phi = \arctg X_\phi/R_\phi).$$

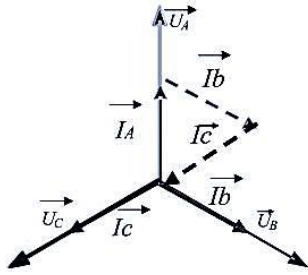


Рис. 5.2. Векторная диаграмма фазных токов и напряжений при соединении потребителей «звездой» в симметричном режиме

Тогда при равенстве фазных напряжений

$$U_{\phi A} = U_{\phi B} = U_{\phi C} \quad (5.2)$$

равны между собой и фазные (линейные) токи

$$I_{\phi A} = I_{\phi B} = I_{\phi C} = I_A = I_B = I_C.$$

При активной нагрузке, когда $X_{\phi} = 0$, сдвиг фаз между напряжением и током будет отсутствовать.

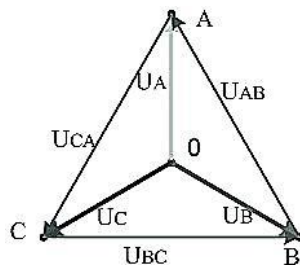
На рисунке 5.2 показана векторная диаграмма токов и напряжений для симметричной нагрузки, с активными потребителями на всех фазах. Воспользуемся этим построением для определения связи между фазными и линейными параметрами цепи при симметричной нагрузке.

На рисунке 5.3 представлена векторная диаграмма для всех действующих напряжений в симметричном режиме. Пользуясь этими диаграммами, можно записать соотношения фазных и линейных напряжений в векторной форме

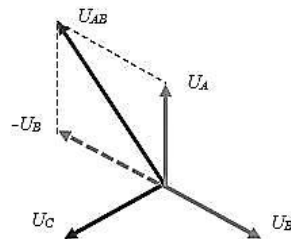
$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B; \quad (5.2)$$

$$\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C; \quad (5.3)$$

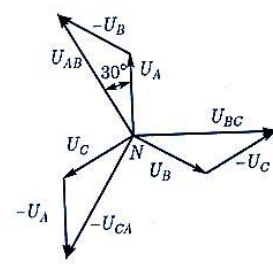
$$\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A. \quad (5.4)$$



а)



б)



в)

Рис. 5.3. Векторные диаграммы напряжений (а), связь между линейным и фазным напряжением (б) и (в)

Переменные токи, ЭДС и напряжения всегда суммируются векторно. Поскольку токи всех фаз втекают в одну точку, то их векторная сумма будет равна нулю, как показано на рисунке 5.4а: $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$. Анализ векторных диаграмм на рисунке 5.4б приводит к следующим соотношениям для напряжений на симметричной нагрузке:

$$\vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C = 0, \quad (5.5)$$

$$\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} + \vec{U}_{CA} = 0. \quad (5.6)$$

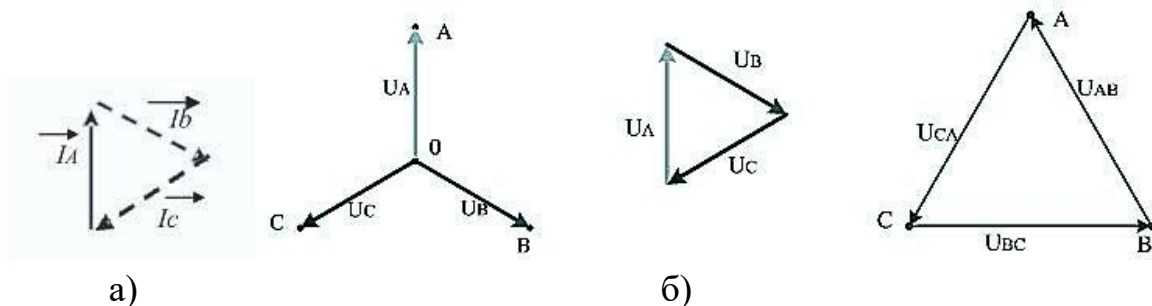


Рис. 5.4. Фазные токи и напряжения при симметричной нагрузке:
а – сумма токов, б – звезда напряжений и сумма векторов напряжения

5.1.2. Несимметричная нагрузка

Если нагрузка на фазах неодинакова: $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, в 3-х фазной системе нарушается баланс токов. При неравномерной (несимметричной) нагрузке между точками «0» и «0*» (рисунок 5.1) возникает напряжение смещения или асимметрия

$$\vec{U}_{00^*} = \frac{\vec{E}_A Y_A + \vec{E}_B Y_B + \vec{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (5.7)$$

Это приводит к тому, что фазные напряжения приемника определяются с учетом напряжения смещения

$$\begin{aligned} \vec{U}_A^* &= \vec{E}_A - \vec{U}_{00^*}; \\ \vec{U}_B^* &= \vec{E}_B - \vec{U}_{00^*}; \\ \vec{U}_C^* &= \vec{E}_C - \vec{U}_{00^*}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Тогда фазные токи можно определить как:

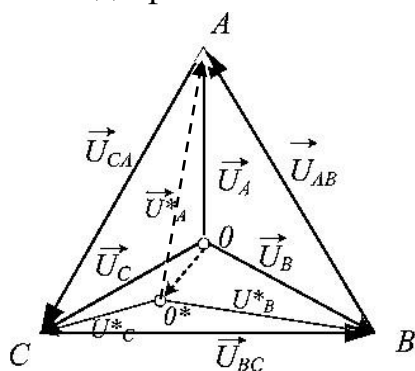


Рис. 5.5. Векторная диаграмма напряжений при несимметричной нагрузке

$$\begin{aligned} \vec{I}_{\phi A}^* &= \vec{I}_A^* = \frac{\vec{U}_A^*}{Z_A} = \vec{U}_A^* Y_A; \\ \vec{I}_{\phi B}^* &= \vec{I}_B^* = \frac{\vec{U}_B^*}{Z_B} = \vec{U}_B^* Y_B; \\ \vec{I}_{\phi C}^* &= \vec{I}_C^* = \frac{\vec{U}_C^*}{Z_C} = \vec{U}_C^* Y_C. \end{aligned} \quad (5.9)$$

На рисунке 5.5 показано, как при несимметричной нагрузке происходит смещение нейтральной точки, то есть появляется напряжение смещения – «перекос фаз».

Для обеспечения симметричной системы напряжений во всех фазах и независимой работы отдельных приемников применяется схема «звезды» с нулевым проводом (рисунок 5.6), или четырехпроводная система.

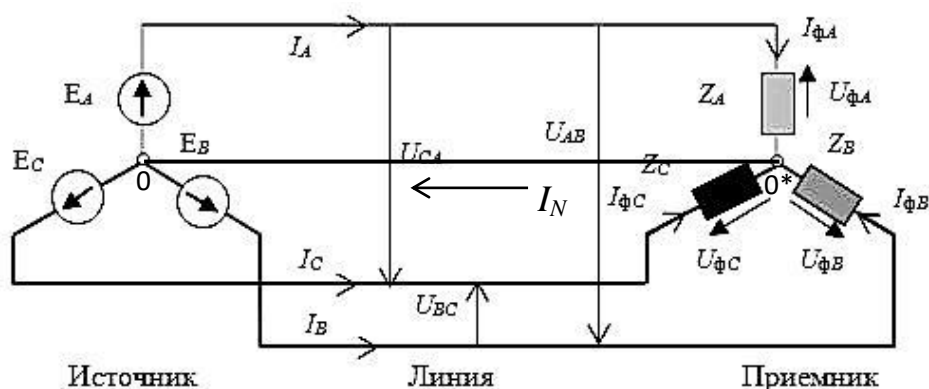


Рис. 5.6. Схема четырехпроводного соединения потребителей «звездой»

При возникновении неравномерности загрузки фаз в нулевом проводе возникает ток из-за разной потребляемой фазами мощности.

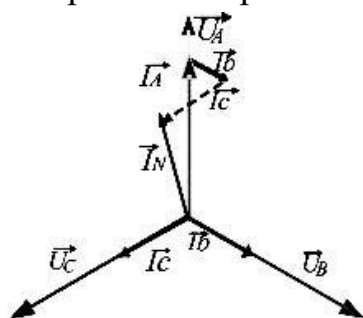


Рис. 5.7. Векторная диаграмма для определения тока в нулевом проводе при неравномерной нагрузке

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = \vec{I}_N. \quad (5.11)$$

Однако поскольку потенциалы нейтральных точек источника и приемника с помощью нулевого провода принудительно уравнены, звезда векторов фазных напряжений приемника точно совпадает со звездой фазных напряжений источника.

На нулевом проводе никогда не ставят выключателей и предохранителей. Необходимо, чтобы он был всегда в готовности взять на себя неравномерность нагрузки фаз.

Обрыв «нуля» считается аварийным режимом.

5.1.3. Аварийные режимы при включении нагрузки «звездой»

- Обрыв фазы приемника при отключенном нулевом проводе

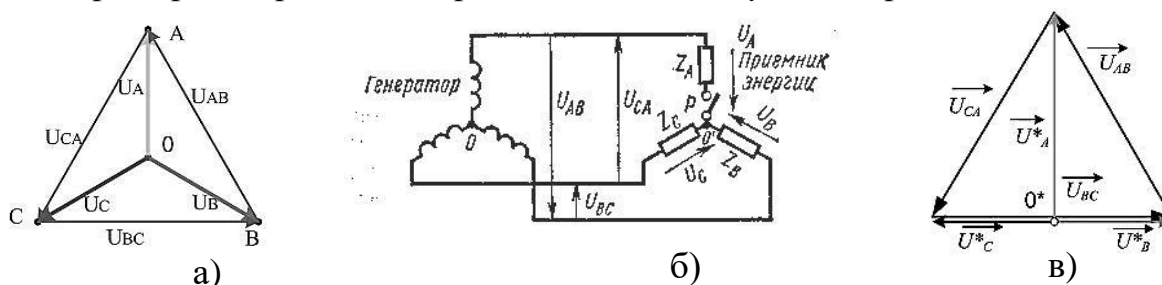


Рис. 5.8. Векторная диаграмма при равномерной нагрузке (а); модель обрыва фазы (б) и векторная диаграмма при обрыве фазы А (в)

Чтобы создать неравномерную нагрузку (рисунок 5.8), отсоединим от генератора первую фазу приемника (для этого отключим рубильник Р). При этом цепь с последовательным соединением двух равных сопротивлений Z_B и Z_C будет

находиться под линейным напряжением U_{BC} . Падения напряжения на них будут одинаковы и равны половине напряжения U_{BC} . Следовательно, нулевая точка $0'$ окажется посередине отрезка BC . Соединив точку $0'$ с вершинами треугольника A , B и C , получим векторы фазных напряжений U_A^* , U_B^* , U_C^* [6].

Важно! При обрыве одной фазы в трёхпроводной трехфазной цепи: напряжение на поврежденной фазе увеличивается до $\sqrt{3}/2 U_L$ ($0,87 U_L$), а напряжение на здоровых фазах падает до $0,5 U_L$.

- Короткое замыкание фазы приемника при отключенном нулевом проводе

Рассмотрим неравномерную нагрузку в аварийном режиме, когда происходит короткое замыкание на одной из рабочих фаз, например, на фазе A (рисунок 5.9).

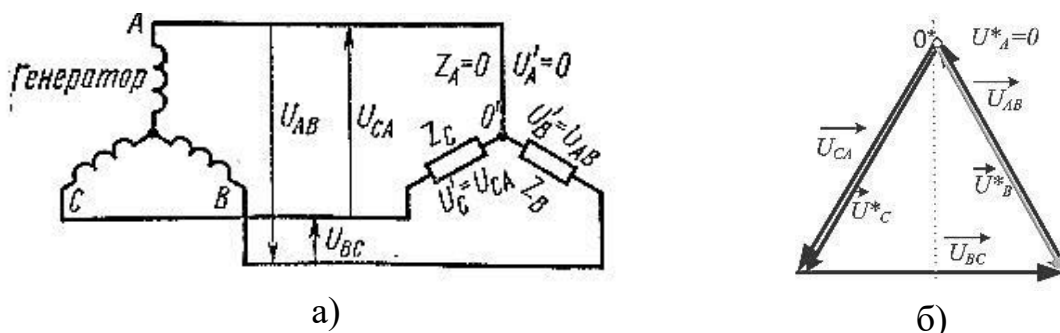


Рис. 5.9. Моделирование короткого замыкания фазы A (а); векторная диаграмма напряжений при коротком замыкании фазы A (б)

Для моделирования режима короткого замыкания, линейный провод A соединяется с нулевой точкой приемника энергии. Сопротивление КЗ равно нулю т.е. $Z_{AKЗ} = 0$. А сопротивления здоровых фаз остаются прежними, одинаковыми друг другу: $Z_B = Z_C$. Поэтому напряжение на первой фазе падает до нуля, а на второй и третьей фазах увеличивается до линейного напряжения: $U_A^* = 0$; $U_B^* = U_{AB}$; $U_C^* = U_{CA}$. Нулевая точка $0'$ при этом совпадает с вершиной A треугольника напряжений, рисунок 5.9, б.

5.2. Подключение нагрузки «треугольником»

Схема соединения нагрузки треугольником показана на рисунке 5.10. При равномерной нагрузке применимы все соотношения для напряжений и токов, полученные в разделе 4. А именно, при соединении обмоток генератора «треугольником» $U_L = U_\phi$ и $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi$.

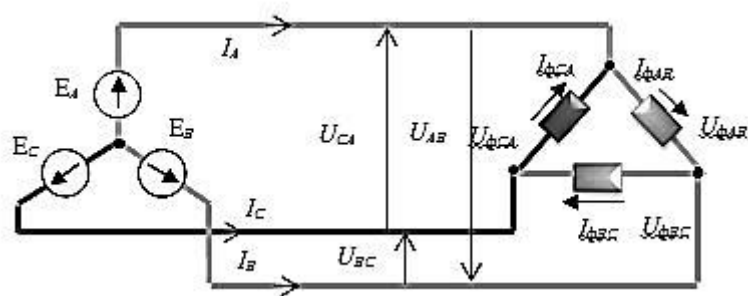


Рис. 5.10. Трехфазная система при включении нагрузки «треугольником»

Если в каждую фазу включена разная нагрузка, то система работает в неравномерном (несимметричном) режиме. Пример такой нагрузки показан на рисунке 5.11. В этом случае в каждой фазе протекает ток, обратно пропорциональный сопротивлениям нагрузки

$$\vec{I}_A = \frac{\vec{U}}{z_A}, \quad \vec{I}_B = \frac{\vec{U}}{z_B}, \quad \vec{I}_C = \frac{\vec{U}}{z_C}. \quad (5.12)$$

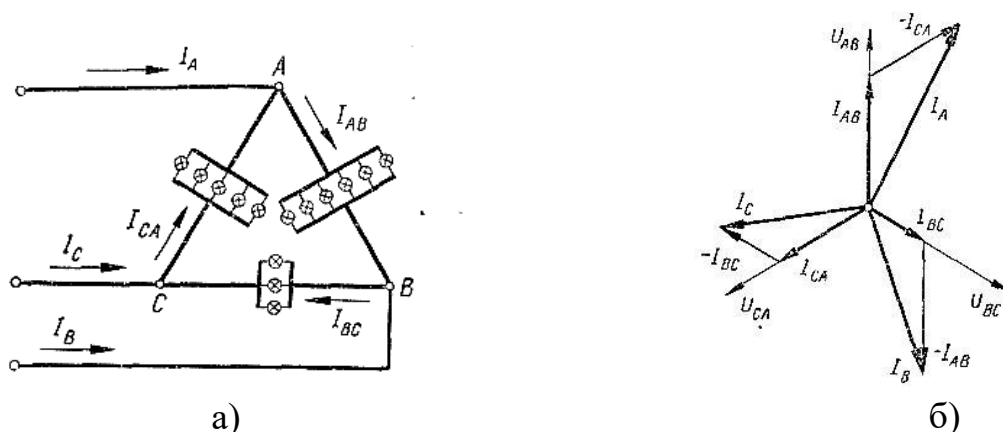


Рис. 5.11. Схема подключения (а) и векторная диаграмма токов при неравномерной нагрузке (б)

Это неблагоприятный режим, поэтому трехпроводная система с соединением нагрузки «треугольником» применяется для потребителей с равномерной

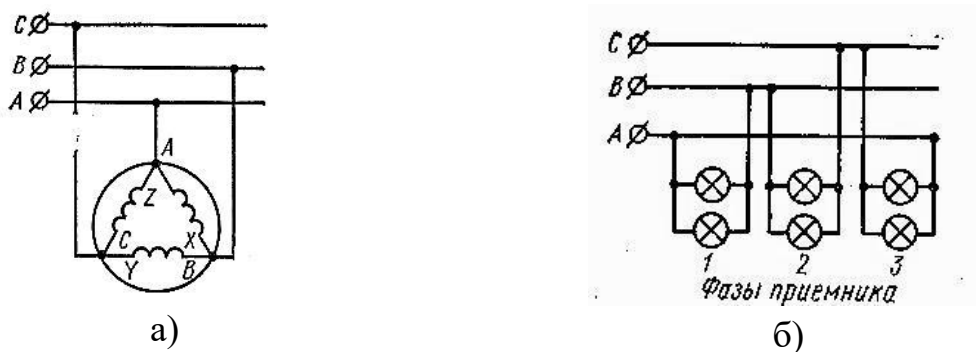


Рис. 5.12. Включение потребителей в трёхфазную сеть по схеме «треугольник» в режиме равномерной нагрузки; а – трехфазный двигатель, б – осветительная установка

нагрузкой фаз, например, электродвигатель, обмотки статора которого при любом способе их соединения представляют собой равномерную нагрузку, рисунок 5.12.

В трехфазных установках нередки случаи, когда одна часть нагрузок включена «звездой», а другая часть – «треугольником» (рисунок 5.13). Например, в четырехпроводной системе с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ электрические лампы могут быть включены «звездой» на фазное напряжение $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$, а трехфазные электрические двигатели и нагревательные устройства – «треугольником» на линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$.

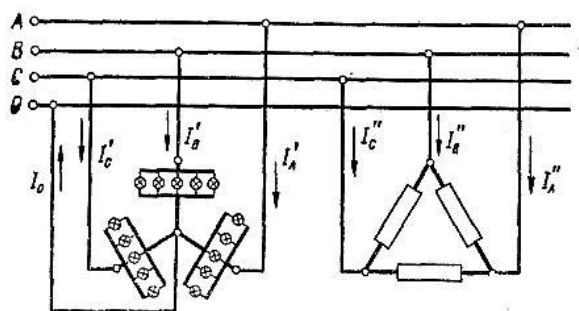


Рис. 5.13. Включение нагрузки «звездой» и «треугольником» в четырехпроводную трехфазную систему

6. Мощность трехфазной системы

При симметричной нагрузке, когда нагрузка на всех фазах одинакова по характеру и значению, суммарная трёхфазная мощность определится следующим образом [1 – 10].

Активная трёхфазная мощность:

$$P = 3I_{\text{ф}}U_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi. \quad (6.1)$$

Реактивная трёхфазная мощность:

$$Q = 3 I_{\text{ф}}U_{\text{ф}} \cdot \sin \varphi. \quad (6.2)$$

Если учесть, что для схемы соединения «звездой»: $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$, $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$, а для схемы соединения «треугольником»: $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$, $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$, то трехфазную мощность при симметричной нагрузке можно определить как:

$$P = 3I_{\text{ф}}U_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3}I_{\text{л}}U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi, \quad (6.3)$$

$$Q = 3I_{\text{ф}}U_{\text{ф}} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3}I_{\text{л}}U_{\text{л}} \cdot \sin \varphi. \quad (6.4)$$

Полная трёхфазная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}. \quad (6.5)$$

7. Измерение мощности в трехфазной сети

В зависимости от величины и характера нагрузки фаз мощность в трёхфазной системе можно определить методом одного, двух или трёх ваттметров. Кратко рассмотрим их.

7.1. Метод одного ваттметра

В случае равномерной нагрузки мощность, потребляемая от трехфазной системы, может быть определена одним однофазным ваттметром, включенным по схеме, показанной на рисунке 7.1. В четырехпроводной системе (с нулевым проводом) токовая обмотка ваттметра включается последовательно в один из линейных проводов, а обмотка напряжения – между теми же линейным и нулевым проводами.

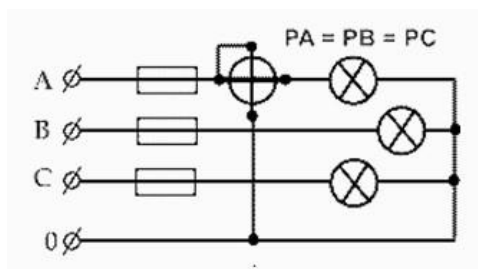


Рис. 7.1. Метод одного ваттметра

Общая мощность равна $P = 3 \times P_1$.

7.2. Метод трёх ваттметров

При несимметричной нагрузке одного ваттметра для определения мощности трехфазной системы недостаточно. В четырехпроводной системе необходимо применение трех ваттметров (рисунок 7.2), обмотки напряжений которых включаются между нулевым и соответствующим линейным проводами. Каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы. Мощность трехфазной системы равна сумме показаний трех ваттметров, т. е.

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

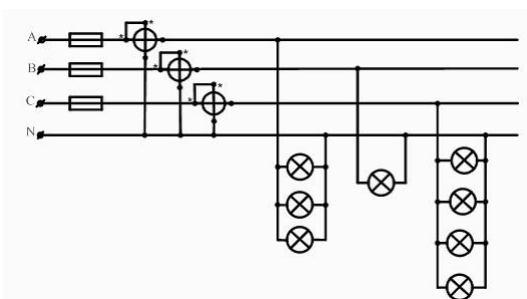


Рис. 7.2. Метод трёх ваттметров

7.3. Метод двух ваттметров

В трехпроводной системе при симметричной и несимметричной нагрузке наиболее часто используют метод двух ваттметров (рисунок 7.3), который не может быть применен в четырехпроводной системе.

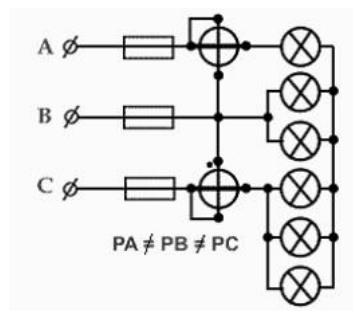


Рис. 7.3. Метод двух ваттметров

В схеме метода двух ваттметров обмотки напряжений каждого ваттметра соединены с входным зажимом обмотки тока и линейным проводом, оставшимся свободным. Полная мощность трехфазной системы равна сумме показаний ваттметров, т. е. $P = P_1 + P_2$.

7.4. Измерение энергии в трехфазной сети

Энергия в трехфазной системе измеряется как однофазными, так и трехфазными счетчиками электрической энергии. Однофазные счетчики включают в трехфазную сеть так же, как и ваттметры. Трехфазные счетчики состояются из двух или трех однофазных счетчиков, размещенных в одном корпусе и имеющих общий счетный механизм, и называются соответственно двухэлементными или трехэлементными.

В трехпроводной системе (без нулевого провода) применяют двухэлементные, а в четырехпроводной системе (с нулевым проводом) – трехэлементные счетчики. Схема включения счетчика электрической энергии указывается на съемной крышке, которой закрывается панель зажимов.

Схема включения двух ваттметров для измерения энергии однородной трехфазной нагрузки представлен на рисунке 7.4.

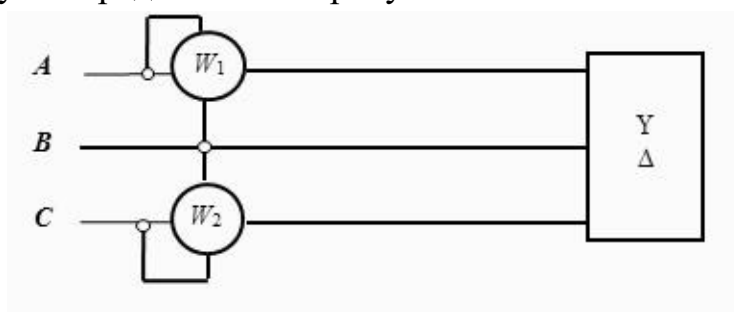


Рис. 7.4. Схема измерения энергии в трёхфазной цепи методом двух ваттметров

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение трехфазной системы переменного тока.
2. Какое соединение называется соединением «звездой»?

3. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при соединении «звездой»?
4. Какое соединение называется соединением «треугольником»?
5. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при соединении «треугольником»?
6. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе?
7. Какова связь между линейными и фазными напряжениями при соединении «звездой»?
8. Какова связь между линейными и фазными токами при соединении «треугольником»?
9. Какие способы измерения мощности трехфазной системы вы знаете?
10. В каких случаях применяется каждый из них?
14. Какова связь между периодом и частотой?
15. Дайте определение трехфазной системы переменного тока.
16. Какие способы измерения мощности трехфазной системы вы знаете?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трехфазные цепи переменного тока. Текст: электронный. – URL: <https://clck.ru/32nZCg> (дата обращения 06.04.2023) - Режим доступа: свободный.
2. Ашанин, В. Н. Трехфазные цепи : учеб. пособие / В. Н. Ашанин, О. Н. Регеда. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 52 с. (Высшее образование) ISBN 978-5-906855-76-3. – Текст: электронный. – URL: <https://clck.ru/344ZTF> (дата обращения 06.04.2023). – Режим доступа: свободный.
3. Марченко, А. Л. Электротехника и электроника: Учебник. В 2 томах. Том 1: Электротехника / А.Л. Марченко, Ю.Ф. Опадчий - Москва : НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 574 с. ISBN 978-5-16-009061-0. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/420583> (дата обращения: 17.03.2023). – Режим доступа: по подписке.
4. Комиссаров Ю. А. Общая электротехника и электроника: учебник / Ю.А. Комиссаров, Г.И. Бабокин ; под ред. П.Д. Саркисова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 479 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — [www.dx.doi.org/10.12737/13474](http://dx.doi.org/10.12737/13474). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/739609>
5. Ситников А. В. Основы электротехники: Учебник - М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2017. - 288 с.: 60х90 1/16 (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-906923-14-1 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/791717>

6. Лоторейчук Е. А. Теоретические основы электротехники: учебник / Е.А. Лоторейчук. — М.: ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2017. — 317 с. — (Профессиональное образование). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/859018>
7. Гальперин М. В. Электротехника и электроника: Учебник / Гальперин М.В. - М.:Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 480 с.: 60х90 1/16. - (Профессиональное образование) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-91134-783-3 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/553180>
8. Славинский А. К. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие / А.К. Славинский, И.С. Туревский. — М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2017. — 448 с. — (Профессиональное образование). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/894745>
9. Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники : учебник / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. — 10-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 736 с. — ISBN 978-5-8114-0523-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/112073> (дата обращения: 31.03.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
10. Ермуратский, П. В. Электротехника и электроника : учебник / П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин. — Москва : ДМК Пресс, 2011. — 417 с. — ISBN 978-5-94074-688-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/908> (дата обращения: 31.03.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При выполнении лабораторной работы используются блоки «Питание» – блок 1, «Исследование трехфазных цепей переменного тока» – блок 2 и «Измерительные приборы» – блок 3.

I. ПОДКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗКИ «ЗВЕЗДОЙ»

1.1. Схема трехпроводного соединения

Схема трёхфазной трехпроводной цепи при соединении потребителей «звездой» показана на рисунке 8.1.

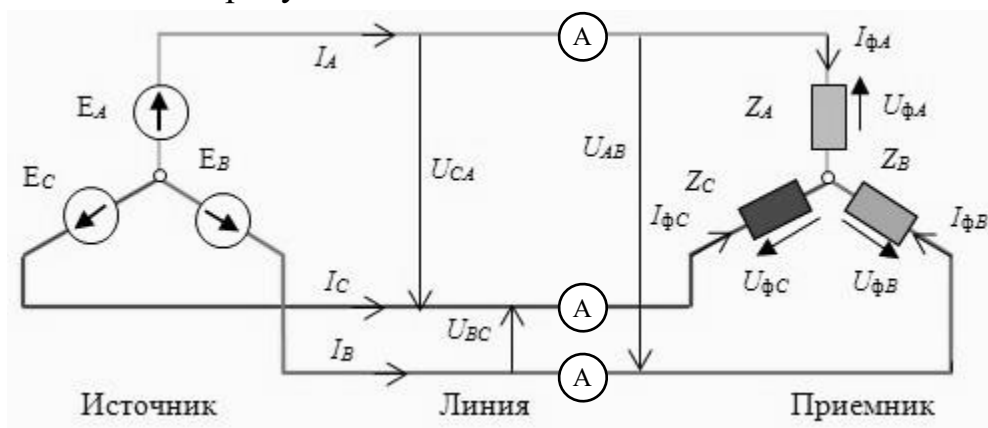


Рис. 8.1. Трехпроводная схема соединения потребителей «звездой»

- $U_{\phi A}$, $U_{\phi B}$, $U_{\phi C}$ – фазные напряжения или напряжения на каждой фазе (напряжения между началом и концом соответствующей фазы);
- I_A , I_B , I_C – фазные токи – токи в фазах приемника;
- U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – линейные или междуфазные напряжения (между двумя линейными проводами, напряжения между началами двух соседних фаз или совсем просто – между двумя фазами).

Важно! Особенностью трёхфазной системы с соединением «звезда» является наличие двух значений напряжения. Для «звезды» справедливо: $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}$, $I_{\phi} = I_{\text{л}}$. На практике существуют стандартные значения номинального напряжения сети: 660/380 В; 380/220 В, 220/127 В.

АВАРИЙНЫЕ СОСТОЯНИЯ.

Важно!

- При обрыве одной фазы в трёхпроводной трехфазной цепи: напряжение на поврежденной фазе увеличивается до $0,5\sqrt{3}U_{\text{л}}$ ($0,87U_{\text{л}}$), а напряжения на здоровых фазах падает до $0,5U_{\text{л}}$.

- При коротком замыкании нагрузки в одной из фаз, напряжение на нагрузке этой фазы уменьшится до 0, а на второй и третьей — увеличится до $U_{\text{Л}}$.

ЗАДАНИЕ 1.1.

1. Соединить блоки 1 и 2 согласно рис. 8.2.
2. Включить питание блока 1, нажав большую зеленую кнопку в левой части блока.

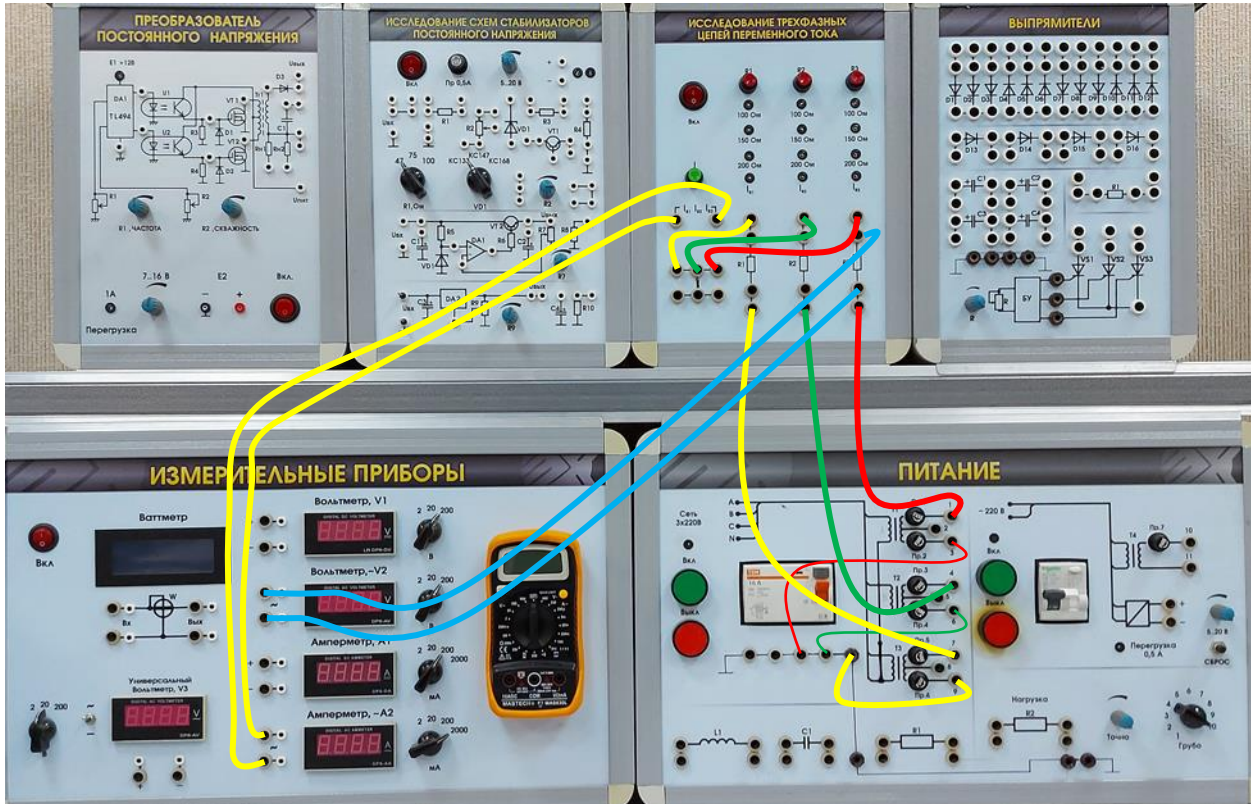


Рис. 8.2. Монтажная схема трехпроводного соединения нагрузки «звездой»

4. Красными кнопками R1, R2, R3 устанавливаем значение сопротивлений резисторов нагрузки 200 Ом и записываем в таблицу 1.
5. Вольтметром переменного тока $\sim V2$ (блок 3) измеряем фазные и линейные напряжения.
6. Амперметром переменного тока $\sim A2$ (блок 3) измеряем фазные токи при разных значениях сопротивления нагрузки, подключив его к гнездам I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} блока 2. Цепь измеряемого тока переключаем зеленой кнопкой «I» в левой части блока 2. Результаты записываем в таблицу 1.

Таблица 1

	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
	200	200	200	150	150	150	100	100	100	100	150	200	100	100	∞
$U_{\text{ФА}}$															

$U_{\Phi B}$															
$U_{\Phi C}$															
U_{AB}															
U_{BC}															
U_{CA}															
$I_{\Phi A}$															
$I_{\Phi B}$															
$I_{\Phi C}$															
I_0															

1.2. СХЕМА ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОГО СОЕДИНЕНИЯ.

На рисунке 8.3 показана схема четырехпроводного соединения трехфазной нагрузки «звездой». Четвертый провод, так называемый «нулевой» провод выравнивает «перекос фаз», возникающий при несимметричной нагрузке.

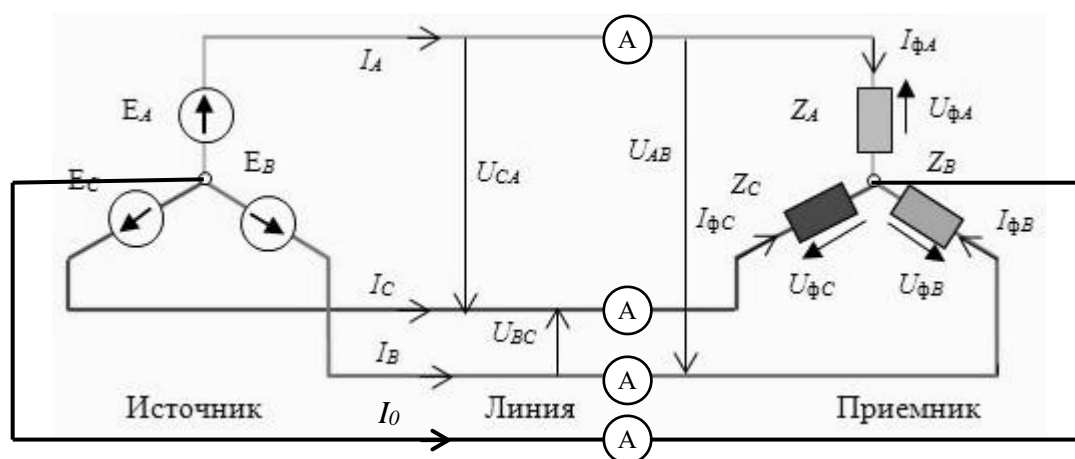


Рис. 8.3. Четырехпроводная схема соединения потребителей «звездой»

ЗАДАНИЕ 1.2.

1. При выключенном питании обоих блоков соединяем общие («нулевые») точки генератора (блок 1) и нагрузки (блок 2) амперметром переменного тока $\sim A2$ (блок 3), как показано на рисунке 8.4.
2. Провести измерения, пользуясь алгоритмом ЗАДАНИЯ 1.2. Замечание: для измерения фазных токов амперметр переменного тока $\sim A2$ (блок 3) переключить на гнезда « I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} » блока 2, а нулевые точки генератора и нагрузки соединить проводом.

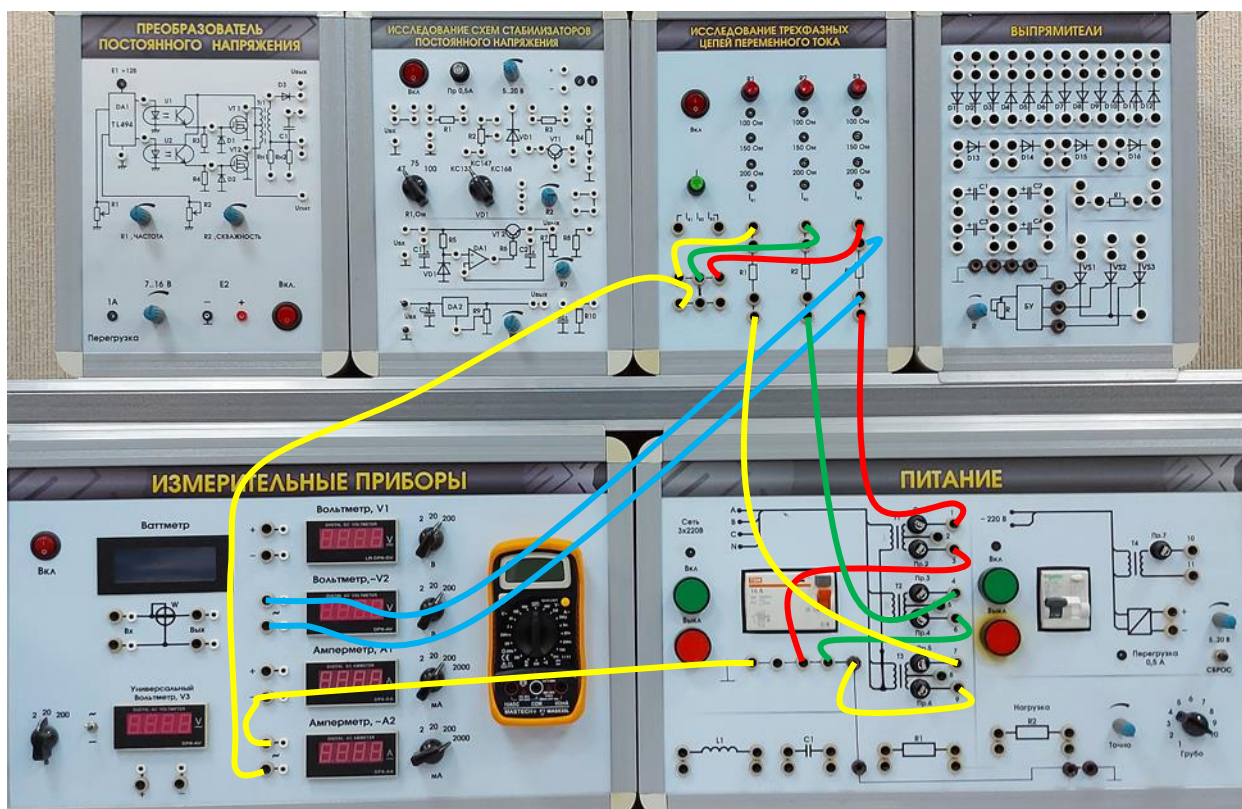


Рис. 8.4. Монтажная схема четырехпроводного соединения нагрузки «звездой»

3. Результаты измерений записать в таблицу 1.
4. Проанализировать результаты измерений для трехпроводной и четырехпроводной схем соединения нагрузки «звездой» и сделать выводы.

II. ПОДКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗКИ «ТРЕУГОЛЬНИКОМ».

Схема соединения трехфазной нагрузки «треугольником» показана на рисунке 8.5.

$U_{\text{фСА}}, U_{\text{фАВ}}, U_{\text{фВС}}$ – фазные напряжения или напряжения на каждой фазе (напряжения между началом и концом соответствующей фазы);

$I_{\text{фСА}}, I_{\text{фАВ}}, I_{\text{фВС}}$ – фазные токи – токи в фазах приемника;

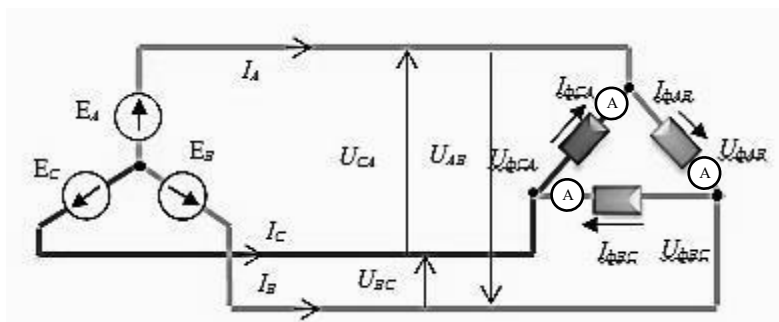


Рис. 8.5. Схема соединения нагрузки «треугольником»

U_{CA}, U_{AB}, U_{BC} – линейные или междуфазные напряжения (между двумя линейными проводами, напряжения между началами двух соседних фаз или совсем просто – между двумя фазами). Из схемы на рисунке 8.5 видно, что $U_{\phi} = U_{л}$, а сумма мгновенных значений токов $i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0$.

Важно! Особенности трёхфазной системы «Треугольник»:
 $I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$; $U_{л} = U_{\phi}$ – соотношения для токов и напряжений.
В системе нет нулевого провода.

Обычно трехпроводная система с соединением нагрузки «треугольником» применяется для потребителей с равномерной нагрузкой фаз, например, электродвигатель, обмотки статора которого при любом способе их соединения представляют собой равномерную нагрузку.

ЗАДАНИЕ 2.1

1. Выполнить соединения согласно монтажной схеме на рисунке 8.6.
2. Включить питание блоков.
3. Пользуясь алгоритмом измерения задания 2.1, измерить токи, протекающие через резисторы нагрузки.
4. Результаты измерений записать в таблицу 2, проанализировать и сделать выводы.

Таблица 2

	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
	200	200	200	150	150	150	100	100	100	100	150	200	100	100	∞
$U_{\phi AB}$															
$U_{\phi BC}$															
$U_{\phi CA}$															
U_{AB}															
U_{BC}															
U_{CA}															
$I_{\phi AB}$															
$I_{\phi BC}$															
$I_{\phi CA}$															

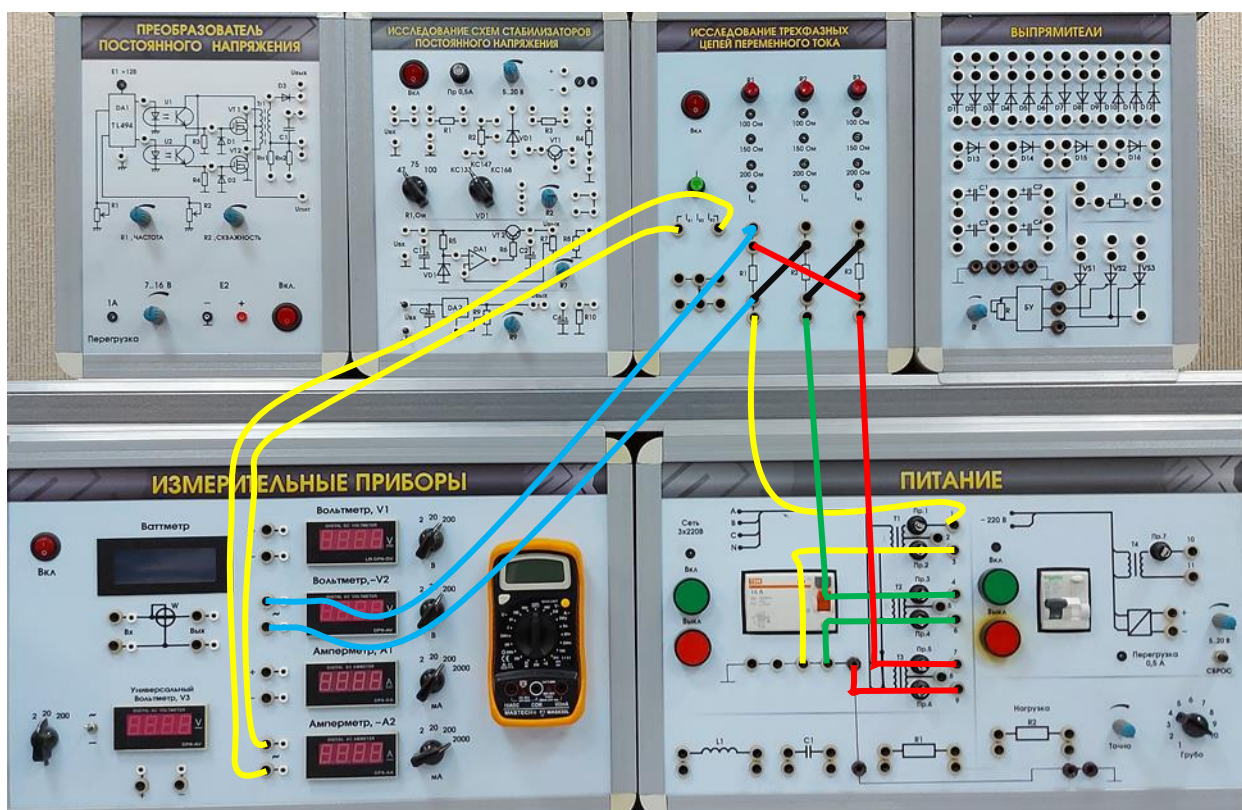


Рис. 8.6. Монтажная схема соединения нагрузки «треугольником»

III. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

ЗАДАНИЕ 3.1

- 1) При подключении нагрузки «звездой», пользуясь принципиальной схемой на рисунке 7.1 и монтажной схемой на рисунке 8.7, подключить ваттметр блока «Измерительные приборы» к фазе «А».
- 2) Изменяя номинал резистора нагрузки R1, как показано в таблице 3, для каждого значения R1 произвести измерения напряжений и токов. Результаты измерений занести в таблицу 3 и объяснить.

Таблица 3

	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
	∞	200	200	200	200	200	150	200	200	100	200	200
$U_{\Phi A}$												
$U_{\Phi B}$												
$U_{\Phi C}$												
U_{AB}												
U_{BC}												
U_{CA}												
$I_{\Phi A}$												
$I_{\Phi B}$												

$I_{\Phi C}$												
I_0												

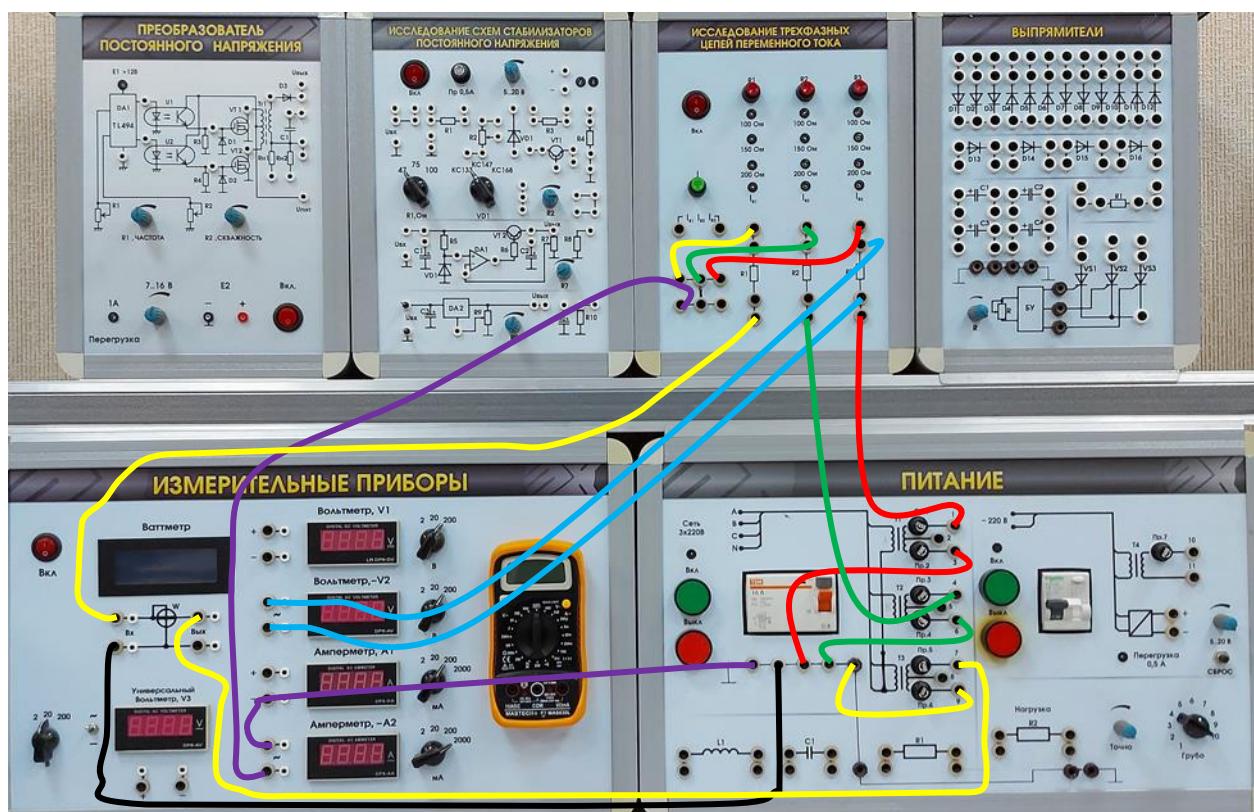


Рис. 8.7. Монтажная схема подключения ваттметра к фазе «А» четырехпроводного соединения нагрузки «звездой»