МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем



ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по теоретическим основам электротехники

Курск 2024

УДК 621.3 (076.1)

Составители: А. С. Романченко, И. А. Башмакова

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент *А. С. Чернышёв*

Исследование трёхфазной цепи при соединении потребителей треугольником : методические указания по выполнению лабораторной работы по теоретическим основам электротехники для студентов технических специальностей и направлений подготовки / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А. С. Романченко, И. А. Башмакова. - Курск, 2024. - 12 с.: ил. 6, табл. 1. - Библиогр.: с. 12.

Методические указания содержат сведения по экспериментальному исследованию трехфазной цени при соединении потребителей треугольником. Указывается порядок выполнения лабораторной работы, правила оформления отчета. Лабораторная работа относится к разделу «Трехфазные цепи» и охватывает материал по следующим темам: схемы соединения трехфазных источников и нагрузок, понятия фазных и линейных напряжений и токов, симметричная и несимметричная нагрузка, построение векторных диаграмм, измерение мощности трехфазной цепи.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теоретические основы электротехники».

Предназначены для студентов технических специальностей и направлений подготовки при проведении лабораторных занятий.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 21.03.2024. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. *0,7*. Уч.-изд.л. *0,6*. Тираж 50 экз. Заказ 179. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Исследование различных режимов работы трехфазных цепей при соединении потребителей треугольником.

1.2. Установление соотношений между линейными и фазными напряжениями и токами.

1.3. Измерение мощности трехфазной цепи методом двух ваттметров.

2. ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЯМ

2.1. Изучить по конспекту лекций и рекомендованному учебнику в разделе «Трехфазные цепи» следующие вопросы:

1) трехфазные цепи при соединении нагрузки треугольником;

2) линейные и фазные напряжения;

3) активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи, метод двух ваттметров для измерения активной мощности;

4) построение векторных диаграмм для трехфазной цепи.

2.2. Освоить методику выполнения лабораторной работы по настоящим методическим указаниям.

2.3. Заготовить отчёт со схемой экспериментальной установки, таблицами для экспериментальных и расчетных данных.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

При соединении источника питания треугольником (рисунок 3.1) конец *X* одной фазы соединяется с началом *B* второй фазы, конец *Y* второй фазы – с началом *C* третьей фазы, конец третьей фазы *Z* – с началом первой фазы *A*. Начала *A*, *B* и *C* фаз подключаются с помощью трех проводов к приемникам.

Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно для симметричной системы ЭДС, так как

$$\underline{E}_A+\underline{E}_B+\underline{E}_C = 0. \qquad (3.1)$$

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля, и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания и поэтому недопустим.

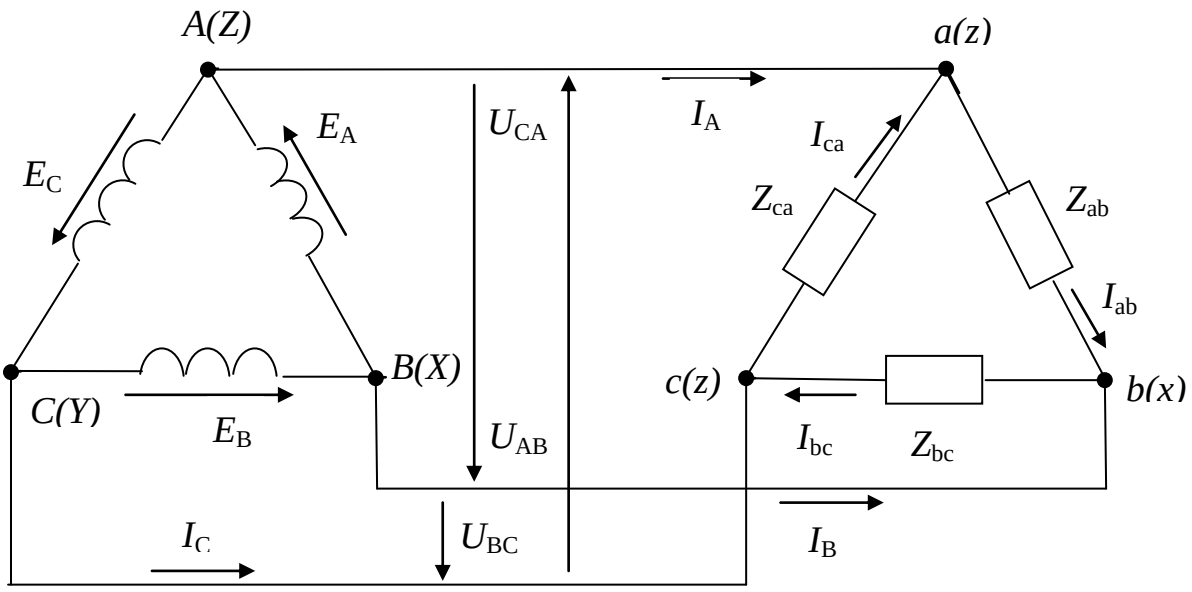


Рисунок 3.1 – Соединение фаз генератора и нагрузки треугольником

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это фактически напряжение между началами фаз, а значит, линейное напряжение. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению: $U_Л = U_Ф$. Если не учитывать сопротивление линейных проводов, то это напряжение будет равно не только соответствующему линейному напряжению на нагрузке, но и напряжению между линейными проводами, что и показано на рисунке 1. Тогда линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания:

$$U_{ab} = U_{AB},\ U_{bc} = U_{BC},\ U_{ca} = U_{CA}.$$

По фазам Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} приемника протекают фазные токи I_{ab}, I_{bc} и I_{ca}. Условное положительное направление фазных напряжений U_{ab}, U_{bc} и U_{ca} совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов I_A, I_B и I_C принято от источников питания к приемнику.

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником фазные токи не равны линейным. Токи в фазах приемника определяются по формулам:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab}/\underline{Z}_{ab},\quad \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc}/\underline{Z}_{bc},\quad \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{ca}/\underline{Z}_{ca}. \qquad (3.2)$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов *a*, *b* и *c*

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca},\quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab},\quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}\ . \qquad (3.3)$$

Сложив левые и правые части этих уравнений, получим

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

т.е. сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

При симметричной нагрузке

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = Z\exp(j\varphi), \qquad (3.4)$$

т.е. $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z$, $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$.

Так как линейные (они же фазные) напряжения симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему. С учетом (3.2) и (3.4) абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120°. Линейные токи образуют также симметричную систему токов, как показано на векторной диаграмме на рисунке 3.2, построенной для активной нагрузке фаз.

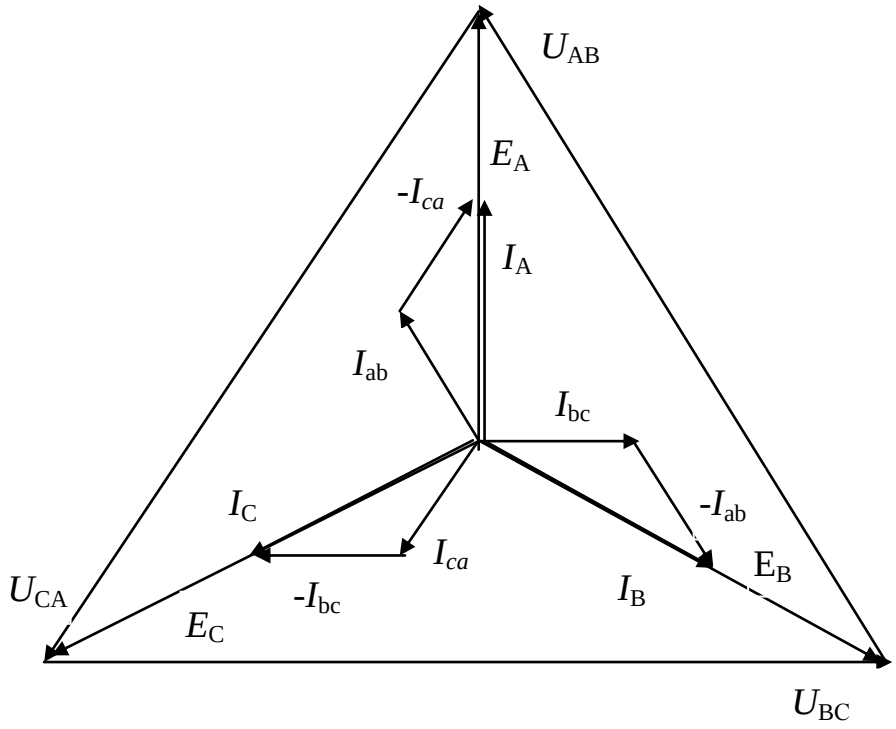


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма при симметричной нагрузке

Из данной векторной диаграммы следует, что любой линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток I_A отстает по фазе от фазного тока I_{ab} на угол 30°, на этот же угол отстает I_B от I_{bc} и I_C от I_{ca}.

Таким образом, при соединении треугольником действующее значение линейного тока при симметричной нагрузке в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного тока: $I_Л = \sqrt{3}\, I_Ф$ при равенстве $U_Л = U_Ф$.

При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи, соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы: фазное напряжение $U_Ф = U_Л$, фазный ток $I_Ф = U_Ф / Z_Ф$, линейный ток $I_Л = \sqrt{3}\, I_Ф$, угол сдвига по фазе $\varphi = \text{arctg}\,(X_Ф/R_Ф)$.

При несимметричной нагрузке в общем случае $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Обычно несимметричная нагрузка возникает при питании от трехфазной сети однофазных приемников. При этом симметрия фазных токов нарушается, поэтому линейные токи можно определить только расчетом по вышеприведенным уравнениям (3.3) или найти графическим путем из векторных диаграмм.

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что без учета сопротивления проводов при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой. Поэтому схема соединения треугольником используется для включения как симметричной, так и несимметричной нагрузки. При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} и соответствующие им сдвиги фаз φ_{ab}, φ_{bc}, φ_{ca}. Затем определяют линейные токи с помощью уравнений в комплексной форме или с помощью векторных диаграмм.

Рассмотрим режим обрыва фазы *bc* потребителя при активной нагрузке в фазах:. $R_{ab}=R_{ca}$, $R_{bc}=\infty$. Из схемы на рисунке 3.1 видно, что при токе $I_{bc}=0$, токи I_{ab} и I_{ca} остаются без изменения, поэтому прежнее значением имеет ток $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$., а токи I_B и I_C изменяются. Из (3.3) получается, что $\underline{I}_B = -\underline{I}_{ab}$ и $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca}$. Векторная диаграмма данного режима приведена на рисунке 3.3.

Рассмотрим режим при обрыве линейного провода *Aa*. В этом случае (см. рисунок 3.1) сопротивления в ветвях *ca* и *ab* соединены последовательно. На каждое из этих сопротивлений приходится половина линейного напряжения U_{bc}. На векторной диаграмме напряжений (рисунок 3.4) точка *a* находится на середине отрезка *bc*.

Напряжение между разомкнутыми концами фазы *A* равно: $U_{Aa}=U_{AB}\cos 30^o$. Напряжение на сопротивлениях ветвей *ca* и *ab* по сравнению с напряжением в симметричном режиме уменьшится в 2 раза. Во столько же раз уменьшатся токи в ветвях $\underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab}$. Токи $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$

находим по векторной диаграмме токов (рисунок 5), используя зависимости (3.3).

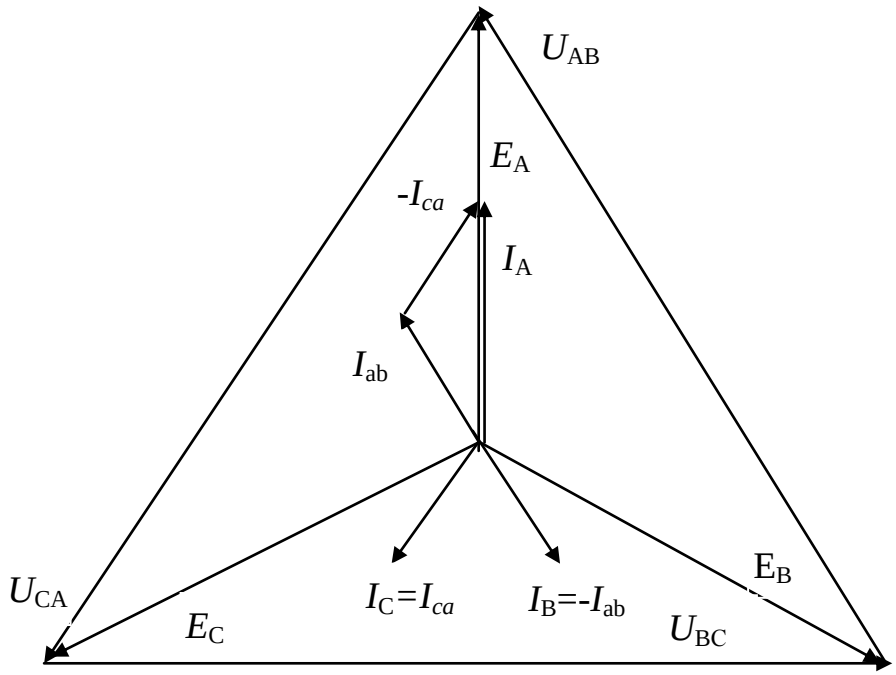


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма при обрыве фазы нагрузки *bc*

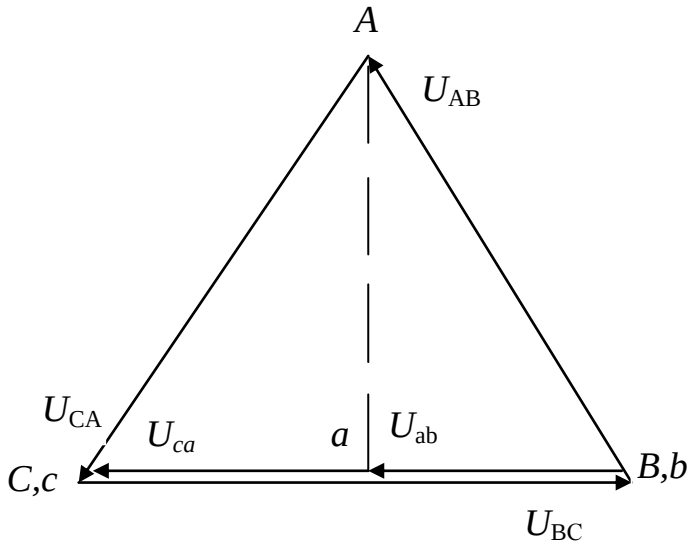


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма напряжений при обрыве линейного провода

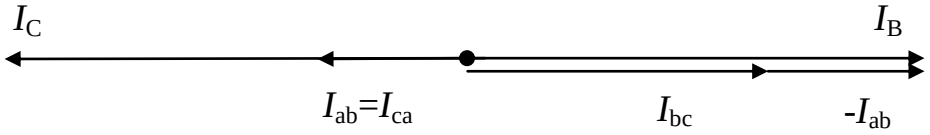


Рисунок 3.5 – Векторная диаграмма токов при обрыве линейного провода

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca},$$

где $P_{ab} = U_{ab}I_{ab}\cos\varphi_{ab}$, $P_{bc} = U_{bc}I_{bc}\cos\varphi_{bc}$, $P_{ca} = U_{ca}I_{ca}\cos\varphi_{ca}$.

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca},$$

где $Q_{ab} = U_{ab}I_{ab}\sin\varphi_{ab}$, $Q_{bc} = U_{bc}I_{bc}\sin\varphi_{bc}$, $Q_{ca} = U_{ca}I_{ca}\sin\varphi_{ca}$.

Полная мощность отдельных фаз равна:

$$S_{ab} = U_{ab}I_{ab}, \quad S_{bc} = U_{bc}I_{bc}, \quad S_{ca} = U_{ca}I_{ca}.$$

Полная мощность трехфазного приемника равна: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

При симметричной системе напряжений ($U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_Ф$) и симметричной нагрузке ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_Ф$; $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$) фазные мощности равны:

$$P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_Ф = U_Ф I_Ф \cos\varphi;$$
$$Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_Ф = U_Ф I_Ф \sin\varphi.$$

Тогда активная мощность симметричного трехфазного приемника равна:

$$P = 3P_Ф = 3U_Ф I_Ф \cos\varphi.$$

Аналогично выражается и реактивная мощность:

$$Q = 3Q_Ф = 3U_Ф I_Ф \sin\varphi.$$

Тогда полная мощность равна:

$$S = 3S_Ф = 3U_Ф I_Ф.$$

Так как в трехфазных цепях и для трехфазных электропотребителей за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобней выражать через линейные величины $U_Л$ и $I_Л$.

При соединении фаз симметричного приемника звездой $U_Ф = U_Л/\sqrt{3}$, $I_Ф = I_Л$, при соединении треугольником $U_Ф = U_Л$, $I_Ф = I_Л/\sqrt{3}$. Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой:

$$P = \sqrt{3}\, U_Л I_Л \cos\varphi,$$

где $U_Л$ и $I_Л$ – линейное напряжение и ток; $\cos\varphi$ – фазный (коэффициент мощности нагрузки в фазе).

Обычно индексы "л" и "ф" не указывают, и формула принимает вид: $P = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi$.

Соответственно реактивная мощность $Q = \sqrt{3}\,UI\sin\varphi$.

Тогда полная мощность $S = \sqrt{3}\,UI$.

При этом надо помнить, что угол φ является углом сдвига фаз между фазными напряжением и током и что при неизмененном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник, его мощность увеличивается в три раза: $P_\Delta = 3P_Y$.

В трехпроводных трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках и любом способе соединения приемников широко распространена схема измерения активной мощности приемника двумя ваттметрами. Показания двух ваттметров при определенной схеме их включения позволяют определить активную мощность трехфазного приемника, включенного в цепь с симметричным напряжением источника питания.

На рисунке 5.1 показана одна из возможных схем включения ваттметров: здесь токовые катушки включены в линейные провода с токами I_A и I_B, а катушки напряжения – соответственно на линейные напряжения U_{AC} и U_{BC}.

4. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Для выполнения лабораторной работы используется следующая аппаратура стенда: блок включения с выводами трехфазной сети *A*, *B*, *C*, 0; трехфазная нагрузка, измерительные приборы.

Трехфазная система напряжений блока включения включается общим выключателем «СЕТЬ», напряжения подаются непосредственно от трансформатора и не регулируются.

В качестве нагрузки используется блок ламповых реостатов. При первом включении вновь собранной цепи следует предварительно включить все лампы.

Измерительные приборы: шесть амперметров электромагнитной системы с предельным током 1 А, вольтметр электромагнитной системы, устанавливаемый на предельное напряжение 300 В, два ваттметра электродинамической системы с пределами измерения тока 1 А и напряжения 300 В.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Ознакомиться с используемыми приборами и аппаратурой, определить цену деления измерительных приборов.

5.2. Собрать электрическую схему (рисунок 5.1) и дать её проверить лаборанту или преподавателю. При этом все тумблеры схемы должны находиться в включенном состоянии (верхнее положение), а выключатель «СЕТЬ» в выключенном состоянии (горизонтальное расположение).

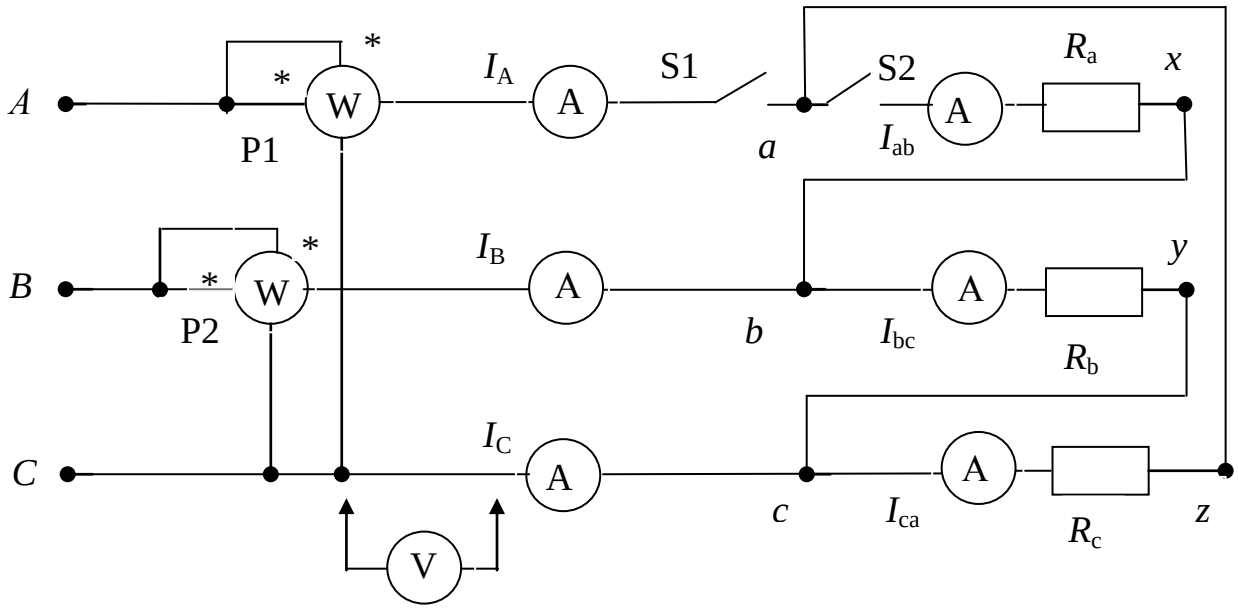


Рисунок 5.1 – Схема экспериментальной установки

5.3. Включить стенд (положение выключателя блока включения «Вкл.») и для симметричного режима работы (количество горящих ламп одинаково для всех трех фаз) записать показания ваттметров и амперметров в таблицу 5.1, замерить и записать в таблицу 5.1 линейные (они же фазные) напряжения на ламповом реостате.

5.4. Меняя количество горящих ламп в одной из фаз, установить несимметричный режим работы (фазные токи не равны). Результаты измерений напряжений, мощностей и токов внести в таблицу 5.1.

5.5. Восстановить симметричный режим работы и отключить все лампы тумблерами в фазе *ax*.

5.6. Восстановить симметричный режим работы и тумблером отключить линейный провод *Aa*. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

5.7. Выключить стенд и, не разбирая схемы, дать проверить результаты измерений преподавателю.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Выполнить вычисления сопротивлений и мощностей отдельных фаз и занести их в таблицу 1. Так как нагрузка фаз чисто активная, активную мощность для каждой фазы определяем как произведение соответствующих фазных напряжений и токов. При этом:

$$P_{\Sigma} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}\ , \quad P_{экс} = P_1 + P_2\ .$$

Таблица 5.1 – Данные исследования трехфазной цепи

Режим нагрузки	Симметричная нагрузка	Несимметричная нагрузка	Отключение нагрузки в фазе *ax*	Отключение линейного провода *Aa*
Измерено:				
I_A , А				
I_B , А				
I_C , А				
I_{ab} , А				
I_{bc} , А				
I_{ca} , А				
U_{ab} , В				
U_{bc} , В				
U_{ca} , В				
P_1 , Вт				
P_2 , Вт				
Вычислено:				
R_{ab} , Вт				
R_{bc} , Вт				
R_{ca} , Вт				
P_{ab} , Вт				
P_{bc} , Вт				
P_{ca} , Вт				
P_{Σ} , Вт				
$P_{экс}$, Вт				
$I_Л/I_Ф$				

6.2. Для симметричной и несимметричной нагрузки определить соотношение между линейным и фазным током $I_Л$ / $I_ф$ для фазы, в которой проводится изменение нагрузки.

6.3. Сравнить полученную экспериментально мощность трехфазной цепи с её расчетным значением и сделать вывод о пригодности метода двух ваттметров.

6.4. Для каждого опыта построить в масштабе совмещенные топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Какое соединение трехфазной системы называют соединение треугольником?

2 Какое соотношение между линейными и фазными значениями токов и напряжений при симметричной нагрузке в трехфазной цепи, соединенной треугольником?

3 Чему равны фазные токи при обрыве линейного провода в случае симметричной нагрузки?

4 Как по фазным токам определить линейные токи при несимметричной нагрузке?

5 Влияет ли изменение нагрузки в одной из фаз трехфазной цепи при соединении треугольником на величину фазных токов и напряжений других фаз?

6 Как влияет сопротивление линейных проводов на напряжения на нагрузке при её изменении?

7 В каких случаях используют соединение треугольником?

8 Каким образом можно измерить мощность трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузке фаз?

9 Объяснить вид построенных векторных диаграмм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с. – Текст непосредственный.

2 Попов, В. П. Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Попов. - 3-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2000. - 575 с. – Текст непосредственный.

3 Бакалов, В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. – М.: Радио и связь, 1989. – 525 с. – Текст непосредственный.

4 Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. – Текст непосредственный.