

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»

(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2017 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ
СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТРЕУГОЛЬНИКОМ**
методическое указание к выполнению лабораторной работы
теоретическим основам электротехники для студентов
направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника»

УДК 621.301

Составитель Л.В. Плесконос, А.С. Романченко.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *А.Л. Овчинников*

Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником: методическое указание к выполнению лабораторной работы теоретическим основам электротехники для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / Юго.-Зап. гос. ун-т; сост.: Л.В. Плесконос, А.С. Романченко, г.Курск, 2017, 16 с.: ил. 9, табл. 1, Библиогр.: с.16.

Излагаются методические указания и теоретический материал, необходимый для выполнения работы.

Предназначены для студентов направления подготовки
"Электроэнергетика и электротехника"

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать. ^{30.17}Формат 60x84 1/16

Усл.печ.л. ⁰⁸Уч.-изд.л. ⁰⁸Тираж 100 экз. Заказ. ⁴⁸Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 г. Курск ул. 50 лет Октября 94.

Цель работы.

- исследование различных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником.
- установление соотношений между линейными и фазными токами.
- исследование способов измерения активной мощности трехфазной цепи.

1. Основные теоретические положения.

Соединение фаз генератора и приемника треугольником.

При соединении источника питания треугольником (рис. 1.1) конец X одной фазы соединяется с началом В второй фазы, конец Y второй фазы – с началом С третьей фазы, конец третьей фазы Z – с началом первой фазы А. Начала А, В и С фаз подключаются с помощью трех проводов к приемникам.

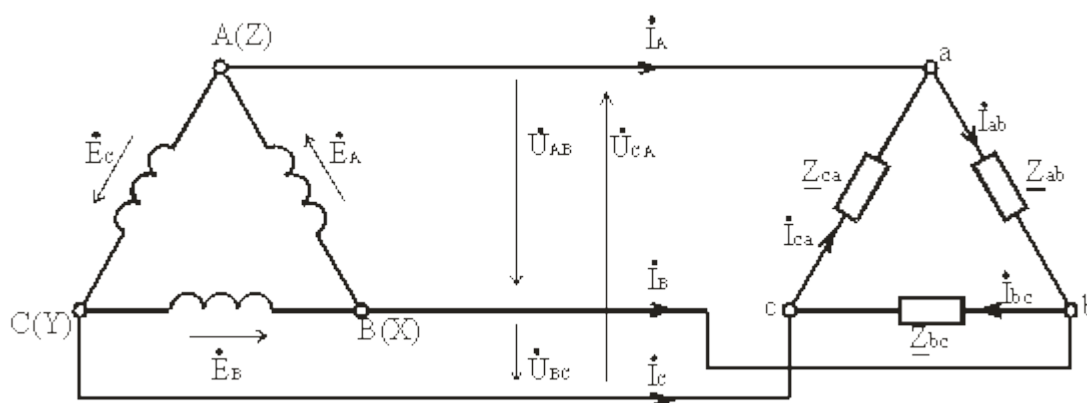


Рис. 1.1. Соединение фаз генератора и нагрузки треугольником.

Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (1)$$

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.

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником – это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.

$$U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}. \quad (2)$$

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, 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 \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} и \dot{I}_{ca} . Условное положительное направление фазных напряжений \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} и \dot{U}_{ca} совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{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

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}. \quad (3)$$

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

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (4)$$

Сложив левые и правые части системы уравнений, получим

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (5)$$

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

Симметричная нагрузка.

При симметричной нагрузке

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}e^{j\varphi} \quad (6)$$

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

Так как линейные (они же фазные) напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}e^{j\varphi}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}e^{j\varphi}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}e^{j\varphi}. \quad (7)$$

Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120° .

Линейные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}; \quad (8)$$

образуют также симметричную систему токов

На векторной диаграмме (рис. 1.2) фазные токи опережают фазные напряжения на угол φ (полагаем, что фазы приемника являются емкостными, т.е. φ меньше 0°). Здесь принято, что напряжение U_{AB} имеет нулевую фазу.

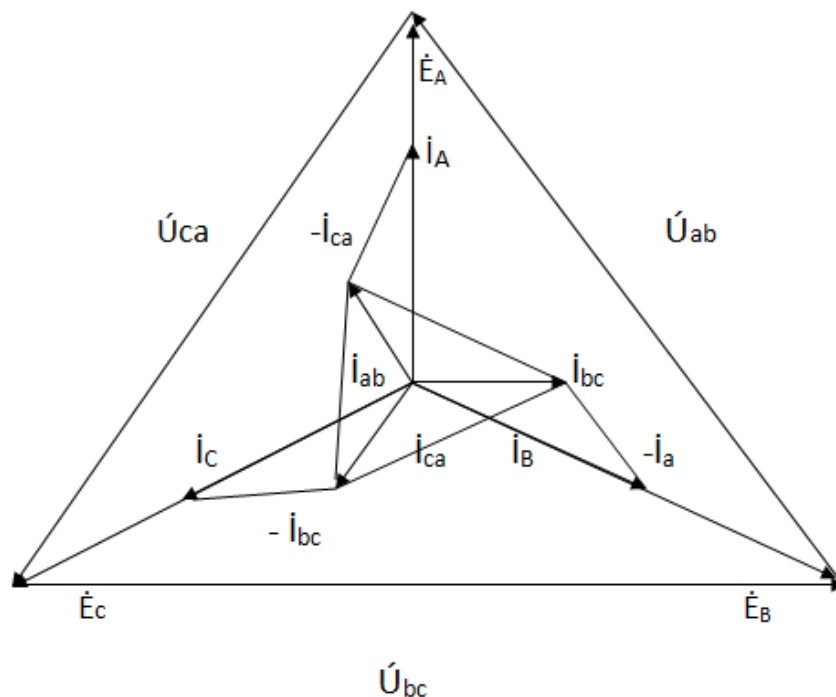


Рис.1.2. Векторная диаграмма при симметричной нагрузке.

Из диаграммы следует, что любой линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток \dot{I}_A отстает по фазе от фазного тока \dot{I}_{ab} на угол 30° , на этот же угол отстает \dot{I}_B от \dot{I}_{bc} , \dot{I}_C от \dot{I}_{ca} .

Таким образом, при соединении треугольником действующее значение линейного тока при симметричной нагрузке в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного тока и $U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}$; $I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\text{Ф}}$.

При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

Фазное напряжение $U_{\text{Ф}} = U_{\text{Л}}$. Фазный ток $I_{\text{Ф}} = U_{\text{Ф}} / Z_{\text{Ф}}$, линейный ток $I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\text{Ф}}$, угол сдвига по фазе $\varphi = \arctg (X_{\text{Ф}} / R_{\text{Ф}})$.

Несимметричная нагрузка приемника.

В общем случае при несимметричной нагрузке $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$. Обычно она возникает при питании от трехфазной сети однофазных приемников. Например, для нагрузки, (рис. 1.3), фазные токи, углы сдвига фаз и фазные мощности будут в общем случае различными.

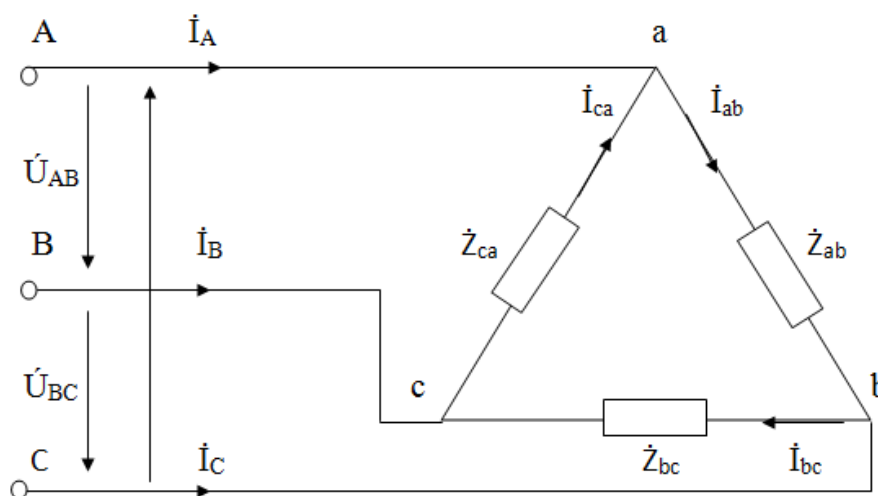


Рис.1.3. Несимметричная нагрузка приемника.

Векторная диаграмма для случая, когда в фазе ab имеется активная нагрузка, в фазе bc – активно-индуктивная, а в фазе са – активно-емкостная.

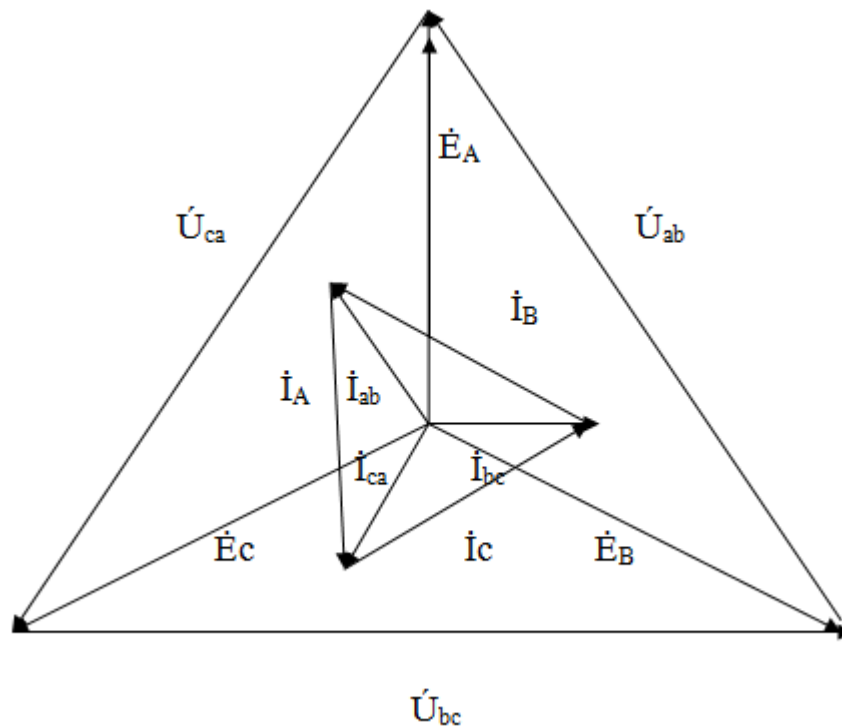


Рис.1.4. Векторная диаграмма при симметричной нагрузке.

Построение векторов линейных токов произведено в соответствии с выражением (8).

Таким образом, при несимметричной нагрузке симметрия фазных токов \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} нарушается, поэтому линейные токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C можно определить только расчетом по вышеприведенным уравнениям или найти графическим путем из векторных диаграмм.

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что 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 широко используется для включения несимметричной нагрузки. При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{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» (рис.1.5), при активной нагрузке в фазах.

Ключ 1 разомкнут. $R_{ab}=R_{ca}$, $R_{bc}=\infty$

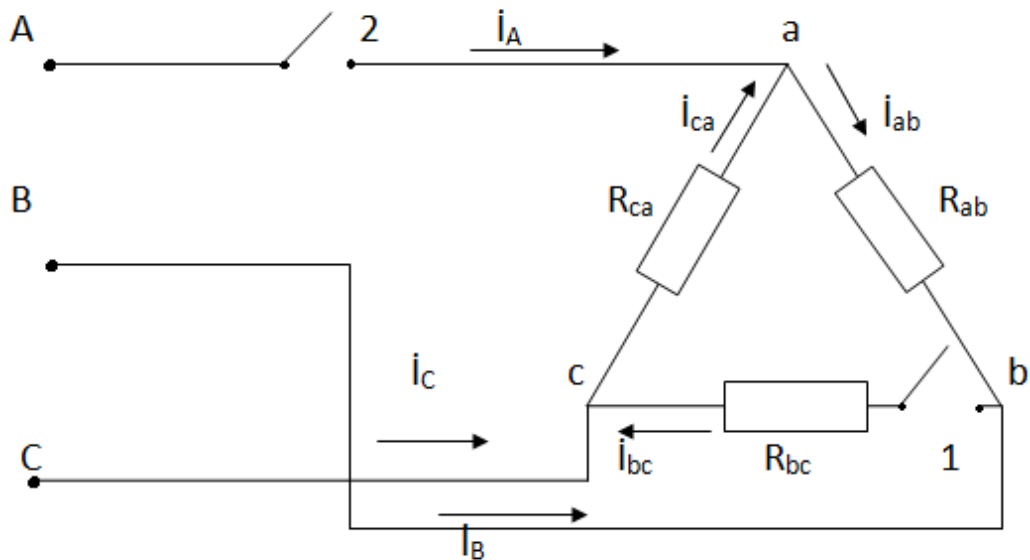


Рис.1.5.Схема трехфазной цепи при обрыве фазного и линейного провода.

При разомкнутом рубильнике 1 ток $I_{ba}=0$, токи I_{ab} и I_{ca} остаются без изменения, поэтому прежним значением имеет ток

$I_A = I_{ab} - I_{ca}$. Токи I_B и I_C изменяются.

Из (8) $I_B = -I_{ab}$ и $I_C = I_{ca}$. Векторная диаграмма приведена на (рис.1.6).

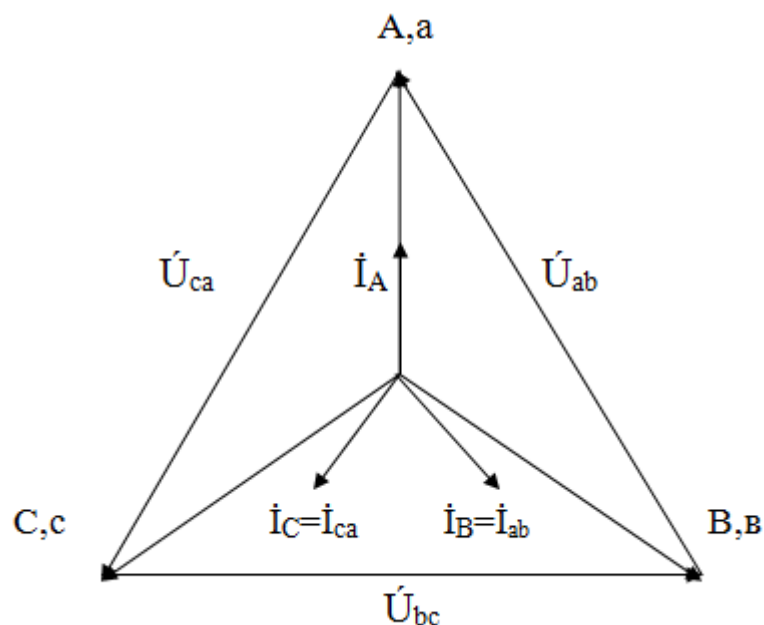


Рис.1.6. Векторная диаграмма при обрыве фазы нагрузки «bc»

Рассмотрим режим при обрыве линейного провода Аа, ключ 2 разомкнут (рис.1.5). При разомкнутом рубильнике 2 и замкнутом рубильнике 1 сопротивления в ветвях «са» и «ab» соединены последовательно. На каждое из этих сопротивлений приходится половина линейного напряжения U_{bc} . На векторной диаграмме (рис.1.7) точка «а» находится на середине отрезка «bc».

Напряжение между разомкнутыми концами фазы А. $\dot{U}_{Aa} = \dot{U}_{AB} \cos 30^\circ$.

Напряжение на сопротивлениях ветвей «са» и «ab» по сравнению с симметричным уменьшится в 2 раза.

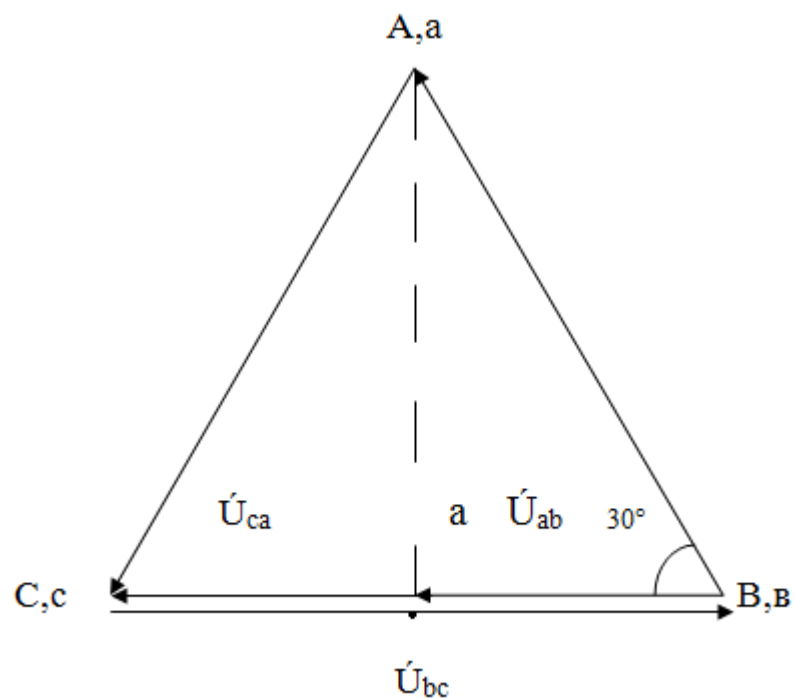


Рис.1.7. Векторная диаграмма напряжений при обрыве линейного провода.

Во столько же раз уменьшатся токи в ветвях $\dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab}$. Токи \dot{I}_B и \dot{I}_C находим по векторной диаграмме, используя зависимости (8).

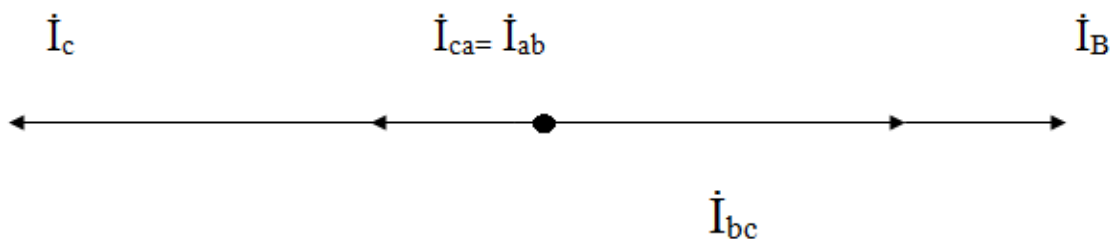


Рис.1.8. Векторная диаграмма токов при обрыве линейного провода.

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

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

где

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab}; P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc}; P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca};$$

$$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}; I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} - \text{фазные напряжения и токи;}$$

$$\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca} - \text{углы сдвига фаз между напряжением и током.}$$

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

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab}; S_{bc} = U_{bc} I_{bc}; S_{ca} = U_{ca} I_{ca}.$$

Полная мощность трехфазного приемника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

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

$$P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi;$$

$$Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

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

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3 Q_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3 S_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины U_L и I_L .

При соединении фаз симметричного приемника звездой $U_{\Phi} = U_L / \sqrt{3}$, $I_{\Phi} = I_L$, при соединении треугольником $U_{\Phi} = U_L$, $I_{\Phi} = I_L / \sqrt{3}$. Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi.$$

где U_L и I_L – линейное напряжение и ток; $\cos \varphi$ – фазный.

Обычно индексы "л" и "ф" не указывают и формула принимает вид

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi.$$

Соответственно реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi.$$

и полная мощность

$$S = \sqrt{3} U I.$$

При этом надо помнить, что угол φ является углом сдвига фаз между фазными напряжением и током, и, что при неизменном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник его мощность увеличивается в три раза:

$$P_{\Delta} = 3P_Y.$$

Измерение активной мощности двумя ваттметрами

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 (рис. 1.9) 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} .

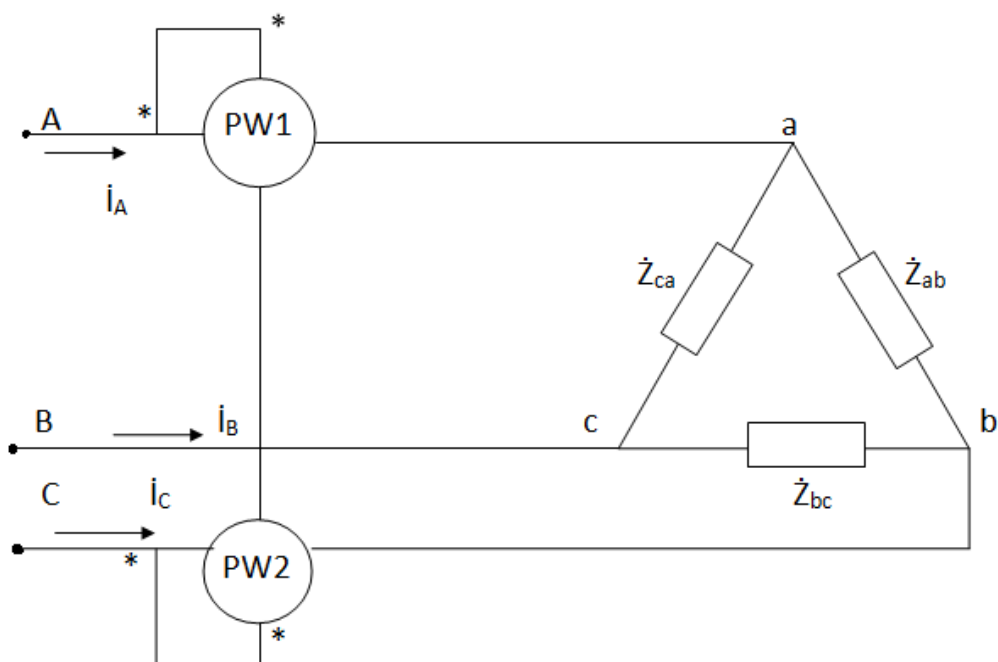


РИС. 1.9 Схема включения двух ваттметров.

Докажем, что сумма показаний ваттметров, включенных по схеме равна активной мощности P трехфазного приемника. Мгновенное значение общей мощности трехфазного приемника, соединенного звездой,

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Так как

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

то

$$i_C = -(i_A + i_B).$$

Подставляя значение i_C в выражение для p , получаем

$$p = u_A i_A + u_B i_B - u_C (i_A + i_B) = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B.$$

Выразив мгновенные значения u и i через их амплитуды, можно найти среднюю (активную) мощность

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

которая составит

$$P = U_{AC} I_A \cos(\varphi_{AC} - \varphi_{I_A}) + U_{BC} I_B \cos(\varphi_{BC} - \varphi_{I_B})$$

2. Порядок выполнения работы.

2.1. Ознакомиться с используемым оборудованием и приборами .

2.2. Собрать электрическую схему (рис. 2.1.) (нагрузкой Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} служат лампы накаливания) . Дать ее проверить лаборанту или преподавателю.

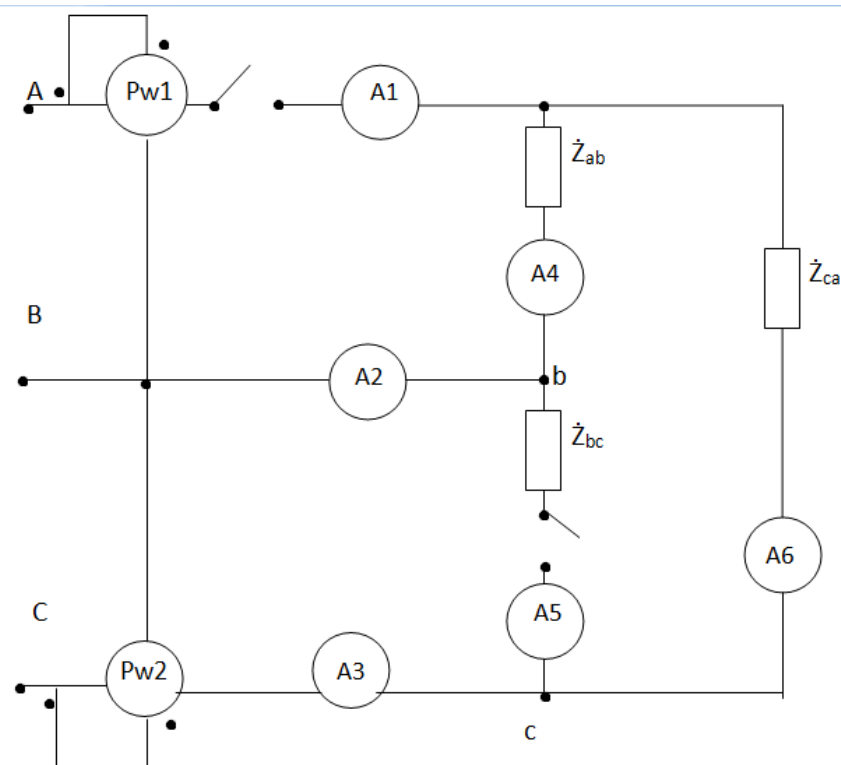


Рис.2.1. Схема исследования.

- 2.3. С помощью тумблеров лампового реостата подключить к каждой фазе количество ламп, заданное преподавателем (верхнее положение- включено), и включить стенд (положение выключателя блока включения «Вкл.»).
- 2.4. Для симметричного режима работы (количество горящих ламп одинаково для всех трех фаз) записать показания ваттметров и амперметров в табл. 3.1., замерить и записать в (табл. 3.1) фазные (между а и X ,b и Y ,с и Y на ламповом реостате) напряжения.
- 2.5. Меняя количество горящих ламп в одной из фаз, установить несимметричный режим работы (фазные токи не равны). Результаты измерений напряжений, мощностей и токов внести в (табл. 3.1).
- 2.6. Восстановить симметричный режим работы тумблером отключить фазный провод.
- 2.7. Восстановить симметричный режим работы тумблером отключить линейный провод. Результаты измерений занести в (табл. 3.1).
- 2.8. Выключить стенд и, не разбирая схемы, дать проверить результаты измерений преподавателю.
- 2.9. После утверждения результатов разобрать схему.

3. Обработка результатов измерения.

Для каждого опыта вычислить сопротивления фаз $R_{ab} = U_{ab}/I_{ab}$

$R_{bc} = U_{bc}/I_{bc}$ $R_{ca} = U_{ca}/I_{ca}$ мощность цепи по показаниям ваттметров
 $P_{\text{экс.}} = P_1 + P_2$, расчетную мощность $P_{\text{рас.}} = I_{ab}U_{ab} + I_{bc}U_{bc} + I_{ca}U_{ca}$ (лампа
 накаливания пример активной нагрузки, где $\cos \varphi = 1$)

Таблица 3.1.

Режим работы.	измерить											вычислить						
	IA	IB	IC	Ia	Ib	Ic	Uab	Ubc	Uca	P1	P2	Rab	Rbc	Rca	Pэ	Pp	Iл/ Iф	
	A	A	A	A	A	A	B	B	B	Вт	Вт	Ом	Ом	Ом	Вт	Вт		
Симметричная нагрузка.																		
Несимметричная нагрузка.																		
Нагрузка фазы выключена.																		
Линейный провод отсоединен																		

3.1. Для симметричной и несимметричной нагрузки определить соотношение между линейным и фазным током $I_{\text{л}}/I_{\text{ф}}$ для фазы, в которой проводится изменение нагрузки.

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

Контрольные вопросы и задания.

1. Какое соединение трехфазной системы называют соединением треугольником?
2. Какое соотношение между линейными и фазными значениями токов и напряжений при симметричной нагрузке?
3. Чему равны фазные токи при обрыве линейного провода в случае симметричной нагрузки?
4. Как по фазным токам определить линейные токи при несимметричной?
5. Влияет ли изменение нагрузки в одной из фаз трехфазной цепи при соединении треугольником на величину фазных токов и напряжений других фаз?
6. В каких случаях используют соединение треугольником?
7. Каким образом можно измерить мощность трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузке фаз?
8. Объяснить вид построенных векторных диаграмм?

Библиографический список.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи – М.: Высшая школа, 1994.-420с.
2. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1986. – 540 с .
3. Нейман Л.Р., Демирлян К.С. Теоретические основы электротехники. – М., Л.: Энергия, 1976.- 280 с.