



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Г.А. Клундук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ
РАБОТАМ**

Часть I

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ**

Красноярск 2016

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Департамент научно-технологической политики и образования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Г.А. Клундук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть I

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Электронное издание

Красноярск 2016

Клундук, Г.А. Теоретические основы электротехники: методическое пособие к лабораторным работам / Г.А. Клундук; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 37 с.

Настоящее методическое пособие предназначено для студентов изучающих курс «Теоретические основы электротехники» и имеет целью помочь им закрепить знания, полученные на лекционных занятиях и в результате самостоятельной работы. Оно включает краткое изложение отдельных теоретических разделов, связанных с выполнением конкретной лабораторной работы, вопросов для самоподготовки и заданий на выполнение лабораторных работ. Приводится краткий список литературы для самоподготовки.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06.

© Клундук Г.А., 2016
© ФГБОУ ВО «Красноярский
государственный аграрный
университет», 2016
© Центр дистанционного обучения, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1	15
ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ.....	15
Задания и методические указания к выполнению	15
лабораторной работы	15
1. <i>Задание по лабораторной работе</i>	15
2. <i>Методические указания по выполнению лабораторной работы</i>	15
Задание 1. Исследования при соединении потребителей электроэнергии звездой с нейтральным проводом.....	16
Задание 2. Исследования при соединении потребителей электроэнергии звездой без нейтрального провода.....	17
Задание 3. Расчет цепи при соединении потребителей электроэнергии звездой	19
<i>Пример расчета</i>	21
Контрольные вопросы.....	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2	26
ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ	26
2. Экспериментальная часть.....	26
Задания и методические указания к выполнению	27
лабораторной работы	27
1. <i>Задание по лабораторной работе</i>	27
2. <i>Методические указания по выполнению лабораторной работы</i>	27
Задание 1. Расчет цепи при симметричном соединении потребителей электроэнергии треугольником	28
Задание 2. Расчет цепи при несимметричном соединении потребителей электроэнергии треугольником	30
<i>Пример расчета</i>	33
Контрольные вопросы.....	36
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	37

Внимание!

Приборы и установки, используемые в лабораторных работах, подключены к сети 220/127 вольт.

Перед проведением лабораторной работы каждый студент обязан пройти инструктаж по технике безопасности.

Помните, что нарушение правил техники безопасности приводит к утрате здоровья и гибели людей.

Студенты, нарушившие правила техники безопасности удаляются из лаборатории

1 Основные теоретические положения

В современных условиях электрическая энергия вырабатывается преимущественно источниками энергии с трехфазной системой напряжений. Такие источники широко применяют в технике. Объясняется это тем, что трехфазная система переменного тока является наиболее экономичной. В качестве трехфазных источников напряжений на электрических станциях используют трехфазные синхронные генераторы, на статоре которых размещаются три фазные обмотки (фазы), смещенные в пространстве относительно друг друга на угол 120° . При вращении ротора, выполненного в виде электромагнита постоянного тока, в обмотках генератора будут индуцироваться переменные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга по фазе также на 120° ($2\pi/3$):

$$e_A = E_{Am} \sin t; \quad e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 2\pi / 3); \quad e_C = E_{Cm} \sin(\omega t + 2\pi / 3),$$

$$E_A = E_A \cdot e^{j0^\circ}; \quad E_B = E_B \cdot e^{-j120^\circ}; \quad E_C = E_C \cdot e^{-j240^\circ},$$

где E_{Am}, E_{Bm}, E_{Cm} – амплитудные значения ЭДС соответственно фаз A, B и C ,
 E_A, E_B, E_C – действующие значения ЭДС соответственно фаз A, B и C .

Таким образом, под трехфазной системой понимается совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС (напряжения) одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$, создаваемые общим источником электрической энергии.

Под действием трехфазной системы синусоидальных ЭДС на зажимах трехфазного потребителя создается трехфазная симметричная система напряжений, сдвинутых по фазе на угол 120° , т. е. на угол $\pi/3$, и имеющих одинаковые амплитудные и действующие значения (векторная диаграмма представлена на рис. 1.1) $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$.

В трехфазной системе потребители электроэнергии соединяются звездой или треугольником. Передача электрической энергии от источника к потребителю в трехфазной трехпроводной системе осуществляется с помощью линейных проводов.

В четырехпроводной трехфазной системе имеется четвертый - нейтральный (Nn) провод, соединяющий общие точки фаз источника N и потребителя n.

Соединение, при котором концы всех трех фаз потребителя объединяют в общую точку n, называемую нейтральной точкой, а начала фаз подсоединяют к трехфазному источнику питания посредством линейных проводов, называется соединением звездой трехфазного потребителя (рис. 1.2).

Токи I_A , I_B и I_C в соответствующих линейных проводах называются линейными.

Токи, протекающие по фазам, - фазными, а ток I_N в нейтральном проводе - нейтральным.

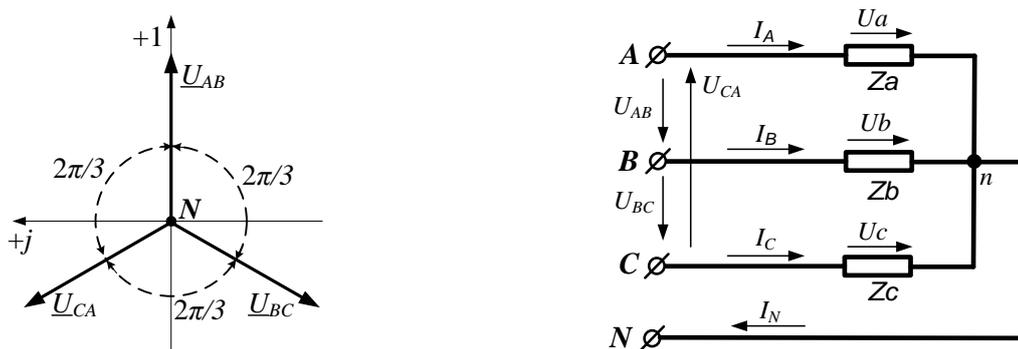


Рис. 1.2

При рассмотрении *трехфазной системы* исходим из предположения, что трехфазный источник является симметричным, фазные напряжения которого равны между собой и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $2\pi/3$.

Напряжения между линейными проводами потребителя U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} называются линейными, а между началом и концом фаз потребителя, включенного звездой, U_a , U_b и U_c - фазными.

Из схемы рис. 1.2 видно, что

При соединении потребителя звездой (рис. 1.2) по его фазам протекают те же токи I_A , I_B и I_C , что и по линейным проводам. Это означает, что при соединении потребителя звездой фазные токи оказываются равными соответствующим линейным токам:

$$I_A = I_{л.}$$

При этом по первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n можно записать

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N$$

При соединении потребителя звездой, независимо от величины и характера сопротивлений его фаз, а также от того, имеется или отсутствует нейтральный провод, между линейными и фазными напряжениями потребителя существуют следующие соотношения, полученные по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b;$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c;$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

В большинстве практических случаев трехфазные потребители представляют собой симметричную нагрузку, подключенную к симметричному трехфазному источнику питания.

Симметричной называется нагрузка, при которой комплексные сопротивления всех фаз потребителя равны между собой ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$). При этом

$$R_a = R_b = R_c;$$

$$X_a = X_b = X_c;$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CA}; \quad \dot{U}_a = \dot{U}_b = \dot{U}_c.$$

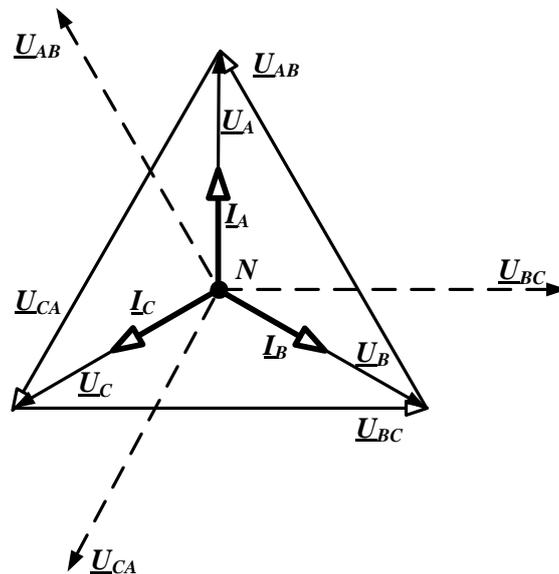


Рис. 1.3 – Симметричная нагрузка

Сопротивления линейных проводов, так же как и сопротивление нейтрального, обычно малы и ими можно пренебречь. При этом линейные напряжения генератора равны линейным напряжениям потребителя и соответственно фазные напряжения генератора равны фазным напряжениям потребителя. В этом случае векторная диаграмма напряжений потребителя будет совпадать с векторной диаграммой напряжений генератора. Исходя из полученных уравнений и построений, можно сделать вывод о том, что линейные напряжения потребителя, так же как и фазные, сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$ (рис. 1.3). На рис. 1.3 - 1.8. принято:

$$\underline{Z}_a = R_a, \quad \underline{Z}_b = R_b, \quad \underline{Z}_c = R.$$

При соединении потребителя электроэнергии звездой при симметричной нагрузке между фазными и линейными напряжениями (диаграмма рис. 1.3) существует соотношение:

$$U_{Л} = \sqrt{3} \cdot U_{\Phi}.$$

Фазные токи потребителя определяют по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a / \dot{Z}_a,$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_b / \dot{Z}_b,$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_c / \dot{Z}_c.$$

При этом напряжение между нейтральными токами $U_{nN} = 0$. Так как фазные напряжения и фазные сопротивления потребителя электроэнергии равны между собой, то фазные токи при симметричной нагрузке также равны между собой

$$I_A = I_B = I_C = I_{\Phi}$$

и сдвинуты относительно фазных напряжений на равные углы

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_{\Phi},$$

определяемые из выражений

$$tg \varphi_a = X_a / R_a = tg \varphi_b = X_b / R_b = tg \varphi_c = X_c / R_c.$$

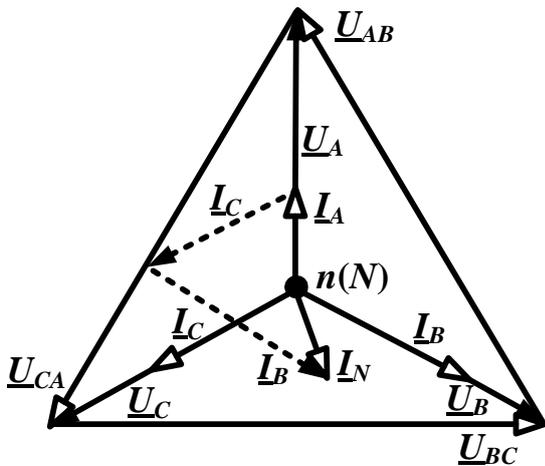


Рис. 1.4 - Несимметричная нагрузка с нейтральным проводом nN

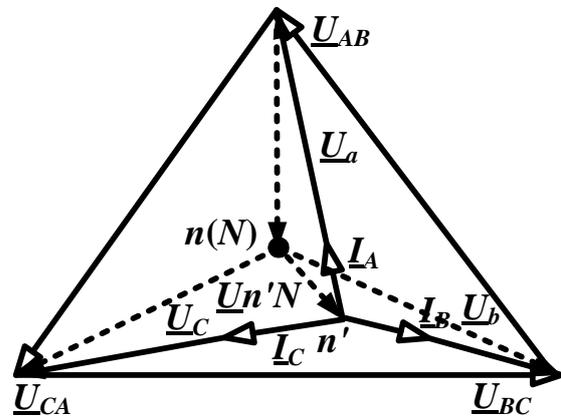


Рис. 1.5 - Несимметричная нагрузка без нейтрального провода nN

При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе, определяемый как векторная сумма фазных токов, оказывается равным нулю, поэтому при симметричной нагрузке этот провод становится не нужным и применять его нет смысла.

При несимметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз в общем случае не равны между собой, т. е. $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$.

Пренебрегая сопротивлениями линейных проводов, можно считать, что линейные напряжения потребителя независимо от характера нагрузки равны

соответствующим линейным напряжениям генератора, т. е. система линейных напряжений и при несимметричной нагрузке симметрична.

При включении нейтрального провода и несимметричной нагрузке (сопротивлением нейтрального провода пренебрегаем) потенциал нейтральной точки потребителя n равен потенциалу нейтральной точки N генератора. Следовательно, фазные напряжения потребителя равны соответствующим фазным напряжениям генератора, а напряжение между нейтральными точками $U_{nN} = 0$.

При наличии нейтрального провода и несимметричной нагрузке геометрическая сумма фазных токов трехфазной системы в соответствии с первым законом Кирхгофа для нейтральной точки равна току в нейтральном проводе

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

При этом векторная диаграмма для несимметричной нагрузки с нейтральным проводом имеет вид, представленный на рис. 1.4.

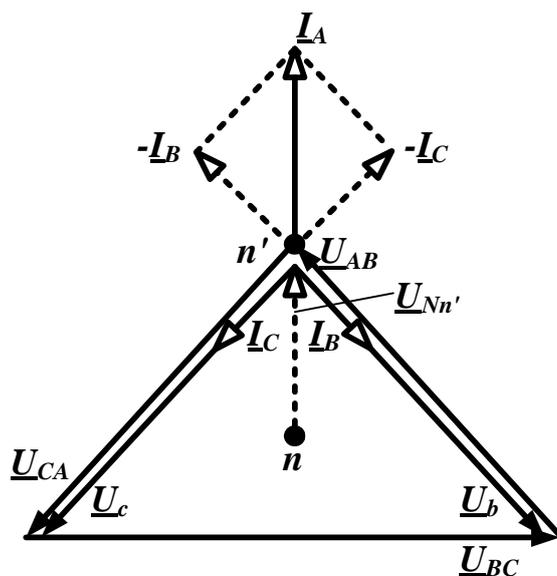


Рис. 1.6 - Короткое замыкание фазы Z_a при отсутствии нейтрального провода nN

При несимметричной нагрузке при отключении нейтрального провода потенциал нейтральной точки n потребителя электроэнергии не равен потенциалу нейтральной точки N генератора, так как эти точки не соединены между собой. При этом нейтральная точка n на векторной диаграмме потребителя сместится из своего первоначального положения в другое (n'), при котором геометрическая сумма фазных токов потребителя равна нулю:

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

В этом случае векторная диаграмма принимает вид, представленный на рис. 1.5, из которой следует, что при несимметричной нагрузке в трехфазной

системе без нейтрального провода фазные напряжения потребителя оказываются не равными друг другу. При этом на одних фазах может быть пониженное напряжение по сравнению с фазными напряжениями генератора, а на других - повышенное.

В этом случае между фазными токами, напряжениями и сопротивлениями существуют те же соотношения, обусловленные законом Ома, что и при симметричной нагрузке.

Короткое замыкание одной фазы потребителя электроэнергии, соединенного звездой без нейтрального провода, следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при котором напряжение на короткозамкнутой фазе потребителя становится равным нулю, а напряжение на двух других фазах увеличивается до значений, равных линейным напряжениям (рис. 1.6). Нейтральная точка n на векторной диаграмме смещается в этом случае в вершину треугольника линейных напряжений (n'), соответствующую короткозамкнутой фазе. При этом напряжение U_{Nn} , между нейтральными точками генератора и потребителя становится равным фазному напряжению питающего генератора.

Ток в короткозамкнутой фазе зависит от сопротивлений, включенных в двух других фазах потребителя. Геометрическая сумма векторов всех трех фазных токов в этом случае равна нулю.

Отключение нагрузки одной из фаз в трехфазной системе при соединении потребителя электроэнергии звездой без нейтрального провода можно также рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при которой сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. При этом если сопротивления двух других фаз оказываются равными, то нейтральная точка n на векторной диаграмме переместится в середину одной из сторон треугольника (n') линейных напряжений (рис. 1.7).

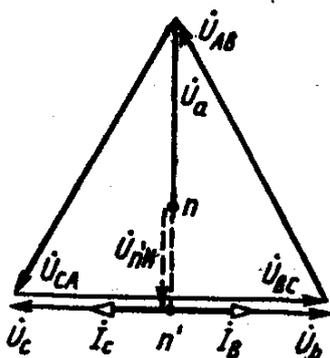


Рис. 1.7 - Отключение нагрузки фазы Z_a при отсутствии нейтрального провода nN

При обрыве линейного провода трехфазный потребитель находится под линейным напряжением, так как при этом ни одна из точек нагрузки не будет под потенциалом оборванного линейного провода. В этом случае векторная диаграмма трехфазного потребителя при соединении звездой и отсутствии нейтрального провода приобретает вид, представленный на рис. 1.8.

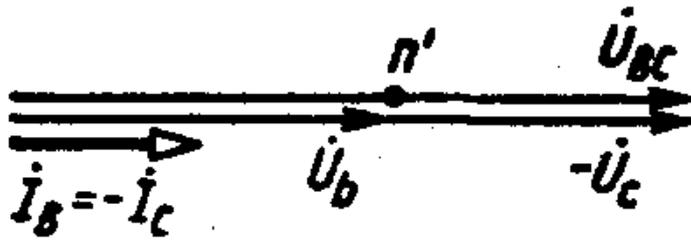


Рис. 1.8 - Обрыв линейного провода A при отсутствии нейтрального провода nN

Соединение трехфазного потребителя электрической энергии треугольником – это соединение, при котором:

- конец первой фазы x соединяется с началом второй b ,
- конец второй y - с началом третьей c ,
- конец третьей z - с началом первой a .

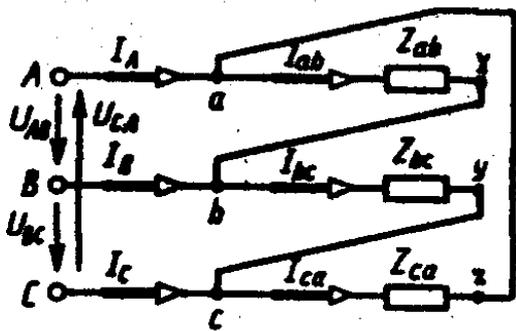


Рис. 1.9 - Соединение трехфазного потребителя электрической энергии треугольником

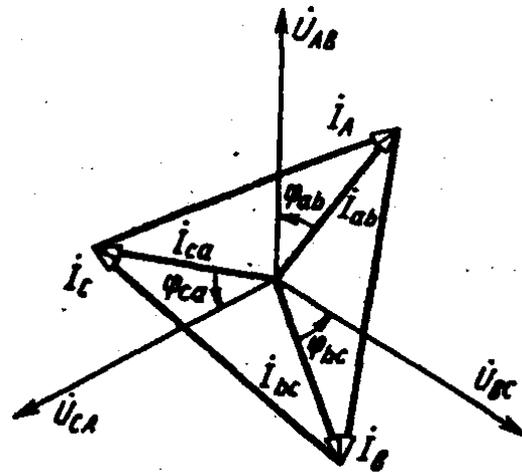


Рис.1.10 - Симметричная нагрузка

При этом начала всех фаз потребителя присоединяют к источнику электрической энергии с помощью линейных проводов. Из рис. 1.9 видно, что каждая фаза потребителя присоединяется соответственно к двум линейным проводам. Поэтому при соединении потребителя треугольником фазные напряжения оказываются равными соответствующим линейным напряжениям:

$$U_{\phi} = U_{\text{л}}$$

Фазные токи при соединении трехфазного потребителя треугольником не равны линейным, так как в начале каждой фазы потребителя имеется узел разветвления токов.

При этом независимо от сопротивлений потребителя между фазными и линейными токами существуют соотношения, полученные на основании первого закона Кирхгофа для узлов разветвления токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Пользуясь указанными соотношениями, по векторам фазных токов \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} можно построить векторы линейных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C .

Соотношения между фазными напряжениями, токами и сопротивлениями при соединении потребителя треугольником находят в соответствии с законом Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{AB} / \dot{Z}_{ab};$$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{BC} / \dot{Z}_{bc};$$

$$\dot{I}_{ca} = \dot{U}_{CA} / \dot{Z}_{ca}.$$

На рис. 1.10 - 1.13 принято:

$$Z_{ab} = R_{ab}, \quad Z_{bc} = R_{bc}, \quad Z_{ca} = R_{ca}$$

Углы сдвига по фазе между векторами фазных напряжений, \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} и соответствующих фазных токов \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} определяются фазными сопротивлениями потребителя:

$$\varphi_{ab} = \arctg \frac{X_{ab}}{R_{ab}};$$

$$\varphi_{bc} = \arctg \frac{X_{bc}}{R_{bc}};$$

$$\varphi_{ca} = \arctg \frac{X_{ca}}{R_{ca}}.$$

При симметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз одинаковы, т. е.

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}.$$

При этом как активные, так и реактивные сопротивления фаз потребителя равны:

$$R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}; \quad X_{ab} = X_{bc} = X_{ca},$$

причем *реактивные сопротивления* имеют одинаковый (*индуктивный* или *емкостный*) характер. В этом случае *фазные токи* и *соответствующие углы сдвига по фазе* между фазными напряжениями и фазными токами будут равны между собой:

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\phi}; \quad \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi_{\phi}.$$

Таким образом, при *соединении трехфазного потребителя электроэнергии треугольником при симметричной нагрузке* токи всех трех фаз

равны между собой и сдвинуты относительно соответствующих линейных напряжений на одинаковые углы. Из векторной диаграммы для симметричной нагрузки при соединении потребителя треугольником, представленной на рис. 1.10, видно, что линейные токи оказываются равными и сдвинутыми относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$. При этом между фазными и линейными токами существует соотношение:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$$

При несимметричной нагрузке фазные токи и углы сдвига по фазе между фазными токами и фазными напряжениями в общем случае не одинаковы. Так же как и при симметричной нагрузке, они могут быть определены по соответствующим формулам.

Линейные токи и в этом случае определяются через соответствующие фазные токи. Векторная диаграмма, построенная для случая несимметричной активной нагрузки трехфазного потребителя при соединении треугольником, представлена на рис. 1.11.

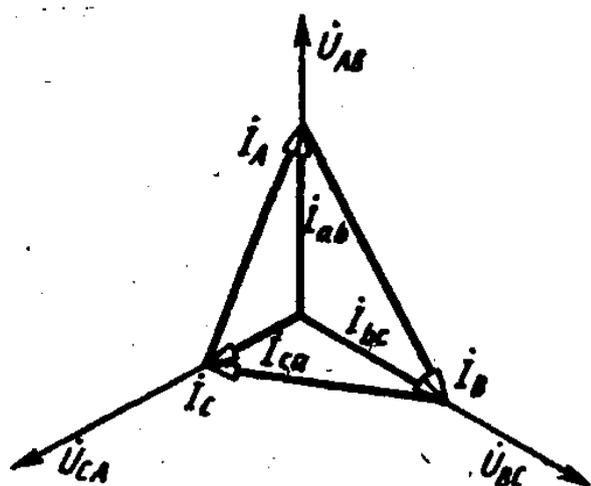


Рис. 1.11 - Несимметричная нагрузка соединения трехфазного потребителя электроэнергии треугольником

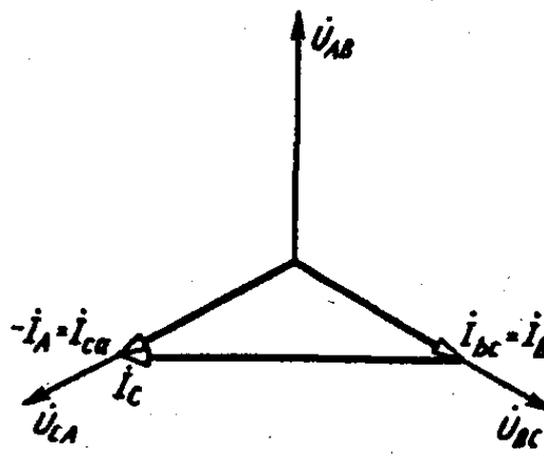


Рис. 1.12 - Отключение фазы Z_{ab}

Отключение нагрузки одной из фаз следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, когда сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. В этом случае векторная диаграмма приобретает вид, представленный на рис. 1.12 ($Z_{ab} = \infty$).

При обрыве линейного провода в цепи трехфазного потребителя электроэнергии, соединенного треугольником, следует рассматривать его как потребителя, подключенного к однофазному источнику (U_{AB}). Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая представлена на рис. 1.13.

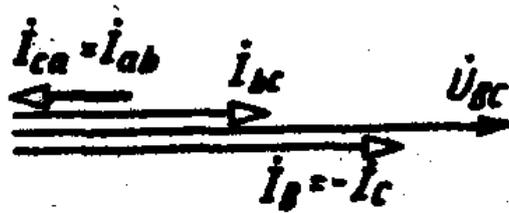


Рис. 1.13 - Обрыв линейной провода

Активную мощность трехфазного потребителя электроэнергии в общем случае можно определить как сумму активных мощностей всех его фаз:

при соединении звездой

$$P = P_A + P_B + P_C = U_a I_A \cos \varphi_a + U_b I_B \cos \varphi_b + U_c I_C \cos \varphi_c;$$

при соединении треугольником

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{AB} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{BC} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{CA} I_{ca} \cos \varphi_{ca}.$$

При симметричной нагрузке фазные напряжения, токи и углы сдвига фаз оказываются равными. Вследствие этого равны также и активные мощности всех трех фаз потребителя электроэнергии.

Активная мощность трехфазного потребителя независимо от схемы его соединения может быть найдена через линейные токи и напряжения:

$$P = 3P_\Phi = 3 \cdot U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi = \sqrt{3} \cdot U_L I_L \cos \varphi_\Phi,$$

или

$$P = \sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi,$$

Реактивная мощность трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L I_L \sin \varphi_\Phi,$$

или

$$Q = \sqrt{3} \cdot UI \sin \varphi,$$

Полная мощность трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_L I_L,$$

или

$$S = \sqrt{3} UI.$$

Лабораторная работа 1

Трехфазные электрические цепи при соединении потребителей электроэнергии звездой

Экспериментальная часть

Цель лабораторной работы - экспериментальное подтверждение соотношений между токами и напряжениями в трехфазных цепях, при соединении приемников «звездой». Ознакомление со схемами подключения потребителей электроэнергии звездой. Рассматриваются случаи симметричной и несимметричной нагрузки, обрывом нейтрального провода и обрывом одной из линий.

Задания и методические указания к выполнению лабораторной работы

Перед началом лабораторной работы убедитесь, что стенд выключен, т.е. напряжение на элементы стенда не подано. При этом все тумблеры, расположенные на панели стенда, находятся в нижнем положении. Тумблер «СЕТЬ» находится в положении «Выкл» (левое положение). Все коммутационные проводники удалены из гнезд стенда.

1. Задание по лабораторной работе

1. Исследовать трехпроводную трехфазную электрическую цепь при соединении потребителей электроэнергии звездой и установить соотношения между линейными и фазными токами $I_{л}$ и $I_{ф}$ и напряжениями $U_{л}$ и $U_{ф}$ при симметричном и несимметричном режимах работы.

2. Исследовать четырехпроводную трехфазную электрическую цепь при соединении потребителей звездой и установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при симметричном и несимметричном режимах работы.

3. Для исследуемых электрических цепей построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы.

4. Составить краткие выводы по лабораторной работе.

2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием, используемыми при выполнении лабораторной работы, записать их основные технические данные и определить цену деления измерительных приборов, ознакомиться со схемой включения измерительного стенда при измерениях токов и напряжений в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных электрических цепях.

2. Исследовать трехфазную электрическую цепь при соединении потребителей электрической энергии звездой (см. рис. 1.2).

3. Собрать трехпроводную трехфазную цепь (см. рис. 1.2) по монтажной схеме рис. 1.14, используя в качестве нагрузки каждой фазы ламповые реостаты.

4. Представьте собранную цепь на проверку преподавателю. Преподаватель выполняет следующие действия:

4.1. Проверяет соответствие между собранной цепью и схемой, рис.1.14.

4.2. Проверяет выбранный предел измерений измерительных приборов.

4.3. Переводит тумблер в положение «включено». После этого студенты самостоятельно проводят соответствующие исследования.

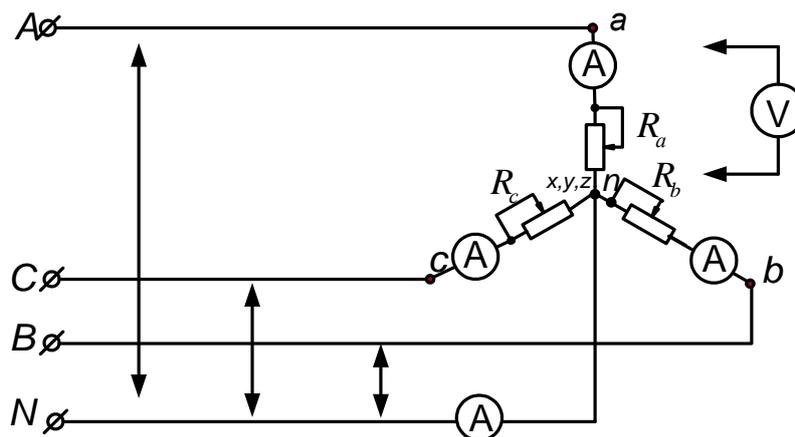


Рис. 1.14

Задание 1. Исследования при соединении потребителей электроэнергии звездой с нейтральным проводом

1. При равномерной нагрузке фаз и отсоединенном линейном проводе записать показания приборов в таблицу 1.1 и убедиться в том, что:

$$I_A = I_B = I_C; \quad U_A = U_B = U_C; \quad U_{AB} = U_{BC} = U_{CA};$$

$$U_{Л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}.$$

2. Вычислить фазные мощности P_A , P_B , P_C и ΣP . Результаты расчетов занести в таблицу 1.1.

3. Установите тумблер в положение «выключено». Включите нейтральный провод, и вновь включите тумблер. Измерьте напряжения и токи, в том числе ток нейтрального провода и убедитесь в том, что при равномерной нагрузке присоединение нейтрального провода не вносит никаких изменений в режим работы цепи. Результаты занесите в таблицу 1.1.

4. Установите тумблер в положение «выключено». Оставьте сопротивление двух фаз одинаковым изменяйте сопротивление третьей от ∞ до 0, записывая в таблицу показания приборов при различных значениях сопротивления фазы.

5. При неодинаковом сопротивлении двух фаз, изменяйте сопротивление третьей фазы (избегая случая, когда $Z_3 = 0$).

Выяснить влияние нейтрального провода на режим цепи.

Записать показания приборов в таблицу 1.1.

5. Для двух – трех опытов построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы.

Таблица 1.1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ С НЕЙТРАЛЬНЫМ ПРОВОДОМ

Характер нагрузки	Результаты наблюдений										
	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_N,$ А	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$U_{an},$ В	$U_{bn},$ В	$U_{cn},$ В	$U_{Nn},$ В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Симметричная с нейтральным проводом											
Несимметричная, при изменении R от ∞ до 0											
Результаты вычислений											
	$R_a,$ Ом	$R_b,$ Ом	$R_c,$ Ом	$P_a,$ Вт	$P_b,$ Вт	$P_c,$ Вт	$\Sigma P,$ Вт				
Симметричная без нейтрального провода											
Симметричная с нейтральным проводом											
Несимметричная, при изменении R от ∞ до 0											

Задание 2. Исследования при соединении потребителей электроэнергии звездой без нейтрального провода

6. Установите тумблер в положение «выключено». Отключите нейтральный провод. Установите тумблер в положение «включено» и проведите измерения в режимах цепи указанных в таблице 1.2.

1) Обрыв одной из фаз потребителя осуществляется путем отсоединения конца соответствующего лампового реостата от линейного провода.

2) Обрыв линейного провода проводить отключением штекерного соединения от источника питания.

3) Короткое замыкание фазы осуществляется шунтированием нагрузки одной из фаз A, B или C при включенных нагрузках двух других фаз.

Таблица 1.2

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ СОЕДИНЕНИИ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ БЕЗ НЕЙТРАЛЬНОГО
ПРОВОДА**

Характер нагрузки	Результаты наблюдений										
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{ca}, B	U_{an}, B	U_{bn}, B	U_{cn}, B	U_{nN}, B
Симметричная											
Несимметричная											
Обрыв фазы											
Обрыв линейного провода											
Короткое замыкание фазы											
Результаты вычислений											
	R_A, OM	R_B, OM	R_C, OM	P_A, BT	P_B, BT	P_C, BT	$\Sigma P, \text{BT}$				
Симметричная											
Несимметричная											
Обрыв фазы											
Обрыв линейного провода											
Короткое замыкание фазы											

7. Тумблеры переведите в нижнее положение. Выключите стенд.
8. Предъявите результаты на проверку преподавателю.
9. Разберите схему и приведите рабочее место в порядок.
10. Постройте векторные диаграммы для всех схем, т.е. для случаев:
 - симметричной нагрузки с нейтральным проводом;
 - симметричной нагрузки без нейтрального провода;
 - обрыв линии при симметричной нагрузке;
11. Оформите работу, сделайте соответствующие выводы.

Задание 3. Расчет цепи при соединении потребителей электроэнергии звездой.

Цель задания:

1. Научиться рассчитывать трехфазные цепи при соединении фаз приемника звездой и треугольником (нагрузка несимметричная)
2. Научиться строить векторно-топографические диаграммы.
3. Научиться вычислять потребляемую цепью мощность.

Для электрической схемы, представленной для каждого варианта, по заданным в таблице 1.3 параметрам и линейному напряжению определить:

- 1) фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе,
- 2) потребляемую приемником активную и реактивную мощность,
- 3) построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

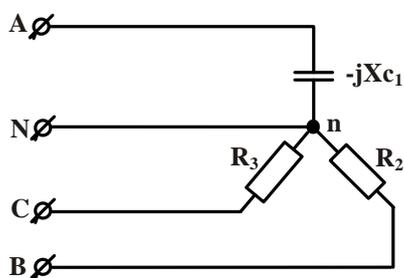


Рис. 1.15

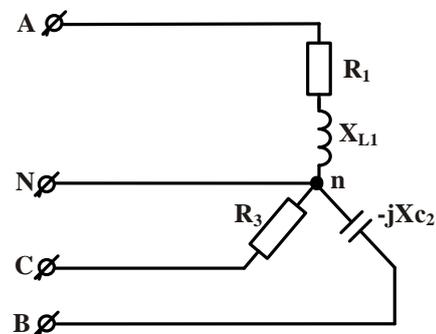


Рис. 1.18

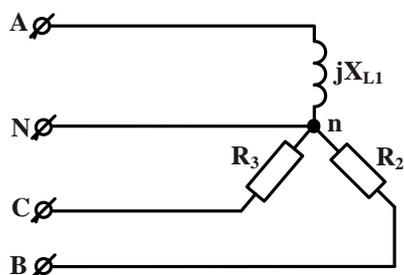


Рис. 1.16

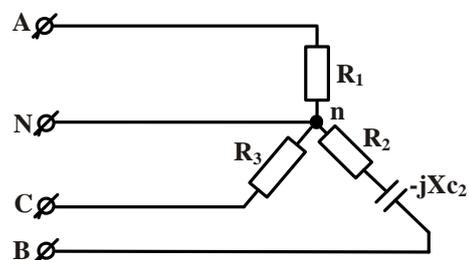


Рис. 1.19

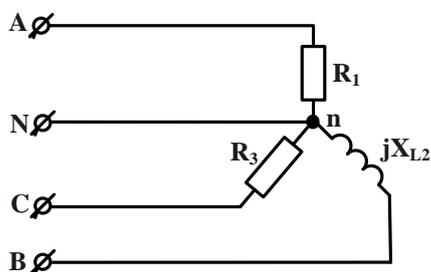


Рис. 1.17

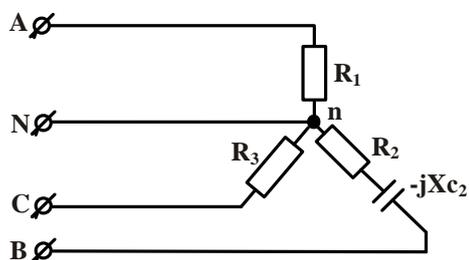


Рис. 1.20

Таблица 1.3 - Варианты контрольных заданий к заданию №3

Номер варианта	Номер рисунка	Величина									
		$U_{Л},$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
1	1.15	380	-	7	1	-	-	-	44	-	-
2	1.16	220	-	8	10	12.7	-	-	-	-	-
3	1.17	127	44	-	8	-	2	-	-	-	-
4	1.18	380	12.7	-	4	12.7	-	-	-	10	-
5	1.19	220	22	3	4	-	-	-	-	9	-
6	1.20	127	12.7	4	2	-	-	-	-	7,5	-
7	1.15	380	-	12	8	-	-	-	22	-	-
8	1.16	220	-	12	6	12.7	-	-	-	-	-
9	1.17	127	44	-	16	-	2	-	-	-	-
10	1.18	380	12.7	-	9	25.4	-	-	-	3	-
11	1.19	220	1	1	22	-	-	-	-	4	-
12	1.20	127	10	10	12.7					2	
13	1.15	380	-	8	22	-	-	-	44	-	-
14	1.16	220	-	4	12.7	12.7	-	-	-	-	-
15	1.17	127	4	-	22	-	5	-	-	-	-
16	1.18	380	2	-	12.7	12.7	-	-	-	3,5	-
17	1.19	220	8	8	44	-	-	-	-	8	-
18	1.20	127	6	6	12.7	-	-	-	-	7	-
19	1.15	380	-	16	22	-	-	-	44	-	-
20	1.16	220	-	9	12.7	12.7	-	-	-	-	-
21	1.17	127	7	-	1	-	4	-	-	-	-
22	1.18	380	8	-	10	12.7	-	-	-	10	-
23	1.19	220	6	6	8	-	-	-	-	8	-
24	1.20	127	5	5	4	-	-	-	-	4	-
25	1.15	380	-	3	4	-	-	-	44	-	-
26	1.16	220	-	4	2	25.4	-	-	-	-	-
27	1.17	127	12	-	8	-	8	-	-	-	-
28	1.18	380	12	-	6	12.7	-	-	-	6	
29	1.19	220	3	3	16	-	-	-	-	16	-
30	1.20	127	4	4	9	-	-	-	-	9	-

Пример расчета

К трехфазной линии с линейным напряжением $U_{л} = 380$ В подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Активное и реактивное сопротивления фазы приемника соответственно равны:

$$R_a = 22 \text{ Ом}, X_b = 22 \text{ Ом}, X_c = 44 \text{ Ом}.$$

Характер нагрузки:

фазы b – емкостной,

фазы c – индуктивный.

Определить:

- 1) ток в фазах приемника и линейных проводах,
- 2) потребляемую приемником активную и реактивную мощность,
- 3) построить векторную диаграмму для токов и напряжений.

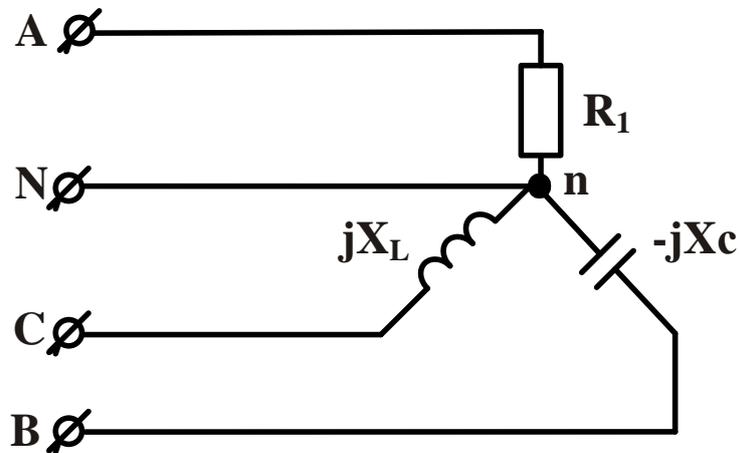


Рис. 1.21

Решение:

Сначала определим схему включения нагрузки. Согласно заданию она соответствует рис. 1.21. Нагрузка фазы a – активная, фазы b – емкостная, фазы c – индуктивная, т.е.

$$\underline{Z}_a = R_A = 22 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_b = -jX_b = -j22 = 22e^{-j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_c = jX_c = j44 = 44e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Теперь определим действующее значение фазного напряжения

$$U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

Фазу вектора напряжения фазы A обычно выбирают равной нулю. Поэтому фазные напряжения

$$\underline{U}_a = U_\phi e^{j0} = 220e^{j0} \text{ В},$$

$$\underline{U}_b = U_\phi e^{-j120^\circ} = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,5$$

$$\underline{U}_c = U_\phi e^{-j240^\circ} = U_\phi e^{j120^\circ} = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,5.$$

Токи фаз, в соответствии с законом Ома, находится, как:

$$\underline{I}_a = \frac{U_a e^{j0}}{\underline{Z}_a} = \frac{220e^{j0}}{22} = 10e^{j0} = 10 \text{ A},$$

$$\underline{I}_b = \frac{U_b e^{-j120^\circ}}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22e^{-j90^\circ}} = 10e^{-j30^\circ} = 8,66 - j5 \text{ A},$$

$$\underline{I}_c = \frac{U_c e^{j120^\circ}}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{44e^{90^\circ}} = 5e^{j30^\circ} = 4,33 + j2,5 \text{ A}.$$

Для трехфазной системы, нагрузка которой выполнена по схеме звезда, токи в линиях равны токам фаз нагрузки, т.е.:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = 10 \text{ A},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = 10e^{-j30^\circ} = 8,66 - j5 \text{ A},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = 5e^{j30^\circ} = 4,33 + j2,5 \text{ A}.$$

Ток нейтрального провода, в соответствии с первым законом Кирхгофа, находится как алгебраическая сумма токов

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 10 + 8,66 - j5 + 4,33 + j2,5 = 23 - j2,5 = \\ &= \sqrt{23^2 + 2,5^2} e^{j \arctg \frac{-2,5}{23}} = 23,13 e^{-j6,2} \text{ A}. \end{aligned}$$

Активная мощность, потребляемая всеми фазами нагрузки, находится как сумма активных мощностей фаз, т.е.

$$P = P_a + P_b + P_c.$$

Активная нагрузка находится только в фазе a . Фазы b и c содержат чисто реактивную нагрузку. Поэтому активная мощность, потребляемая всей нагрузкой, в данном случае, определяется только одной фазой

$$P = P_a = U_a I_a \cos \varphi_a = 220 \cdot 10 \cdot \cos 0 = 2200 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность трехфазной нагрузки находится как сумма реактивных мощностей

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c.$$

В фазе a находится чисто активная нагрузка, поэтому $Q_a = 0$. Реактивная мощность остальных фаз

$$Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b = 220 \cdot 10 \cdot \sin(-120^\circ + 30^\circ) = -2200 \text{ ВАр},$$

$$Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c = 220 \cdot 5 \cdot \sin(120^\circ - 30^\circ) = 1100 \text{ ВАр}.$$

Проверка решения:

Решение проверим с помощью уравнения энергетического баланса:

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \overset{*}{\underline{U}}_A \overset{*}{I}_A + \overset{*}{\underline{U}}_B \overset{*}{I}_B + \overset{*}{\underline{U}}_C \overset{*}{I}_C,$$

$$\underline{S}_{\text{потр}} = I_A^2 \underline{Z}_A + I_B^2 \underline{Z}_B + I_C^2 \underline{Z}_C.$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{\text{ист}} &= 220 \cdot 10 + 220e^{-j120} \cdot 10e^{j30^\circ} + 220e^{j120} \cdot 5e^{-j30^\circ} = \\ &= 2200 + 2200e^{-j90} + 1100e^{j90} = 2200 - j2200 + j1100 = 2200 - j1100,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{\text{потр}} &= 100 \cdot 22 + 100 \cdot 22e^{-j90} + 25 \cdot 44e^{j90} = \\ &= 2200 - j2200 + j1100 = 2200 - j1100.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{S}_{\text{ист}} &= \underline{S}_{\text{потр}}, \\ 2200 - j1100 &= 2200 - j1100.\end{aligned}$$

Таким образом, энергетический баланс исследуемой цепи сошелся и следовательно задача решена верно.

Построение векторно-топографической диаграммы:

1. Строят систему фазных напряжений на комплексной плоскости.
2. Откладывают в масштабе фазные токи под соответствующими углами к векторам фазных напряжений.

Ток I_a совпадает по фазе с напряжением U_a ;

I_b опережает напряжение U_b на угол 90° ;

I_c отстает по фазе от напряжения U_b на угол 90° .

Масштаб тока: $M_I = 0,2 \text{ А/мм}$.

Длина вектора тока равна:

$$I_a = I_a / M_{Ia} = 10 / 0,2 = 50 \text{ мм};$$

$$I_b = I_b / M_{Ib} = 10 / 0,2 = 50 \text{ мм};$$

$$I_c = I_c / M_{Ic} = 5 / 0,2 = 25 \text{ мм}.$$

Ток в нулевом проводе из векторной диаграммы равен:

$$I_{nN} = I_{nN} / M_{InN} = 23,13 / 0,2 = 115,65 \text{ мм}.$$

Масштаб напряжения: $M_U = 2 \text{ В/мм}$.

Длина вектора напряжения равна:

$$U_\phi = U_\phi / M_{U\phi} = 220 / 2 = 110 \text{ мм}.$$

3. Ток в нулевом проводе находят как векторную сумму фазных токов.

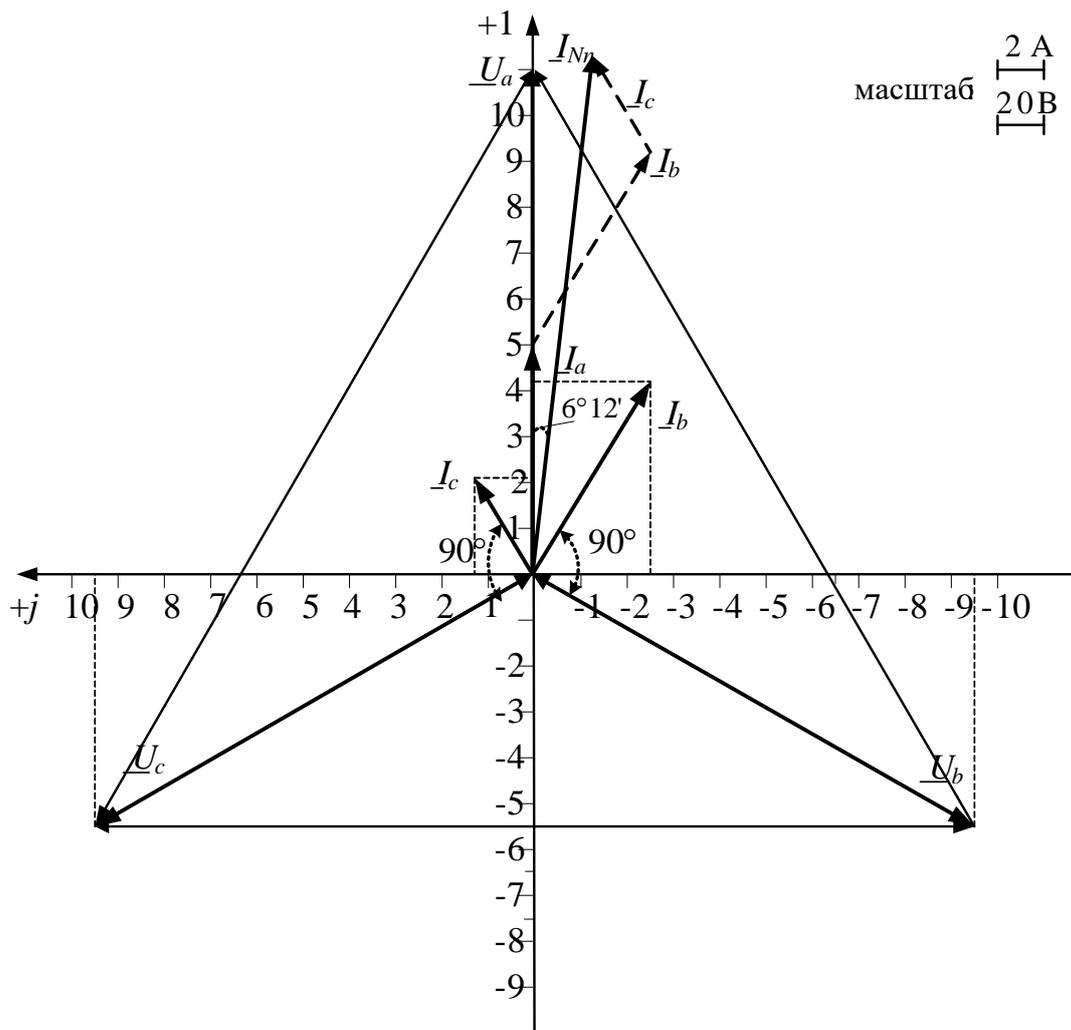


Рис. 1.22 Векторная диаграмма токов и напряжений

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества имеют трехфазные цепи перед шестипроводными.
2. К трехфазной цепи с нейтральным проводом подключена симметричная, активная нагрузка. Начертите векторную диаграмму для токов нагрузки.
3. Какое напряжение больше фазное или линейное.
4. К трехфазной цепи с нейтральным проводом подключена симметричная, емкостная нагрузка. Начертите векторную диаграмму для токов нагрузки.
5. К трехфазной цепи с нейтральным проводом к одной фазе подключена активная нагрузка, к двум другим реактивная, имеющая различный характер. Начертите векторную диаграмму для токов нагрузки и с ее помощью определите ток в нейтральном проводе.
6. Как измерить мощность в трехфазной сети с помощью одного ваттметра.
7. Как измерить мощность в трехфазной сети с помощью двух ваттметров.
8. Могут ли в трехфазной цепи возникать резонансные явления.
9. В каждую фазу трехфазной нагрузки включена лампа накаливания. В одной из линий произошел обрыв. Как изменится яркость свечения ламп.
10. В каждую фазу трехфазной нагрузки включена лампа накаливания. Одна лампа перегорела. Как изменится яркость свечения ламп. Рассмотрите случай включения нагрузки с нейтральным проводом и без нейтрального провода.
11. Как изменится режим работы цепи, если полюсы одного источника поменять местами?
12. Напишите формулу для вычисления напряжения между нейтральными точками генератора и нагрузки.
13. Напишите формулу для вычисления напряжения на любой фазе нагрузки с учетом сопротивления линий.
14. В разные фазы нагрузки включены одна, две и три лампы накаливания. В какой фазе лампа горит ярче. В какой фазе потребляемая мощность больше?

Лабораторная работа 2

Трехфазные электрические цепи при соединении потребителей электроэнергией треугольником

1. Краткие теоретические сведения

Включение источников по схеме звезда позволило сократить количество проводов. Есть еще один способ включения, который позволяет сократить количество проводов. Это включение по схеме треугольник, рис. 2.1. Возможность включения фаз генератора по схеме треугольник пояснить довольно просто. Сумма векторов одинаковой длины, сдвинутых по фазе на 120° равна нулю. Это значит, что при включении ЭДС генератора по схеме треугольник дополнительных токов в контуре образованном источниками не возникает. Источники работают точно также как при шестипроводной системе.

Для цепи, выполненной по схеме «треугольник» справедливы следующие равенства для токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc},$$

а для напряжений

$$U_\phi = U_{\text{л}}.$$

Вообще говоря, трехфазный генератор и трехфазная нагрузка могут быть включены по разным схемам.

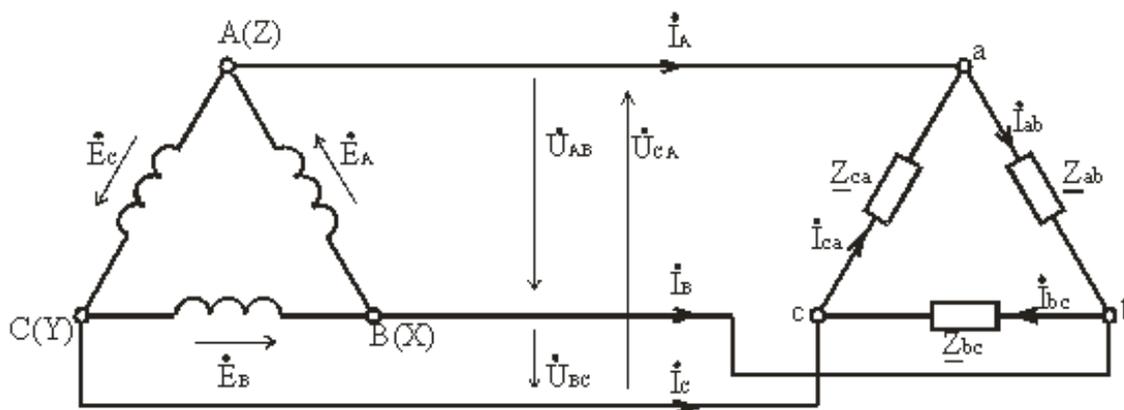


Рис. 2.1. Схема соединения обмоток генератора и потребителей треугольником.

2. Экспериментальная часть

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде.

Цель лабораторной работы - экспериментальное подтверждение соотношений между токами и напряжениями в трехфазных цепях, при соединении приемников «треугольником». Ознакомление со схемами подключения потребителей электроэнергии треугольником. Рассматриваются случаи симметричной и несимметричной нагрузки, обрывом одной фазы и обрывом одной из линий.

Задания и методические указания к выполнению лабораторной работы

Перед началом лабораторной работы убедитесь, что стенд выключен, т.е. напряжение на элементы стенда не подано. При этом все тумблеры, расположенные на панели стенда, находятся в нижнем положении. Тумблер «СЕТЬ» находится в положении «Выкл» (левое положение). Все коммутационные проводники удалены из гнезд стенда.

1. Задание по лабораторной работе

1) Исследовать соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при соединении фаз потребителя треугольником для случаев симметричной и несимметричной нагрузки и рассчитать активную мощность трехфазной цепи.

2) Для исследуемых электрических цепей построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы.

3) Составить краткие выводы по лабораторной работе.

2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

1) Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием, используемыми при выполнении лабораторной работы, записать их основные технические данные и определить цену деления измерительных приборов, ознакомиться со схемой включения измерительного стенда при измерениях токов и напряжений в трехфазных электрических цепях.

2) Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой изображенной рис. 2.2, используя в качестве нагрузки каждой фазы ламповые реостаты.

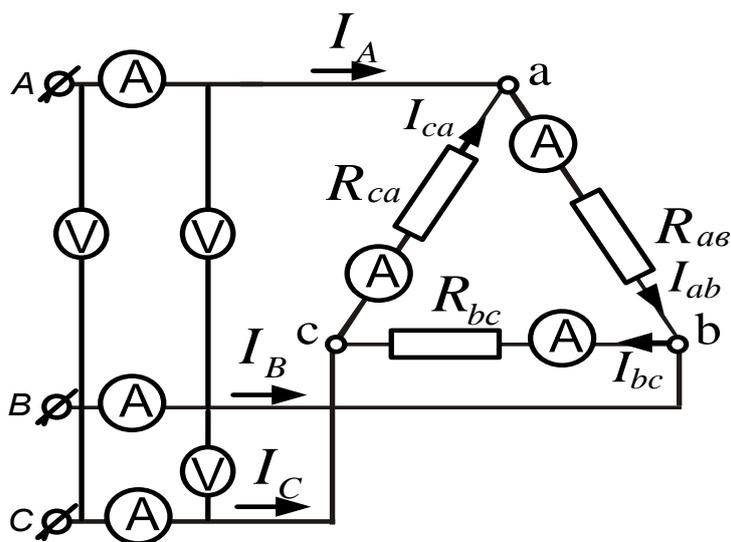


Рис. 2.2. Принципиальная схема включения нагрузки «треугольником»

3) Представьте собранную цепь на проверку преподавателю. Преподаватель выполняет следующие действия:

3.1. Проверяет соответствие между собранной цепью и схемой, рис.2.2.

3.2. Проверяет выбранный предел измерений измерительных приборов.

3.3. Переводит тумблер в положение «включено». После этого студенты самостоятельно проводят соответствующие исследования.

Задание 1. Расчет цепи при симметричном соединении потребителей электроэнергии треугольником

1. Измерить линейные и фазные токи и напряжения при соединении фаз потребителя треугольником для случаев симметричной нагрузки, запишите показания приборов в таблицу 2.1. и убедиться в том, что:

1) фазные токи равны друг другу и

2) линейные токи равны друг другу.

Вычислить фазные мощности P_{AB} , P_{BC} , P_{CA} , и полную мощность.

Результаты расчетов записать табл. 2.1.

2. При одинаковом сопротивлении двух фаз изменять сопротивление третьей фазы и записать показания приборов в таблицу 2.1.

Убедиться, что изменение сопротивления третьей фазы не оказывает влияние на фазные напряжения.

3. Установив равномерную нагрузку перевести тумблер в положение «выключено» и отсоединить провод фазы C от источника питания, перевести тумблер в положение «включено» и провести измерения. Результаты расчетов записать табл. 2.1.

Исследовать в этом случае влияние изменения сопротивления фазы BC на режим работы цепи.

4. Перевести тумблер в положение «выключено», восстановить питание фазы, отсоединить один из линейных проводов, затем перевести тумблер в положение «включено», провести измерения..

Результаты измерений и расчетов записать в табл. 2.1 и показать преподавателю.

5. По результатам проведенных измерений для обоих случаев построить векторные диаграммы напряжений и токов.

Таблица 2.1

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ
ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
ТРЕУГОЛЬНИКОМ**

Характер нагрузки	Результаты наблюдений								
	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А
Симметричная									
Несимметричная									
Обрыв фазы									
Обрыв линейного провода									
Результаты вычислений									
	$R_{ab},$ Ом	$R_{bc},$ Ом	$R_{ca},$ Ом	$\frac{I_L}{I_\phi}$	$P_{ab},$ Вт	$P_{bc},$ Вт	$P_{ca},$ Вт	$\Sigma P,$ Вт	
Симметричная									
Несимметричная									
Обрыв фазы									
Обрыв линейного провода									

Построение векторной диаграммы при соединении фаз потребителя треугольником следует начинать с построения векторов фазных (линейных) напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , которые сдвинуты относительно друг друга на угол $2/3\pi$ (рис.2.3)

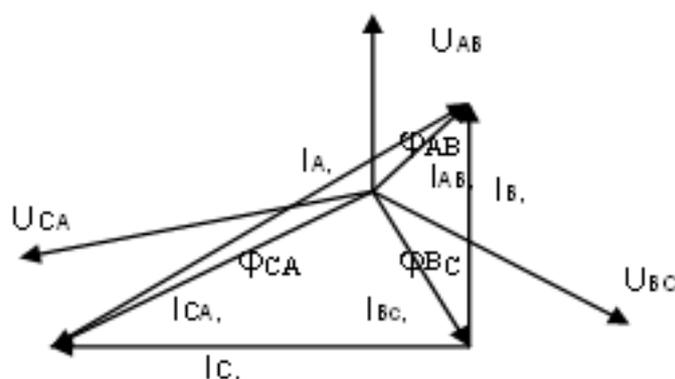


Рис. 2.3.

Векторы фазных токов I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} откладываются из начал векторов фазных напряжений под соответствующими углами $\varphi_{AB}, \varphi_{BC}, \varphi_{CA}$ к последним. Для определения углов сдвига фаз следует воспользоваться значениями фазных напряжений, токов и мощностей. При симметричной нагрузке угол

сдвига фаз между фазными напряжениями и токами можно найти из соотношения

$$\varphi = \arccos \frac{P_{\Phi}}{U_{\Phi} \cdot I_{\Phi}}$$

где P_{Φ} , U_{Φ} , I_{Φ} – соответственно активная мощность, напряжение и ток потребителя.

Если нагрузка активная, то

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 0$$

Соединив концы векторов фазных токов, получим векторы линейных токов I_A , I_B , I_C . Положение и направление последних на векторной диаграмме определяется соотношением:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}, \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}, \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

7. Тумблеры переведите в нижнее положение. Выключите стенд.
8. Предъявите результаты на проверку преподавателю.
9. Разберите схему и приведите рабочее место в порядок.
10. Постройте векторные диаграммы для всех схем, т.е. для случаев:
 - симметричной нагрузки с нейтральным проводом;
 - симметричной нагрузки без нейтрального провода;
 - обрыв линии при симметричной нагрузке;
11. Оформите работу, сделайте соответствующие выводы.

Задание 2. Расчет цепи при несимметричном соединении потребителей электроэнергии треугольником

Цель задания:

1. Научиться рассчитывать трехфазные цепи при соединении фаз приемника треугольником (нагрузка несимметричная и симметричная).
2. Научиться строить векторные диаграммы.

Для электрической схемы, представленной для каждого варианта, по заданным в таблице 2.2 параметрам определить токи. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

Схемы к заданию №2.

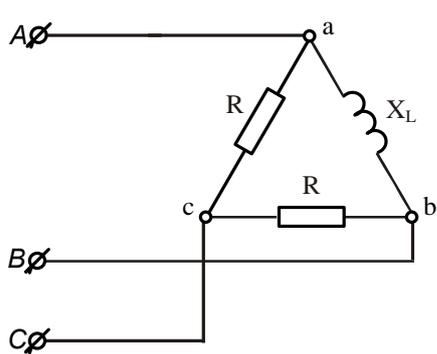


Рис. 2.4

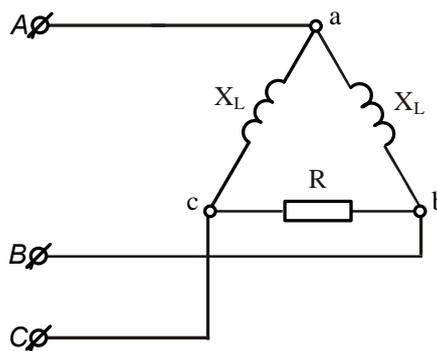


Рис. 2.5

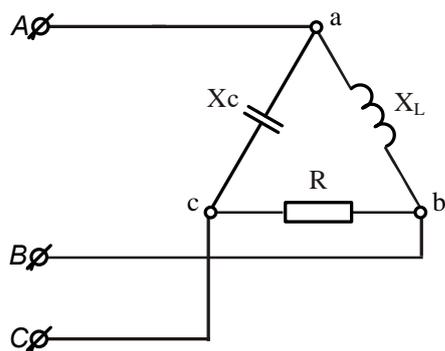


Рис. 2.6

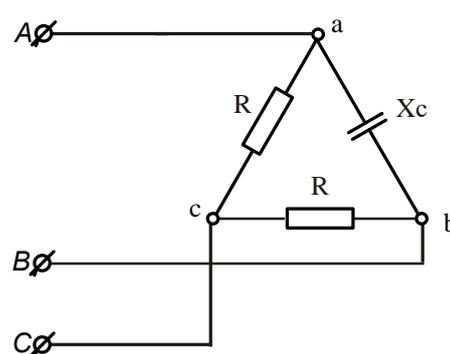


Рис. 2.7

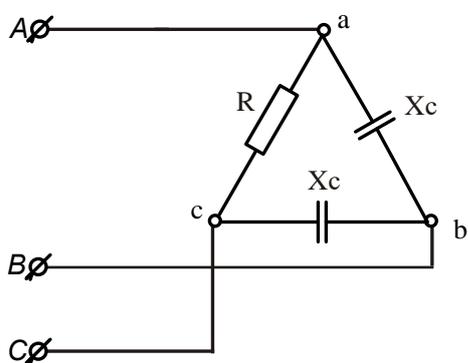


Рис. 2.8

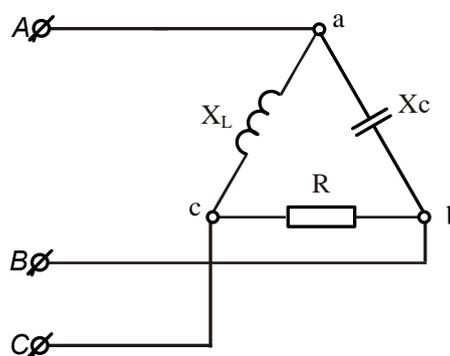


Рис. 2.9

Таблица 2-2 - Варианты контрольных заданий к заданию №2

Номер варианта	Величина				Номер рисунка
	$R, \text{ Ом}$	$X_L, \text{ Ом}$	$X_C, \text{ Ом}$	$U_L, \text{ В}$	
1	76	76	38	380	2.4
2	22	14	22	220	2.5
3	38	19	38	380	2.6
4	22	44	22	220	2.7
5	38	76	38	380	2.8
6	22	44	22	220	2.9
7	76	38	76	380	2.4
8	22	22	44	220	2.5
9	76	76	38	380	2.6
10	22	22	44	220	2.7
11	38	38	38	380	2.8
12	22	22	22	220	2.9
13	38	38	76	380	2.4
14	44	44	44	220	2.5
15	76	76	76	380	2.6
16	22	44	22	220	2.7
17	38	76	38	380	2.8
18	22	44	22	220	2.9
19	38	38	76	380	2.4
20	22	44	22	220	2.5
21	76	76	38	380	2.6
22	44	44	22	220	2.7
23	38	38	38	380	2.8
24	44	22	44	220	2.9
25	38	38	38	380	2.4
26	22	22	22	220	2.5
27	38	38	76	380	2.6
28	44	22	22	220	2.7
29	38	19	19	380	2.8
30	22	22	14	220	2.9

Пример расчета

К трехфазной линии с линейным напряжением $U_{\text{л}}=220\text{В}$ подключен трехфазный приемник, соединенный по схеме «треугольник» (рис. 2.10). Активное и реактивное сопротивления фазы приемника соответственно равны:

$$R_{ab} = 10 \text{ Ом}, X_{bc} = 20 \text{ Ом}, X_{ca} = 10 \text{ Ом}.$$

Характер нагрузки фазы:

bc – индуктивный,

фазы ca – емкостной.

Определить:

- 1) ток в фазах приемника и линейных проводах,
- 2) потребляемую приемником активную и реактивную мощность,
- 3) построить векторную диаграмму.

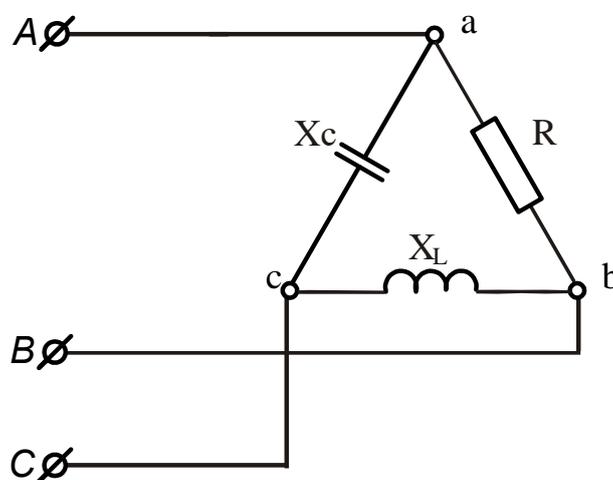


Рис. 2.10

Решение:

Чертим схему нагрузки и выбираем условное направление токов.

Нагрузка фазы ab - активная, фазы bc - индуктивная, фазы ca - емкостная, т.е.

$$\underline{Z}_{ab} = R_{ab} = 10 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{bc} = jX_{bc} = j20 = 20e^{j90} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ca} = -jX_{ca} = -j10 = 10e^{-j90} \text{ Ом}.$$

Определяем комплексные напряжения на всех трех фазах приемника, при включении нагрузки по схеме «треугольник»:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = 127e^{j0^\circ} - 127e^{-j120^\circ} = 190,5 + j110 = 220e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = 127e^{-j120^\circ} - 127e^{j120^\circ} = -j220 = 220e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = 127e^{j120^\circ} - 127e^{j0^\circ} = -190,5 + j110 = 220e^{j150^\circ} \text{ В};$$

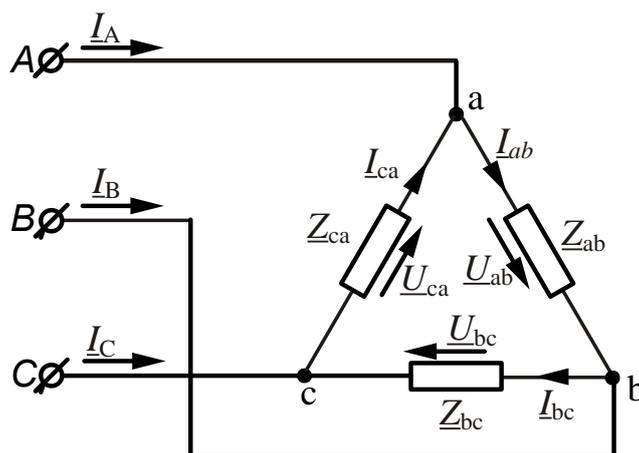


Рис. 2.11 - Схема нагрузки и условные направления токов.

Находим фазные токи по закону Ома.

Ток фазы ab :

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{\underline{U}_{ab}}{R_{ab}} = \frac{U_{\text{л}} e^{j30^\circ}}{R_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{10} = 22e^{j30^\circ} = 19,05 + j11 \text{ А.}$$

Ток фазы bc :

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{\underline{U}_{bc}}{jX_{bc}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{20e^{j90^\circ}} = 11e^{-j180^\circ} = -11 \text{ А.}$$

Ток фазы ca :

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{\underline{U}_{ca}}{-jX_{ca}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 22e^{j240^\circ} = -11 - j19,05 \text{ А.}$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в линии A находится как:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 19,05 + j11 - (-11 - j19,05) = 30,05 + j30,05 = 42,5e^{j45^\circ} \text{ А.}$$

Аналогичным образом находится ток в линии B

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -11 - (19,05 + j11) = -30,05 - j11 = 32e^{-j160^\circ} \text{ А.}$$

Ток в линии C

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -11 - j19,05 + 11 = -j19,05 = 19,05e^{-j90^\circ} \text{ А.}$$

Проверка решения:

Решение проверим с помощью уравнения энергетического баланса:

$$\underline{S}_{\text{ист}} = \underline{S}_{\text{потр}}.$$

Мощность отдаваемая сетью

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{ист}} &= \underline{U}_{ab}^* I_{ab} + \underline{U}_{bc}^* I_{bc} + \underline{U}_{ca}^* I_{ca} = \\ &= 220e^{j30^\circ} \cdot 22e^{-j30^\circ} + 220e^{-j90^\circ} \cdot 11e^{j180^\circ} + 220e^{j150^\circ} \cdot 22e^{-j240^\circ} = \\ &= 4840 + j(2420 - 4840) = 4840 - j2420 = 5411,28e^{-j26,56^\circ} \text{ В} \cdot \text{А} \end{aligned}$$

Активная мощность, потребляемая трехфазной нагрузкой, находится как сумма активных мощностей каждой фазы нагрузки:

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

В данном случае активная мощность расходуется только в фазе ab , т.к. в остальных фазах нагрузка чисто реактивная, т.е.

$$P_{bc} = P_{ca} = 0,$$

поэтому

$$P = P_{ab} = R_{ab} I_{ab}^2 = 10 \cdot 22^2 = 4840 \text{ Вт}$$

Суммарная реактивная мощность

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

Реактивная мощность в фазе ab :

$$Q_{ab} = 0$$

Реактивная мощность в фазе bc :

$$Q_{bc} = Q_{bc} I_{bc}^2 = 20 \cdot 11^2 = 2420 \text{ ВАр}$$

Реактивная мощность в фазе ca :

$$Q_{ca} = Q_{ca} I_{ca}^2 = 10 \cdot 22^2 = 4840 \text{ ВАр}$$

Полная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{потр}} &= \sum P_{\phi} + j \sum (Q_L - Q_C) = 4840 + j(2420 - 4840) = \\ &= 4840 - j2420 = 5411,28e^{-j26,56^\circ} \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Сравнив мощность отдаваемую источником и мощность потребляемую трехфазной нагрузкой, видно, что энергетический баланс исследуемой цепи сошелся и следовательно задача решена верно.

В соответствии с полученными данными строим векторно-топографическую диаграмму рис. 2.12.

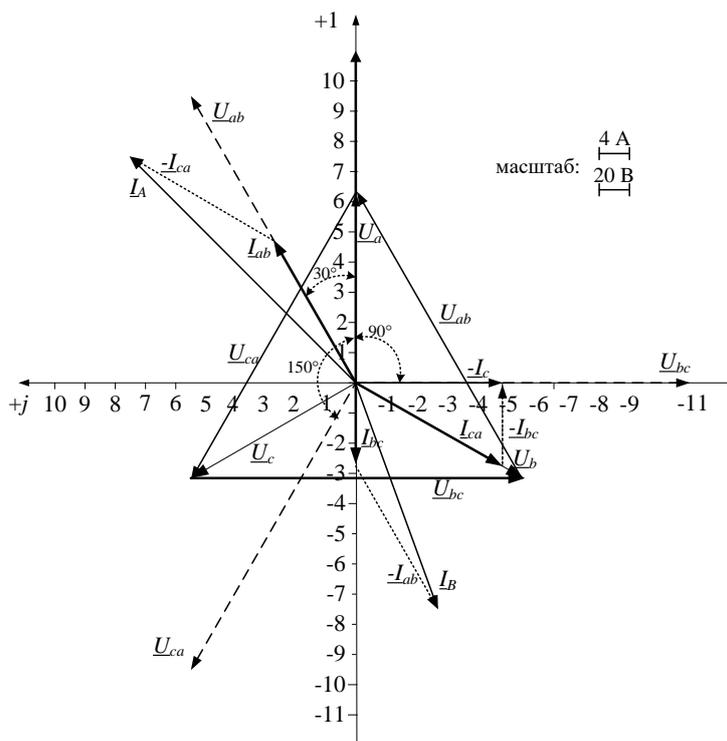


Рис. 2.12 Векторная диаграмма токов и напряжений.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение трехфазной системы синусоидального тока.
2. Объясните преимущества трехфазной системы синусоидального тока в сравнении с однофазной системой.
3. Назовите способы соединения потребителей электроэнергии в трехфазной системе.
4. Поясните назначение нейтрального провода и почему в этот провод не включаются разъединители и предохранители.
5. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении трехфазных потребителей электроэнергии звездой и треугольником?
6. Поясните способы включения ваттметров для измерения активной мощности в четырехпроводных и трехпроводных трехфазных электрических цепях.
7. Поясните, чем опасно короткое замыкание фазы потребителя электроэнергии в четырехпроводной системе трехфазной электрической цепи.
8. Укажите условия симметрии трехфазного потребителя электроэнергии.
9. Как изменятся напряжения и токи потребителя электроэнергии в четырехпроводной трехфазной симметричной системе при отключении нейтрального провода?
10. В каком случае нельзя использовать метод двух ваттметров при измерении активной мощности трехфазного потребителя электроэнергии?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник М. Гардарики, 2006.
2. Демирчан К.С, Нейман Л.Р, Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники., т.1. М-СПб., Питер, 2004.
3. Коровкин Н.В., Селина Е.Е. Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники; Сборник задач. – СПб.: Питер, 2004.