

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

С.А. Конева, Ю.В. Матвеев, В.М. Цалоев

О Б Щ А Я ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальностей
26.05.06 – «Эксплуатация судовых энергетических установок»,
26.05.05 – «Судовождение»
всех форм обучения

В 2 частях

Часть 1

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 621.3(076.5)
ББК 31.21я73
К64

Р е ц е н з е н т :

Л.Н. Канов - канд. техн. наук, доцент
кафедры «Судовое электрооборудование»

Конева С.А.

К64 Общая электротехника и электроника : методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальностей 26.05.06 – «Эксплуатация судовых энергетических установок», 26.05.05 – «Судовождение» всех форм обучения : в 2-х частях. Ч. 1 / С. А. Конева, Ю. В. Матвеев, В. М. Цалоев ; Севастопольский государственный университет, Морской институт, каф. «Судовое электрооборудование». – Севастополь : СевГУ, 2022. – 57 с. – Текст : электронный.

Предназначены для студентов Севастопольского государственного университета, Морского института, специальностей 26.05.06 – «Эксплуатация судовых энергетических установок», 26.05.05 – «Судовождение» всех форм обучения, выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Общая электротехника и электроника».

УДК 621.3(076.5)
ББК 31.21я73

Рассмотрены и рекомендованы на заседании кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института Севастопольского государственного университета в качестве методических указаний к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Общая электротехника и электроника» для студентов специальностей 26.05.06 – «Эксплуатация судовых энергетических установок», 26.05.05 – «Судовождение» всех форм обучения, протокол № 9 от 7 мая 2022 г.

© Конева С.А., Матвеев Ю.В.,
Цалоев В.М., 2022
© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Правила техники безопасности.....	7
Лабораторная работа № 1. Исследование разветвленной линейной электрической цепи.....	9
Лабораторная работа № 2. Определение параметров элементов электрических цепей переменного тока.....	14
Лабораторная работа № 3. Исследование цепей переменного тока с последовательным соединением элементов.....	19
Лабораторная работа № 4. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением элементов.....	29
Лабораторная работа № 5. Исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме “Звезда”.....	37
Лабораторная работа № 6. Исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме “Треугольник”.....	46
Литература.....	55
Приложение А. Образец бланка титульного листа к лабораторной работе....	57

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия имеют целью закрепить знания студентами теоретических положений курса, обучить их методам экспериментальных исследований, привить навыки научного анализа и обобщения полученных результатов.

В методических указаниях содержатся описания всех лабораторных работ по курсу, в каждой из которых указана тема, учебная цель, схема лабораторной работы, порядок выполнения, примерный план отчета, основные теоретические положения.

Занятия в лаборатории являются основным видом занятий, позволяющим получить соответствующие компетентности и навыки по проведению электрических измерений.

При подготовке к проведению лабораторной работы студенты обязаны:

- изучить соответствующие теоретические разделы дисциплины и порядок выполнения работы;

- подготовить бланк отчета.

В бланке отчета по лабораторной работе должны быть отражены:

- название работы;

- цель работы;

- фамилия студента, группа;

- дата выполнения работы;

- схема лабораторной установки;

- список лабораторного оборудования и других элементов лабораторной установки;

- таблицы экспериментальных и расчетных данных;

- графики и диаграммы;

- расчетные формулы и сами вычисления;

- выводы по работе;

- оценка по работе;

- подписи студента и преподавателя с указанием даты.

Образец бланка титульного листа отчета по лабораторной работе приведен в **Приложении А**.

Во время подготовки к лабораторной работе студент заполняет в бланке отчета тему и цель работы, свою фамилию, группу. В этом же бланке он приводит: схему лабораторной установки; список лабораторного оборудования; вопросы, подлежащие исследованию и решенные задачи из задания к лабораторной работе. Для лучшего освоения теоретического материала и подготовки студентов к лабораторным занятиям в методических указаниях приведен список литературы [1—11]. В целях оценки погрешностей измерений и измерительных приборов, а также принципами работы электроизмерительных приборов, следует воспользоваться книгой [12].

После допуска к проведению лабораторной работы и инструктажа по ее проведению студенты, разбившись на группы по 3...4 человека, расходятся по рабочим местам и знакомятся с используемым в лабораторной работе стендом.

Для проведения работ используются современные лабораторные стенды ООО “ЛАБСИС”.

Далее студенты проверяют соответствие электроизмерительных приборов ожидаемым значениям измеряемых величин и записывают в бланк отчета их номинальные данные и основные элементы лабораторной установки.

После этого студенты приступают к сборке схемы лабораторной установки, соединяя элементы схемы таким образом, чтобы можно было легко проверить схему соединений и обеспечить удобство выполнения работы.

По окончании сборки схема должна быть тщательно проверена самими студентами.

Собранная и проверенная студентами схема предъявляется преподавателю (лаборанту) для проверки и, только с его разрешения может быть включена под напряжение.

В момент включения необходимо наблюдать за показаниями приборов. При неправильном или недопустимо большом отклонении стрелок приборов схема должна быть немедленно отключена, после чего необходимо выяснить и устранить причины, вызвавшие указанные явления.

Затем следует приступить к выполнению программы работы в порядке и в соответствии с указаниями, изложенными в настоящем пособии. Каждая группа студентов при выполнении работы ведет протокол наблюдений. Особое внимание следует обратить на осмысленное, а не механическое выполнение каждой операции, стремиться понять физическую сущность происходящих в электрических цепях явлений. После выполнения задания студенты предъявляют результаты работы преподавателю и с его разрешения разбирают схему лабораторной установки. Разобрав схему, студенты приводят в порядок рабочее место, после чего старший группы сдает его лаборанту.

Затем студенты приступают к оформлению индивидуальных отчетов по выполненной работе.

В этом отчете студенты производят анализ выполненного эксперимента и делают выводы по работе. При выполнении графической части отчета необходимо соблюдать следующие правила:

1. Выполняя построение графика функциональной зависимости между двумя переменными, значение аргумента откладывать на оси абсцисс, а значение функции – на оси ординат.

2. Масштабы для аргумента и функции выбирать так, чтобы в 1 см содержалось 1, 2, 5, 10 единиц или кратные этим цифрам значения.

3. На координатных осях наносить только шкалы, соответствующие выбранным масштабам. При этом буквенные обозначения величин должны быть нанесены у концов осей: аргумента — ниже оси абсцисс, а функции — правее оси ординат. Числовые значения величин — соответственно ниже оси абсцисс и левее оси ординат. Если совмещаются зависимости нескольких функций от одного аргумента, то параллельно оси ординат наносится соответствующее число масштабных линий.

4. Опытные данные наносить на график в виде отчетливых точек, кружков или звездочек (для каждой кривой свои обозначения). По точкам и между точ-

ками с помощью лекал проводится плавная кривая или прямая, выражающая функциональную зависимость; не лежащие на этой линии точки чаще всего свидетельствуют о погрешности измерения, наблюдения или расчета.

5. Размер графиков не должен быть меньше $10 \times 10 \text{ см}^2$. При необходимости в бланк отчета можно вклеивать дополнительные листы с графиками. В выводах по работе необходимо сделать конкретный анализ полученных результатов по каждому пункту программы. При этом следует указать, какие явления и процессы наблюдались, охарактеризовать измерительную технику, отметить особые свойства элементов схемы и дать оценку их эксплуатационным качествам. Оформленный отчет должен быть подписан студентом и сдан преподавателю в конце занятия (или в другой срок, указанный преподавателем).

В целях самопроверки в конце описания каждой из работ предлагается примерный перечень контрольных вопросов.

Защита отчетов по лабораторной работе может проводиться в конце данного лабораторного занятия, либо — в часы консультаций и осуществляться путем проверки отчетов и собеседования со студентом или группой студентов, выполнявших вместе работу.

Автор считает своим долгом выразить благодарность за рецензирование к.т.н., доценту Л.Н. Канову.

Автор

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Общие требования

1. Перед первым посещением лаборатории студенты обязаны изучить данную инструкцию и расписаться в специальном журнале у инженера лаборатории и только после этого допускаются к выполнению лабораторных работ.
2. Студенты, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к лабораторным занятиям не допускаются.
3. Перед началом занятий преподаватель должен напомнить студентам настоящую инструкцию и основные правила техники безопасности.

Правила техники безопасности перед началом работ

В качестве допустимого безопасного синусоидального тока промышленной частоты 50 Гц при длительном воздействии принимается величина 0,001 А, величина тока от 0,025 до 0,03 А приводит к различным поражениям, а от 0,03 до 0,01 А - к потере сознания или даже к смерти. Ток $\approx 0,1$ А считается безусловно смертельным.

Приведенные выше цифры нельзя считать строго постоянными, так как действие электрического тока на организм человека зависит также от его психического состояния. Величина поражающего тока согласно закону Ома зависит от величины приложенного напряжения и электрического сопротивления человеческого тела, которое определяется в основном сопротивлением поверхности кожи, так как сопротивление тканей тела человека очень мало по сравнению с сопротивлением поверхности кожи. Кроме того, величина сопротивления тела человека зависит в значительной степени от состояния кожи в точках соприкосновения с оголенными частями оборудования, находящимися под напряжением. Например, величина сопротивления тела с грубой и сухой кожей составляет примерно 100...200 кОм, а более тонкой 30...50 кОм. При влажной коже сопротивление тела человека может снижаться до величины порядка 1 кОм. Со снижением сопротивления тела человека величина поражающего тока при неизменном напряжении растет, следовательно, возрастает опасность поражения организма человека.

Вследствие вышесказанного, при выполнении лабораторных работ, студенты обязаны строжайшим образом выполнять следующие правила техники безопасности.

1. Сборка схемы должна производиться только при полном снятии напряжения.
2. Перед подачей напряжения на лабораторную установку студент должен дать предупредительный сигнал объявить устно: «Включаю» или «Подаю напряжение».
3. Студент должен расположиться таким образом, чтобы лабораторный стенд постоянно находился в зоне прямой видимости.
4. На рабочем месте студента должен находиться диэлектрический коврик. Инструменты должны быть с изолированными ручками.

Правила техники безопасности во время выполнения работы

1. Запрещается производить включение схемы под напряжение без разрешения преподавателя или лаборанта. Студенты, нарушающие указанное правило, удаляются из лаборатории.
2. Нельзя касаться незащищенными руками токоведущих частей (контактов, обмоток проволочных реостатов и т.д.), когда цепь под напряжением.
3. Категорически запрещается делать какие-либо переключения или изменения в схеме, когда она находится под напряжением.
4. При включении надо убедиться, что никто не находится под напряжением и предупредить людей, находящихся вблизи сигналом и командой: «Включаю» или «Подаю напряжение».
5. Включение цепи, переключение приборов и выключателей перемещение движков реостатов производится одной рукой, не касаясь другой металлических и неизолированных частей.
6. При работе вблизи распределительных щитов следует соблюдать осторожность, чтобы не замкнуть контакты металлическими предметами.
7. При работе с электрическими цепями, содержащие катушку индуктивности и конденсаторы, следует помнить, что при резонансах напряжения и токи на отдельных участках таких цепей могут значительно превысить номинальные значения и что конденсаторы длительное время сохраняют заряд.
8. Категорически запрещается делать какие-либо включения, переключения и т.п. на щитах и установках, не входящих в комплект оборудования выполняемой работы.
9. На лабораторном столе не должно быть предметов, не имеющих отношения к выполняемой работе.
10. Запрещается выполнять работу сидя.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Время: 2 часа

1.1 Цель работы

1.1.1. Экспериментальная проверка соотношений между напряжениями и токами в электрической цепи с одним источником энергии.

1.1.2. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

1.2 Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 1.1.

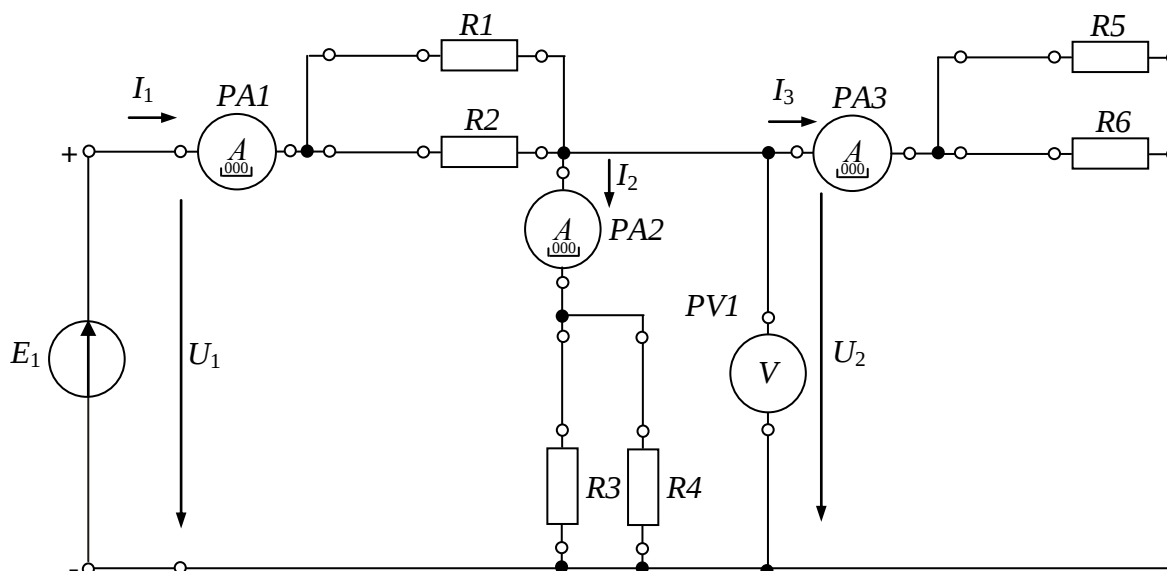


Рисунок 1.1 — Схема лабораторной установки

Основными элементами установки являются: источники электропитания, измерительные приборы, набор сопротивлений $R1—R6$.

Номиналы нерегулируемых сопротивлений следующие [1]: $R1=5\text{ Ом}$, $R2=40\text{ Ом}$, $R3=10\text{ Ом}$, $R4=80\text{ Ом}$, $R5=100\text{ Ом}$, $R6=120\text{ Ом}$.

Подключение элементов стенда осуществляется с помощью электрических проводов. В стенде имеются два источника электропитания. Один источник предназначен для подачи с помощью соединительных проводов на исследуемую электрическую цепь постоянного нерегулируемого напряжения $+15\text{ В}$, а другой — для подачи на схему регулируемого постоянного напряжения в диапазоне $0...12\text{ В}$. Для измерения токов и напряжений в установке используются следующие измерительные приборы соответственно:

- стрелочный вольтметр $PV1$ типа $M42300$, необходимый для измерения значения постоянного напряжения на входе и участке исследуемой цепи;

- цифровые амперметры $PA1—PA3$ с диапазоном измерения $0...0,5\text{ А}$, предназначенные для измерения значений токов в ветвях электрической цепи.

1.3 Порядок выполнения работы

1.3.1. Собрать, согласно рисунка 1.1, схему лабораторной установки.

1.3.2. По заданию преподавателя, подключив к входу схемы регулируемый источник постоянного напряжения, установить необходимое значение постоянного напряжения U_1 , применяя вольтметр $PV1$.

1.3.3. Далее, согласно рисунка 1.1, необходимо переподключить вольтметр $PV1$ для измерения постоянного напряжения U_2 .

1.3.4. Снять показания вольтметра $PV1$ и амперметров $PA1 - PA3$.

1.3.5. Результаты опыта занести в таблицу 1.1.

1.3.6. Рассчитать токи и напряжения на участках цепи и занести их значения в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — Экспериментальные и расчетные данные

Способ получения результата	Значения токов и напряжений				
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$
Эксперимент					
Расчет					

1.3.7. Провести второй эксперимент. Для этого необходимо выключить питание стенда и отключить в ее схеме сопротивления $R1$, $R4$ и $R5$.

1.3.8. Снять показания вольтметра $PV1$ и амперметров $PA1 - PA3$.

1.3.9. Результаты опыта занести в таблицу 1.2.

1.3.10. Выключить электропитание стенда.

1.3.11. Рассчитать токи и напряжения на участках цепи и занести их значения в таблицу 1.2.

1.3.12. Составить отчет по требуемой форме.

Таблица 1.2 — Экспериментальные и расчетные данные

Способ получения результата	Значения токов и напряжений				
	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$
Эксперимент					
Расчет					

1.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- название и цель работы;
- схема лабораторной установки с номинальными данными ее элементов;
- список лабораторного оборудования;
- результаты измерений и вычислений по двум опытам (таблица 1.1 и 1.2);
- выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчетных данных;
 - выводы о выполнении законов Кирхгофа и о применении закона Ома в линейной электрической цепи постоянного тока;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

1.5 Основные теоретические положения

1.5.1 Расчет простых электрических цепей постоянного тока

Электрической цепью называется совокупность источников электрической энергии, приемников и соединяющих их электропроводов.

Источником электрической энергии — электротехнические устройства, производящие электрическую энергию.

Потребители электрической энергии — электротехнические устройства, ее потребляющие.

Электрический ток в общем случае является упорядоченным направленным движением электрических зарядов в среде под действием электрического поля. Электродвижущая сила является той причиной, которая вызывает в замкнутой цепи электрический ток. В результате действия ЭДС источника в замкнутой цепи возникает электрическое поле, а на отдельных участках появляется разность потенциалов. Свободные положительные заряды в электрическом поле движутся от точек высшего потенциала к точке с низшим потенциалом. Поэтому за положительное направление тока в проводнике принимается направление убывания в нем потенциала. Ток участка зависит от электрического сопротивления участка.

Убывание электрического потенциала или равная ему разность потенциала на участке цепи, изображенной на рисунке 1.2, называют также **электрическим напряжением** или просто **напряжением участка цепи**

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = A_{12}/Q,$$

где A_{12} — работа, затрачиваемая на перемещение заряда Q из точки 1 в точку 2. Если при перемещении заряда Q по замкнутой цепи источник ЭДС должен совершить работу, равную A , то $E = A/Q$. Следовательно,

напряжение на участке цепи можно рассматривать как составляющую ЭДС источника, расходуемую на этом участке. Для участка цепи, не содержащего ЭДС, ток в цепи определяется по закону Ома следующим образом:

$$I = U_{12}/R_{12}.$$

Мощность в цепи, не содержащей ЭДС, определится как $P_{ab} = U_{ab}^2/R_{ab}$.

Рассмотрим участок цепи, содержащий ЭДС. На рисунке 1.3 изображены участки цепи, в котором направление стрелки с условным обозначением ЭДС совпадает (а) и не совпадает (б) с направлением тока в цепи, соответственно.

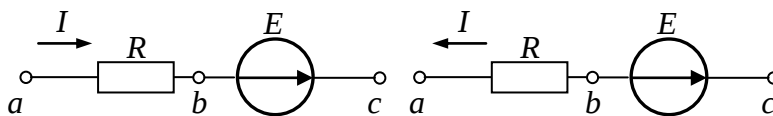


Рисунок 1.3 — Участок цепи с ЭДС:

- а) — при совпадении направления ЭДС и тока в цепи;
- б) — при не совпадении направления ЭДС и тока в цепи

Для участка цепи (рисунок 1.3, а) ток в цепи с обозначенными потенциалами в точках a , b и c можно определить по закону Ома следующим образом:

$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c$; $\varphi_b = \varphi_c - E$; $\varphi_a = \varphi_b + IR$. Для схемы, изображенной на рисунке

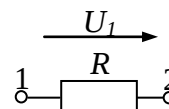


Рисунок 1.2 — Участок цепи с сопротивлением

1.3,6, по аналогии можно записать выражение тока в цепи $I = (U_{ac} - E)/R$.

1.5.2 Расчет разветвленных электрических цепей постоянного тока

При анализе разветвленной электрической цепи используются понятия: электрический контур; электрическая ветвь и электрический узел.

Электрический узел — точка разветвления электрической цепи, в которой сходится более двух проводников.

Электрическая ветвь — участок цепи между двумя соседними узлами.

Электрический контур — замкнутая электрическая цепь, состоящая из электрических ветвей. Контур называется независимым, если в него входит, хотя бы одна новая электрическая ветвь.

Все электрические цепи подчиняются первому и второму законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа можно сформулировать двояко [2]:

1) алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю;

2) сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих от узла токов.

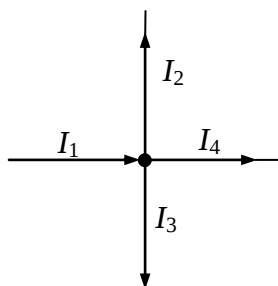


Рисунок 1.4 — Участок цепи с электрическим узлом

Покажем применение 1-го закона Кирхгофа на примере (см. рисунок 1.3.). Так, если подтекающие к узлу токи считать положительными, а утекающие — отрицательными, то согласно первой формулировке [4]:

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0,$$

а согласно второй:

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4.$$

Второй закон Кирхгофа можно сформулировать также двояко. По первой формулировке:

алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равняется алгебраической сумме ЭДС вдоль того же контура [4]:

$$\sum_m I_m R_m = \sum_l E_l.$$

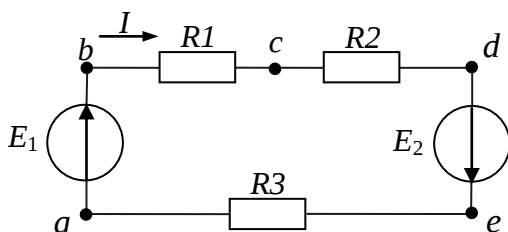


Рисунок 1.5 — Электрический контур

В каждую из сумм соответствующие слагаемые входят со знаком «+», если они совпадают с направлением обхода контура, и со знаком «-», если они не совпадают с ним.

В качестве примера, для схемы электрического контура, изображенной на рисунке 1.5, по 2-му закону Кирхгофа

$I(R_1 + R_2 + R_3) = E_1 + E_2$. По второй формулировке: алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю [4]:

$$\sum_k U_k = 0.$$

Законы Кирхгофа справедливы для линейных и нелинейных цепей при

любом характере изменения во времени токов и напряжений.

1.5.3 Анализ результатов расчета токов в ветвях электрической цепи с помощью баланса мощностей

Сравнение вычисленных токов в ветвях различными методами позволяет сделать вывод о совпадении значений токов с точностью до сотых долей. Для полной характеристики режима электрической цепи надо знать не только токи ветвей и потенциалы узлов, но также мощности, развиваемые источниками электрической энергии и потребляемые приемниками (нагрузками). Исходя, из закона сохранения энергии можно утверждать, что в электрической цепи алгебраическая сумма мощностей всех источников электрической энергии равна арифметической сумме мощностей всех приемников (внутреннее сопротивление источника электрической энергии следует рассматривать как приемник, если его рекомендовано учитывать).

Уравнение баланса мощностей выглядит следующим образом [5]

$$\sum_{i=1}^n I_i E_i = \sum_{j=1}^k I_j^2 R_j,$$

где I_i и I_j — действующие значения токов в i -й и j -й ветвях цепей, содержащих источники и приемники соответственно; E_i — ЭДС i -го источника; R_j — сопротивление j -й ветви. При составлении баланса мощностей следует учитывать, что если **действительные** направления ЭДС и тока совпадают, то мощность такого источника электрической энергии входит в уравнение с положительным знаком и источник отдает энергию в сеть (работает в режиме генератора). В случае если **действительные** направления ЭДС и тока не совпадают, то мощность такого источника электрической энергии входит в уравнение с отрицательным знаком и источник забирает энергию из сети (работает в режиме приемника). При невыполнении баланса мощностей следует повторить расчет.

1.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каков порядок действий при выполнении работы?
3. Какие элементы включает лабораторная установка?
4. Что называют узлом, ветвью и контуром электрической цепи?
5. Что понимают под напряжением на некотором участке электрической цепи?
6. Как формулируются первый и второй законы Кирхгофа?
7. Что понимают под напряжением на некотором участке электрической цепи?
8. С какой целью необходимо составлять уравнение баланса мощностей?
9. Как формулируется закон Ома для участка цепи, не содержащей и содержащей ЭДС?
10. Как рассчитать электрическую цепь по методу контурных токов?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Время: 2 часа

2.1 Цель работы

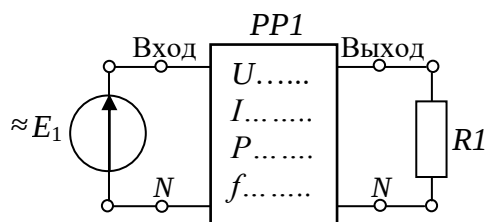
2.1.1. Экспериментальное определение параметров элементов электрических цепей переменного тока.

2.1.2. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

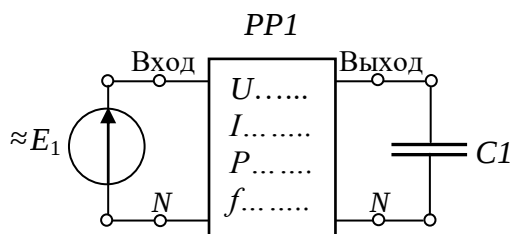
2.2 Схема лабораторной установки

Одной из целей работы является экспериментальное определение значений: сопротивления резистора, емкости конденсатора и параметров катушки индуктивности. Все элементы включаются в цепь переменного тока.

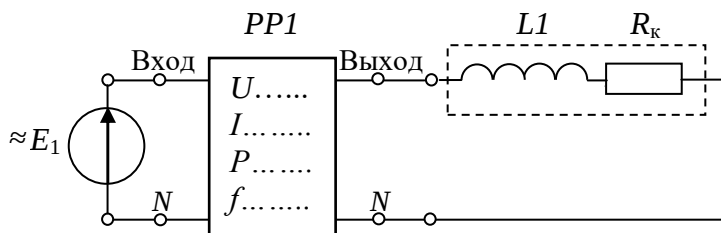
Для определения величины сопротивления необходимо собрать схему, согласно рисунку 2.1. В целях нахождения величины емкости конденсатора необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 2.2, а определения значений параметров катушки индуктивности — схему, изображенную на рисунке 2.3.



**Рисунок 2.1 — Схема лабораторной установки
для определения значения сопротивления**



**Рисунок 2.2 — Схема лабораторной установки
для определения значения емкости конденсатора**



**Рисунок 2.3 — Схема лабораторной установки
для определения значений параметров катушки индуктивности**

Для проведения экспериментов лабораторный стенд содержит [2]: источник

электропитания E_1 , измерительные приборы, катушки индуктивности $L1$ и $L2$, батарея из 4-х конденсаторов $C1 - C4$ и набор из 4-х сопротивлений $R1 - R4$.

Индуктивности катушек индуктивности составляют: $L1=40$ мГн, $L2=80$ мГн.

Батарея из конденсаторов включает конденсаторы с емкостями: $C1=4,7$ мкФ, $C2=6,7$ мкФ, $C3=10$ мкФ, $C4=22$ мкФ,

Нерегулируемые активные сопротивления имеют следующие номинальные значения: $R1=22$ Ом, $R2=47$ Ом, $R3=82$ Ом, $R4=120$ Ом.

Подключение элементов стенда осуществляется с помощью электрических проводов. В схеме стенда имеется встроенный источник переменного напряжения с регулируемым переменным напряжением от $0 \dots 10$ В и частотой синусоидального напряжения в пределах $40 \dots 400$ Гц. Для фиксирования необходимых физических величин, характеризующих режим работы цепи, в составе стенда имеются измерительные приборы [2]:

- стрелочный вольтметр $PV1$ типа Ц42300 с пределом измерения 15 В;
- цифровые амперметры $PA1$ и $PA2$, измеряющие действующие значения переменного тока в диапазоне $0 \dots 300$ мА;
- цифровой универсальный измеритель мощности $PP1$, измеряющий значения электрических параметров:
 - действующее значение тока в диапазоне $0 \dots 0,3$ А;
 - действующее значение напряжения в диапазоне $0 \dots 30$ В;
 - активной мощности в диапазоне $0 \dots 9$ Вт;
 - реактивной мощности в диапазоне $0 \dots 9$ ВАр;
 - полной мощности в диапазоне $0 \dots 9$ ВА;
 - частоты в диапазоне $5 \dots 400$ Гц;
 - коэффициента мощности ($\cos\varphi$);
 - угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи (φ).

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1. Для экспериментального определения величины **сопротивления резистора** необходимо собрать схему установки, согласно рисунка 2.1.

Резистор $R1$ следует выбрать из магазина сопротивлений в соответствии с заданием. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение. Представить схему для проверки преподавателю.

2.3.2. Включить электропитание стенда.

2.3.3. Установить на выходе встроенного источника переменного напряжения значение синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

2.3.4. Для измерения действующих значений напряжений на элементах цепи необходимо использовать стрелочный вольтметр $PV1$. В целях измерения значений электрических величин следует подключить универсальный измеритель мощности $PP1$. С помощью этого измерителя можно провести измерения: действующих значений тока и напряжения; активной, реактивной и полной мощностей; частоты, коэффициента мощности и угла сдвига фаз между напряжением и током в цепи.

2.3.5. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 2.1.

2.3.6. Повторить опыт, изменяя значение сопротивления. Данные занести в ту же таблицу.

Таблица 2.1 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Измерено				Вычислено
	U , В	I , мА	P , Вт	f , Гц	R_1 , Ом

2.3.7. Для экспериментального определения величины **емкости конденсатора** необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 2.2.

Конденсатор $C1$ выбрать из батареи конденсаторов в соответствии с заданием. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение. Представить схему для проверки преподавателю.

2.3.8. Включить электропитание стенда.

2.3.9. Установить на выходе встроенного источника переменного напряжения значение синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

2.3.10. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 2.2.

2.3.11. Повторить опыт, изменяя значение емкости конденсатора.

Таблица 2.2 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Измерено				Вычислено			
	U , В	I , мА	P , Вт	f , Гц	x , Ом	z , Ом	φ , град	C_1 , мкФ

2.3.12. Для экспериментального определения значений **параметров катушки индуктивности** необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 2.3.

В начале для эксперимента следует взять катушку индуктивности с индуктивностью $L1$. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение. Представить схему для проверки преподавателю.

2.3.13. Включить электропитание стенда.

2.3.14. Установить на выходе встроенного источника переменного напряжения значение синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

2.3.15. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 2.3.

2.3.16. Повторить опыт, поменяв катушку индуктивности на катушку с индуктивностью $L2$. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Измерено				Вычислено				
	U , В	I , мА	P , Вт	f , Гц	x , Ом	z , Ом	φ , град	R_k , Ом	L_1 , мГн

2.3.17. Выключить стенд.

2.3.18. По результатам опытов необходимо произвести вычисления:

— активного сопротивления R_1 (Таблица 2.1);

— реактивного x и полного z сопротивлений цепи с конденсатором, значений емкости конденсатора C_1 , а также сдвига фаз φ между током и напряжением в исследуемой цепи (Таблица 2.2);

— реактивного x и полного z сопротивлений цепи с катушкой индуктивности, значений индуктивности L_1 и активного сопротивления R_k катушки индуктивности, а также сдвига фаз φ между током и напряжением в исследуемой цепи (Таблица 2.3) .

2.3.19. Результаты измерений и вычислений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему установки.

2.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

а) цель работы;

б) схема лабораторной установки с номинальными данными элементов лабораторной установки;

в) экспериментальные данные измерений;

г) расчеты активного, реактивного и полного сопротивлений исследуемых цепей, параметров цепей, а также сдвига фаз φ между током и напряжением в цепи;

д) векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей для всех проведенных опытов;

е) выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:

— влияние параметров элементов цепей на активное, реактивное и полное сопротивления исследуемых цепей;

— влияние изменения параметров цепи на сдвиг фаз φ между напряжением и током в цепи;

— практические навыки, полученные при выполнении работы.

2.5 Основные теоретические положения

Расчеты мгновенных и комплексных значений токов в цепях с исследуемыми элементами цепи и векторные диаграммы напряжений и токов приведен в таблице 2.4. Элементы подключаются к напряжению $u = U_m \cdot \sin \omega t$. Элементами электрической цепи переменного тока являются:

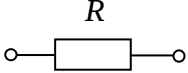
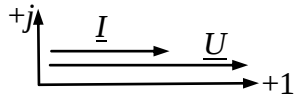
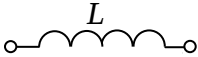
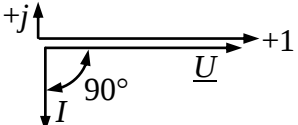
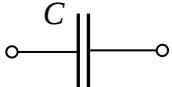
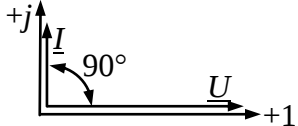
— активное сопротивление R , учитывающее преобразование электрической энергии в другие виды энергии;

— индуктивность L , учитывающая наличие магнитного поля и явление самоиндукции;

— конденсатор C , учитывающий наличие электрического поля.

В случае подключения реактивных элементов с потерями к источнику переменного напряжения сдвиг фаз между напряжением и током в цепи будет меньше 90° .

Таблица 2.4 — Расчеты мгновенных и комплексных значений токов в цепях с исследуемыми элементами цепи и векторные диаграммы напряжений и токов

Элемент цепи	Мгновенное значение тока	Закон Ома для цепи	Векторная диаграмма
	$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$	$I = \frac{U}{R}$	
	$i = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t - 90^\circ)$	$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{jX_L} = \frac{\underline{U}}{j\omega L}$	
	$i = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$	$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{-jX_C} = j\omega C \underline{U}$	

Векторной диаграммой называют совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенных с соблюдением правильной ориентации их относительно друг друга по фазе [5]. Если токи в ветвях схемы рассчитаны правильно, то сумма векторов токов в ветвях цепи будет равна вектору тока в неразветвленной части цепи. По аналогии на векторной диаграмме можно проверить правильность рассчитанных напряжений на участках цепи. Если напряжения на участках цепи рассчитаны правильно, то сумма векторов напряжений на участках цепи равна вектору входного напряжения. Векторные диаграммы токов и напряжений можно построить на отдельных рисунках или вместе на одном рисунке. В последнем случае это уже будет векторная диаграмма токов и напряжений.

В электротехнике положительные углы начальной фазы φ отсчитываются против часовой стрелки, а отрицательные наоборот.

2.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каков порядок действий при выполнении лабораторной работы?
3. Какие элементы включает стенд?
4. Какие типы приборов могут применяться для проведения измерений?
5. Как определить комплексные сопротивления исследуемых цепей?
6. Что такое полное сопротивление цепи?
7. Как параметры R и L влияют на ток в исследуемой RL -цепи?
8. Как связаны напряжения участков RL -цепи с входным напряжением цепи?
9. Как определить значение емкости конденсатора методом вольтметра-амперметра?
10. Можно ли без фазометра определить параметры катушки индуктивности?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Время: 2 часа

3.1 Цель работы

3.1.1. Исследование цепей переменного тока с последовательным соединением: резистора и конденсатора, резистора и катушки индуктивности, а также конденсатора и катушки индуктивности.

3.1.2. Исследование резонансных свойств последовательного LC -контура.

3.2 Схема лабораторной установки

Для исследования цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора и конденсатора, необходимо собрать схему, согласно рисунка 3.1. При исследовании цепи, включающей последовательно соединенные резистор и катушку индуктивности, необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 3.2, а для исследования цепи с последовательно соединенными конденсатором и катушкой индуктивности — схему на рисунке 3.3.

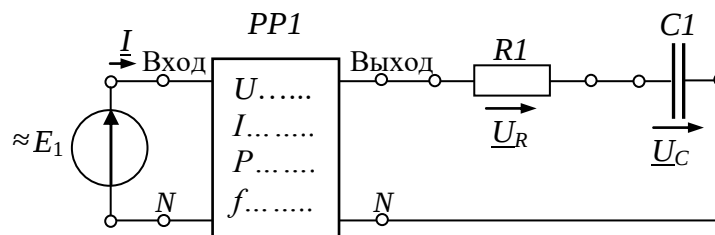


Рисунок 3.1 — Схема лабораторной установки, включающей активное сопротивление и конденсатор

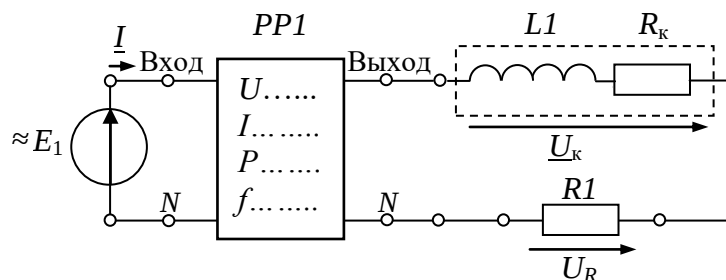


Рисунок 3.2 — Схема лабораторной установки, включающей активное сопротивление и катушку индуктивности

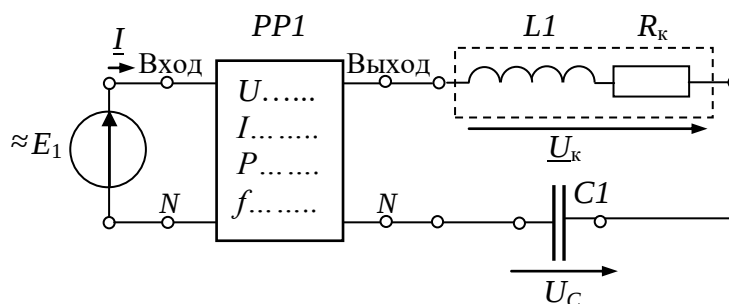


Рисунок 3.3 — Схема лабораторной установки, включающей конденсатор и катушку индуктивности

Для проведения экспериментов лабораторный стенд содержит [2]: источник электропитания E_1 , измерительные приборы, катушки индуктивности $L1$ и $L2$, батарея из 4-х конденсаторов $C1$ – $C4$ и набор из 4-х сопротивлений $R1$ – $R4$.

Индуктивности катушек индуктивности составляют: $L1=40$ мГн, $L2=80$ мГн.

Батарея из конденсаторов включает конденсаторы с емкостями: $C1=4,7$ мкФ, $C2=6,7$ мкФ, $C3=10$ мкФ, $C4=22$ мкФ,

Нерегулируемые активные сопротивления имеют следующие номинальные значения: $R1=22$ Ом, $R2=47$ Ом, $R3=82$ Ом, $R4=120$ Ом.

Подключение элементов стенда осуществляется с помощью электрических проводов. В схеме стенда имеется встроенный источник переменного напряжения с регулируемым переменным напряжением от 0...10 В и частотой синусоидального напряжения в пределах 40...400 Гц. Для фиксирования необходимых физических величин, характеризующих режим работы цепи, в составе стенда имеются измерительные приборы [2]:

- стрелочный вольтметр $PV1$ типа Ц42300 с пределом измерения 15 В;
- цифровые амперметры $PA1$ и $PA2$, измеряющие действующие значения переменного тока в диапазоне 0...300 мА;
- цифровой универсальный измеритель мощности $PP1$, измеряющий значения электрических параметров:
 - действующее значение тока в диапазоне 0...0,3 А;
 - действующее значение напряжения в диапазоне 0...30 В;
 - активной мощности в диапазоне 0...9 Вт;
 - реактивной мощности в диапазоне 0...9 ВАр;
 - полной мощности в диапазоне 0...9 ВА;
 - частоты в диапазоне 5...400 Гц;
 - коэффициента мощности ($\cos\varphi$);
 - угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи (φ).

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1. Для исследования цепи переменного тока, состоящей из последовательно соединенных **резистора и конденсатора**, необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 3.1. В соответствии с заданием, резистор $R1$ следует выбрать из магазина сопротивлений, а конденсатор $C1$ — из магазина конденсаторов.

Представить схему для проверки преподавателю.

3.3.2. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение.

3.3.3. Включить электропитание стенда.

3.3.4. Установить на выходе встроенного в стенд источника переменного напряжения значения синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

3.3.5. Для измерения действующих значений напряжений на конденсаторе (U_C) и активном сопротивлении (U_R) и элементах цепи можно использовать стрелочный вольтметр $PV1$. Кроме того, в целях измерения других значений электрических величин следует подключить универсальный из-

меритель мощности *РР1*. С помощью этого измерителя можно провести измерения: действующих значений тока и напряжения; активной, реактивной и полной мощностей; частоты, коэффициента мощности и угла сдвига фаз между напряжением и током в цепи.

3.3.6. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 3.1.

3.3.7. Повторить опыт, изменив емкость конденсатора из магазина конденсаторов. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в ту же таблицу.

Внимание! Перед переключением электрических проводов необходимо отключить стенд от питающего напряжения соответствующим на нем тумблером.

Таблица 3.1 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено								
	U , В	I , мА	U_R , В	U_C , В	P , Вт	Q , вар	S , ВА	φ , град	f , Гц

3.3.8. На основании эксперимента произвести вычисления, результаты которых занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 — Расчетные данные

Номер отсчетов	Вычислено							
	x , Ом	R_1	z , Ом	φ , град	C_1 , мкФ	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА

3.3.9. Для исследования цепи переменного тока, состоящей из последовательно соединенных **резистора и катушки индуктивности**, необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 3.2. В соответствии с заданием, резистор R_1 следует выбрать из магазина сопротивлений, а катушку индуктивности необходимо взять с индуктивностью L_1 .

Представить схему для проверки преподавателю.

3.3.10. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение.

3.3.11. Включить электропитание стенда.

3.3.12. Установить на выходе встроенного в стенд источника переменного напряжения значения синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

3.3.13. Для измерения действующих значений напряжений на катушке индуктивности (U_K) и активном сопротивлении (U_R) можно использовать стрелочный вольтметр $PV1$. Кроме того, в целях измерения других значений электрических величин следует подключить универсальный измеритель мощности $РР1$. С помощью этого измерителя можно провести измерения: дей-

ствующих значений тока и напряжения; активной, реактивной и полной мощностей; частоты, коэффициента мощности и угла сдвига фаз между напряжением и током в цепи.

3.3.14. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 3.3.

3.3.15. Повторить опыт, поменяв катушку с индуктивностью $L1$ на катушку с индуктивностью $L2$. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в ту же таблицу.

Таблица 3.3 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено								
	U , В	I , мА	U_R , В	U_K , В	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	φ , град	f , Гц

3.3.16. На основании эксперимента произвести вычисления, результаты которых занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 — Расчетные данные

Номер отсчетов	Вычислено							
	x , Ом	R_1	z , Ом	φ , град	L_1 , мкФ	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА

Внимание! При проведении расчетов, значения активных сопротивлений катушек индуктивности $L1$ и $L2$ взять из предыдущей лабораторной работы.

3.3.17. Для исследования цепи переменного тока с **последовательно соединенными конденсатором и катушкой индуктивности**, необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 3.3. В соответствии с заданием, резистор $R1$ следует выбрать из магазина сопротивлений, катушку индуктивности необходимо взять с индуктивностью $L1$, а конденсатор $C1$ — из магазина конденсаторов.

Представить схему для проверки преподавателю.

3.3.18. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение.

3.3.19. Включить электропитание стенда.

3.3.20. Установить на выходе встроенного в стенд источника переменного напряжения значения синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

3.3.21. Для измерения действующих значений напряжений на элементах цепи следует использовать стрелочный вольтметр $PV1$. В целях измерения других значений электрических величин следует подключить универсальный измеритель мощности PPI . С помощью этого измерителя можно провести измерения: действующих значений тока и напряжения; активной, реактивной и полной мощностей; частоты, коэффициента мощности и угла сдвига

фаз между напряжением и током в цепи.

3.3.22. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 3.5.

3.3.23. Повторить опыт, поменяв катушку с индуктивностью $L1$ на катушку с индуктивностью $L2$. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в ту же таблицу.

Таблица 3.5 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено								
	U , В	I , мА	U_C , В	U_K , В	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	φ , град	f , Гц

3.3.24. На основании эксперимента произвести вычисления, результаты которых занести в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 — Расчетные данные

Номер отсчетов	Вычислено							
	x , Ом	z , Ом	φ , град	C_1 , мкФ	L_1 , мкФ	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА

3.3.25. Исследовать резонансные свойства последовательного контура.

Цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности, при определенных условиях может находиться в состоянии **резонанса напряжений**. Это возможно при равенстве реактивных сопротивлений обоих элементов. В идеальном случае общее реактивное сопротивление цепи и сдвиг фаз между напряжением и током будут равны нулю.

Для того, чтобы привести такую цепь в состояние, близкое к резонансу, необходимо так подобрать значение частоты источника напряжения или значение емкости конденсатора (индуктивности катушки), чтобы ток в цепи был максимальным, сдвиг фаз между напряжением и током минимальным, а напряжения на реактивных элементах близкими по значению.

С этой целью наиболее проще исследовать резонансные свойства последовательного контура путем изменения частоты входного напряжения.

Для проведения такого эксперимента необходимо повторить п. 3.3.17-3.3.19. Далее, изменяя частоту входного напряжения, добиться наименьшего угла сдвига фаз.

Данные измерений и расчетов занести в таблицы 3.7 и 3.8 соответственно.

Таблица 3.7 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено								
	U , В	I , мА	U_C , В	U_K , В	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	φ , град	f , Гц

3.3.26. На основании эксперимента произвести вычисления, результаты которых занести в таблицу 3.6.

Таблица 3.8 — Расчетные данные

Номер отсчетов	Вычислено							
	x , Ом	z , Ом	φ , град	C_1 , мкФ	L_1 , мкФ	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА

3.3.27. Выключить приборы.

3.3.28. Результаты измерений и вычислений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему лабораторной установки.

3.3.29. Построить векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей.

3.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- цель работы;
- список лабораторного оборудования;
- схема лабораторной установки с номинальными данными элементов лабораторной установки;
- экспериментальные и расчетные данные измерений;
- векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи;
- выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - влияние изменения емкости конденсатора (индуктивности катушки) на сдвиг фаз φ между током и напряжением, а также на реактивное x и полное сопротивление z исследуемой цепи;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

3.5 Основные теоретические положения

Установившийся режим цепи с последовательным соединением пассивных элементов (см. рисунок 3.4) описывается вторым законом Кирхгофа и законом Ома.

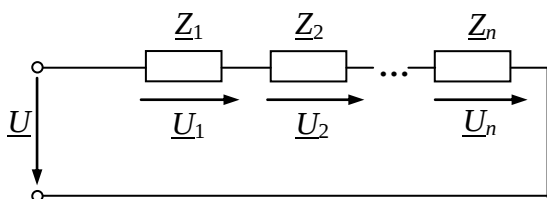


Рисунок 3.4 – Цепь с последовательным соединением пассивных элементов

Для данной цепи запись этих законов в символической форме примет вид [6]:

$$\underline{U} = \sum_n \underline{U}_n; \underline{U} = \underline{Z} \underline{I}; \underline{U}_n = \underline{Z}_n \underline{I},$$

где $\underline{U}$, $\underline{I}$ - напряжение и ток на входе цепи; $\underline{U}_n$ - напряжение n -го участка цепи; $\underline{Z}$ - входное сопротивление цепи; $\underline{Z}_n$ - сопротивление n -го участка

цепи.

Выражения входного сопротивления исследуемой цепи в алгебраической и показательной формах можно соответственно записать как

$$\underline{Z} = \sum_n \underline{Z}_n = \sum_n (R_n + jx_n) = \sum_n R_n + j \sum_n x_n; \underline{Z} = ze^{j\varphi},$$

где z — модуль входного сопротивления цепи, иначе, полное входное сопротивление; φ — аргумент входного сопротивления цепи, равный разности фаз входных напряжения и тока; R_n — активное сопротивление n -го участка; x_n — реактивное сопротивление n -го участка, равное разности индуктивного и емкостного сопротивлений данного участка, т.е.

$$x_n = x_{Ln} - x_{Cn} = \omega L_n - \frac{1}{\omega C_n}.$$

Связь между алгебраической и показательной формами входного сопротивления цепи определяется соотношениями:

$$\sum_n R_n = z \cos \varphi; \sum_n x_n = z \sin \varphi; z = \sqrt{\left(\sum_n R_n\right)^2 + \left(\sum_n x_n\right)^2}; \varphi = \arctg \frac{\sum_n x_n}{\sum_n R_n}.$$

Из уравнений последовательной цепи следуют соотношения для тока и напряжений участков цепи:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_n}$$

или в вещественной форме записи

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U_n}{z_n}.$$

Из полученных соотношений следует, что при заданном по величине и фазе входном напряжении режим цепи, т.е. величины и фазы тока, а также напряжений участков, определяется только параметрами пассивных элементов цепи и частотой источника.

Комплексная мощность цепи определяется выражением:

$$\underline{S} = \underline{U} I^* = S e^{j\varphi} = P + jQ,$$

где S , P и Q соответственно полная, активная и реактивная мощности цепи.

Таким образом,

$$S = UI; P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi; Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi,$$

а разность фаз входных напряжения и тока

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}.$$

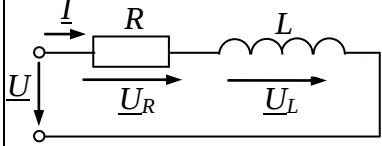
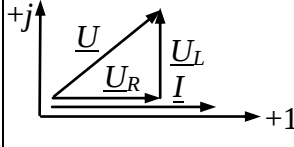
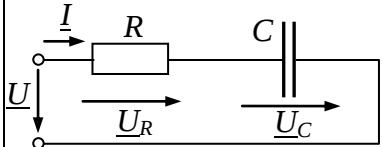
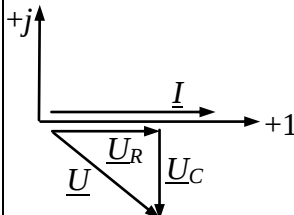
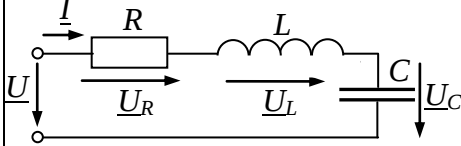
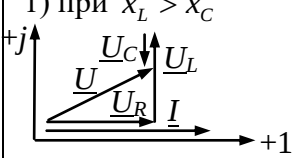
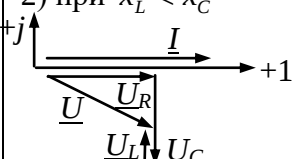
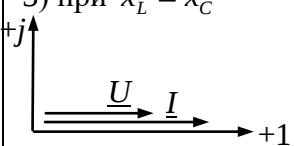
Связь полной, активной и реактивной мощностей выражается в виде:

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)},$$

где для последовательной цепи $P = I^2 \sum_n R_n$; $Q = I^2 \sum_n x_n$.

Для проверки правильности выполненных расчетов делают построение векторных диаграмм. Основные соотношения и векторные диаграммы для цепей с последовательным соединением элементов при токе в цепи $i = I_m \sin \omega t$, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 — Основные соотношения и векторные диаграммы для цепей с последовательным соединением элементов

Электрическая цепь	Мгновенное значение напряжения	Закон Ома для цепи	Векторная диаграмма
	$u = I_m Z \sin(\omega t + \varphi);$ $Z = \sqrt{R^2 + x_L^2};$ $\varphi = \arctg \frac{x_L}{R}.$	$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R + jx_L}.$	
	$u = I_m Z \sin(\omega t - \varphi);$ $Z = \sqrt{R^2 + x_C^2};$ $\varphi = \arctg \frac{x_C}{R}.$	$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R - jx_C}.$	
	$u = I_m Z \sin(\omega t \pm \varphi);$ $Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2};$ $\varphi = \arctg \frac{x_L - x_C}{R}.$	$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}},$ где $\underline{Z} = R + jx,$ $x = x_L - x_C.$	1) при $x_L > x_C$  2) при $x_L < x_C$  3) при $x_L = x_C$ 

При изменении параметров L , C или частоты ω в цепи, содержащей последовательное соединение R , L , C , можно добиться равенства реактивных сопротивлений индуктивности и конденсатора, т.е. $x_L = x_C$.

В результате в цепи наступает явление, называемое **резонансом напряжений**, и тогда $U_L = U_C$, $U_R = U$, $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$), ток $I = U/R$ имеет максимальное значение.

Из условия $\omega L = 1/\omega C$ следует, что резонанс достигается изменением частоты напряжения питания или параметров цепи. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой

$$\omega_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}.$$

Индуктивное и ёмкостное сопротивления при резонансе принимают значения

$$\omega_0 L = 1/\omega_0 C = \rho,$$

где ρ — характеристическое сопротивление контура.

При резонансе данная цепь обладает избирательными свойствами. Отно-

шение напряжений на индуктивном или ёмкостном элементе к напряжению питания при резонансе называется **добротностью** контура или коэффициентом резонанса

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho}{R} = Q.$$

Добротность показывает во сколько раз напряжение на индуктивном или ёмкостном элементе превышает напряжение на входе схемы при резонансе. Резонансные свойства цепей оценивают их частотными характеристиками и, кроме того, зависимостями напряжений и токов, а также разности их фаз в функции какого-либо характерного параметра (частоты, емкости или индуктивности), изменением, которого данная цепь может быть настроена в резонанс. Графические изображения этих зависимостей называют резонансными кривыми.

На рисунке 3.5 приведены резонансные кривые последовательного контура [4]. Вследствие того, что катушка индуктивности обладает активным сопротивлением, при резонансе напряжение на катушке индуктивности будет несколько больше напряжения на конденсаторе.

Изменение реактивного сопротивления приводит к изменению режима работы цепи. При изменении значения емкости C к нулю, значение полного сопротивления будет стремиться к бесконечности. В результате значение тока I в цепи и напряжение на индуктивности будут стремиться к нулю, а напряжение на конденсаторе — к значению напряжения U на входе цепи. Сдвиг фаз φ будет стремиться к значению $-\frac{\pi}{2}$.

При значении $C=C_0$ (режим резонанса) значение полного сопротивления цепи будет равным активному и ток в цепи будет принимать максимальное значение $I=U/R$.

Сдвиг фаз φ между током и напряжением будет равным нулю. При значении емкости C , стремящейся к бесконечности, сдвиг фаз φ между током и напряжением бу-

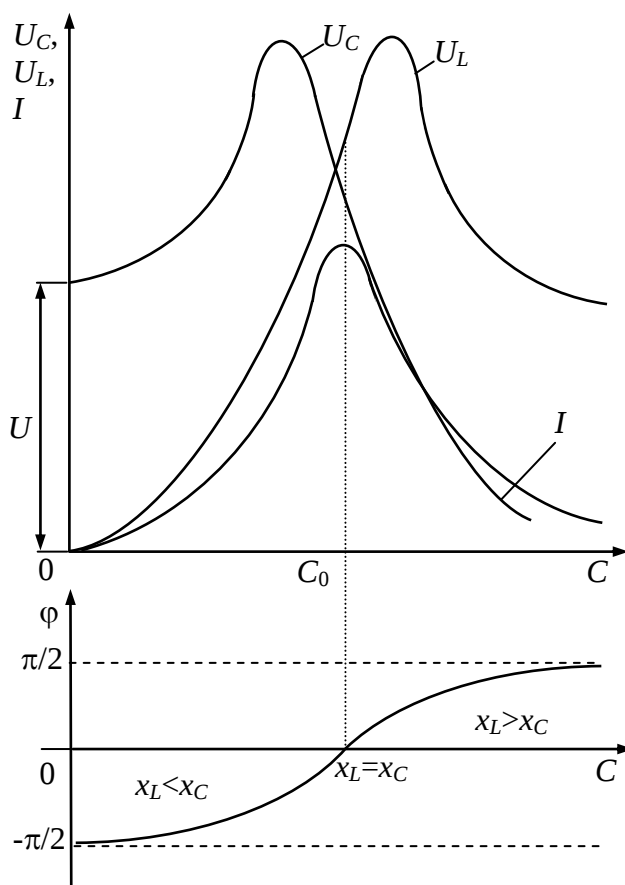


Рисунок 3.5 — Резонансные кривые последовательного контура

дет стремиться к нулю, а напряжение на конденсаторе — к значению $\frac{\pi}{2}$.

В технике связи и радиотехнике резонансный режим RLC -контура является нормальным, а в электротехнических устройствах этот режим может стать нежелательным, ввиду возникновения значительных перенапряжений.

3.7 Контрольные вопросы

1. Какой порядок действий при выполнении работы?
2. Какие приборы используются для проведения измерений?
3. При каких условиях наступает резонанс напряжений?
4. Как определяется ток в рассматриваемой электрической цепи?
5. Чему равняется комплексное сопротивление исследуемой цепи?
6. Как определяется полное сопротивление исследуемой цепи?
7. Как влияют параметры R , L и C на ток в исследуемой цепи?
8. Что такое характеристическое сопротивление контура?
9. По каким признакам судят о настройке RLC -контура в резонанс?
10. Какие параметры RLC -контура влияют на его добротность?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Время: 2 часа

4.1 Цель работы

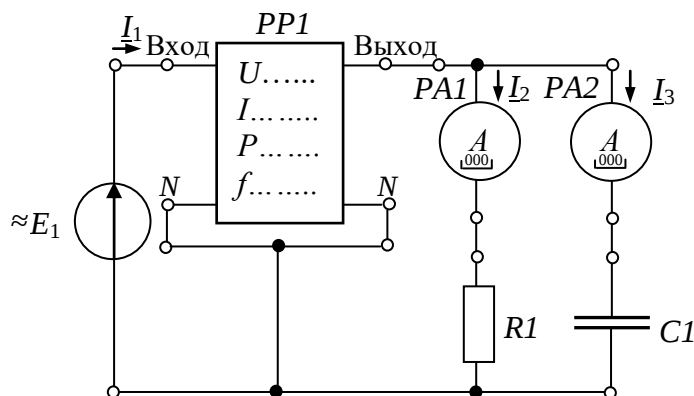
4.1.1. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением: резистора и конденсатора, а также конденсатора и катушки индуктивности.

4.1.2. Исследование резонансных свойств параллельного LC - контура.

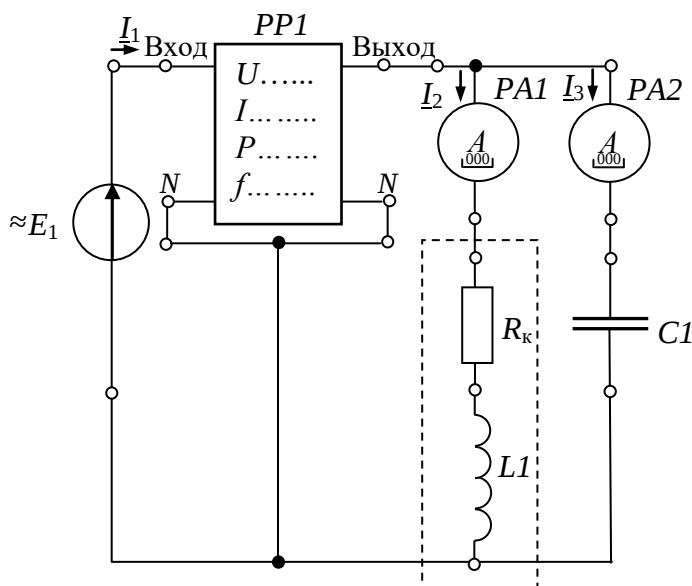
4.1.3. Исследование влияния емкости конденсатора на коэффициент мощности в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

4.2 Схема лабораторной установки

На рисунке 4.1 изображена схема лабораторной установки с параллельным соединением резистора и конденсатора, а на рисунке 4.2 — с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора.



**Рисунок 4.1 — Схема лабораторной установки
с параллельным соединением резистора и конденсатора**



**Рисунок 4.2 — Схема лабораторной установки
с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора**

Для проведения экспериментов лабораторный стенд содержит [2]: источник переменного напряжения E_1 , измерительные приборы, катушки индуктивности $L1$ и $L2$, батарея из 4-х конденсаторов $C1–C4$ и набор из 4-х сопротивлений $R1–R4$.

Индуктивности катушек индуктивности составляют: $L1=40$ мГн, $L2=80$ мГн.

Батарея из конденсаторов включает конденсаторы с емкостями: $C1=4,7$ мкФ, $C2=6,7$ мкФ, $C3=10$ мкФ, $C4=22$ мкФ,

Нерегулируемые активные сопротивления имеют следующие номинальные значения: $R1=22$ Ом, $R2=47$ Ом, $R3=82$ Ом, $R4=120$ Ом.

Подключение элементов стенда осуществляется с помощью электрических проводов. В схеме стенда имеется встроенный источник переменного напряжения с регулируемым переменным напряжением от $0...10$ В и частотой синусоидального напряжения в пределах $40...400$ Гц. Для фиксирования необходимых физических величин, характеризующих режим работы цепи, в составе стенда имеются измерительные приборы [2]:

- стрелочный вольтметр $PV1$ типа Ц42300 с пределом измерения 15 В;
- цифровые амперметры $PA1$ и $PA2$, измеряющие действующие значения переменного тока в диапазоне $0...300$ мА;
- цифровой универсальный измеритель мощности PPI , измеряющий значения электрических параметров:
 - действующее значение тока в диапазоне $0...0,3$ А;
 - действующее значение напряжения в диапазоне $0...30$ В;
 - активной мощности в диапазоне $0...9$ Вт;
 - реактивной мощности в диапазоне $0...9$ ВАр;
 - полной мощности в диапазоне $0...9$ ВА;
 - частоты в диапазоне $5...400$ Гц;
 - коэффициента мощности ($\cos\varphi$);
 - угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи (φ).

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1. Для исследования цепи переменного тока, состоящей из параллельно соединенных **резистора и конденсатора**, необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 4.1. В соответствии с заданием, резистор $R1$ следует выбрать из магазина сопротивлений, а конденсатор $C1$ — из магазина конденсаторов.

Представить схему для проверки преподавателю.

4.3.2. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение.

4.3.3. Включить электропитание стенда.

4.3.4. Установить на выходе встроенного в стенд источника переменного напряжения значения синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

4.3.5. Для измерения действующего значения напряжения на входе схемы следует использовать стрелочный вольтметр $PV1$. Кроме того, в целях измерения других значений электрических величин следует подключить универсальный измеритель мощности PPI . С помощью этого измерителя мож-

но провести измерения: действующих значений тока и напряжения; активной, реактивной и полной мощностей; частоты, коэффициента мощности и угла сдвига фаз между напряжением и током в цепи.

Для измерения тока в неразветвленной части цепи I_1 можно использовать универсальный измеритель мощности PPI , а для измерений значений токов I_2 и I_3 — цифровые амперметры $PA1$ и $PA2$

4.3.6. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 4.1.

4.3.7. Повторить опыт, изменив емкость конденсатора $C1$ из магазина конденсаторов. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в ту же таблицу.

Внимание! Перед переключением электрических проводов необходимо отключить стенд от питающего напряжения соответствующим на нем тумблером.

Таблица 4.1 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено								
	U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	φ , град	f , Гц

4.3.8. На основании эксперимента произвести вычисления, результаты которых занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 — Расчетные данные

Номер отсчетов	Вычислено						
	g , См	b , См	y , См	φ , град	b_C , См	R_1 , Ом	C_1 , мкФ

4.3.9. Выключить стенд.

4.3.10. Для исследования цепи переменного тока, состоящей из **параллельно соединенных конденсатора и катушки индуктивности**, необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 4.2. В соответствии с заданием, выбираем катушку индуктивности $L1$, а конденсатор $C1$ — из магазина конденсаторов.

Представить схему для проверки преподавателю.

Внимание! Перед переключением электрических проводов необходимо отключить стенд от питающего напряжения соответствующим на нем тумблером.

4.3.11. Ручку регулятора входного напряжения установить в крайнее левое положение.

4.3.12. Включить электропитание стенда.

4.3.13. Установить на выходе встроенного в стенд источника переменного напряжения значения синусоидального напряжения с заданной амплитудой и частотой.

4.3.14. На первом этапе проведем исследование условия возникновения

резонанса токов в этой цепи.

Для того, чтобы исследуемая цепь находилась в состоянии резонанса необходимо, чтобы значения реактивных проводимостей соседних ветвей были одинаковы (или близкими). В этом случае индикатором резонанса в цепи будут показания приборов. Амперметр в неразветвленной части цепи будет показывать минимальное значение, а показания амперметров $PA1$ и $PA2$ — близкие значения (в качестве рекомендации в стенде следует иметь значительную емкость конденсатора и индуктивность катушки, так как частота выходного напряжения источника входного напряжения имеет ограниченное значение). При этом следует учесть, что при параллельном соединении конденсаторов результирующая емкость увеличивается. Последовательное включение индуктивностей также увеличивает суммарную индуктивность, однако при подключении следует начало следующей катушки индуктивности подключить к концу предыдущей катушки (при одинаковой намотке катушек).

4.3.15. Для того, чтобы привести цепь в состояние, близкое к резонансу, необходимо так подобрать значение частоты источника напряжения или значение емкости конденсатора (индуктивности катушки), чтобы ток в цепи был минимальным, сдвиг фаз между напряжением и током был минимальным, а значения токов, фиксируемых амперметрами $PA1$ и $PA2$ были близкими по значению.

4.3.16. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено								
	U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	P , Вт	Q , ВАр	S , ВА	φ , град	f , Гц

4.3.17. На основании эксперимента произвести вычисления, результаты которых занести в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 — Расчетные данные

Номер отсчетов	Вычислено								
	g , См	b , См	y , См	φ , град	b_L , См	b_C , См	R_k , Ом	L_1 , мГн	C_1 , мкФ

4.3.18. Выключить стенд.

4.3.19. **На втором этапе** следует провести исследование влияние емкости конденсатора, включенного параллельно катушки индуктивности, на коэффициент мощности цепи $\cos \varphi$ и величину тока I , потребляемого от источника питания.

Для этого необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 4.2, повторить п. 4.3.10.- 4.3.13.

4.3.20. Далее следует, фиксировать показания приборов, поочередно меняя конденсаторы $C1$ — $C4$ из магазина конденсаторов в схеме стенда.

4.3.21. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Измерено								Вычислено
	U , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	P , Вт	Q , ВАр	φ , град	$\cos\varphi$	$\cos\varphi$

4.3.21. Выключить стенд.

4.3.22. Произвести вычисления параметров цепи.

4.3.23. Результаты измерений и вычислений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему лабораторной установки.

4.3.24. Построить векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей.

4.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- а) цель работы;
- б) список оборудования стенда;
- в) схемы установок с данными элементов;
- г) заполненные таблицы 4.1— 4.5 с экспериментальными и расчетными данными;
- д) векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей;
- е) выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - влияние значений элементов цепи с их параллельным соединением на активную, реактивную и полную мощности в цепи;
 - влияние изменения параметров цепи на сдвиг фаз φ между током и напряжением в цепи;
 - влияние параметров элементов цепи на резонансные свойства параллельного LC - контура.
 - влияния емкости конденсатора на коэффициент мощности в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

4.5 Основные теоретические положения

Установившийся режим электрической цепи с параллельным соединением пассивных элементов (см. рисунок 4.3) описывается первым законом Кирхгофа и законом Ома.

Для данной цепи форма записи этих законов в символической форме примет вид [7]:

$$\underline{I} = \sum_n \underline{I}_n; \underline{I} = \underline{Y}\underline{U}; \underline{I}_n = \underline{Y}_n \underline{U},$$

где $\underline{U}$, $\underline{I}$ — напряжение и ток на входе цепи; $\underline{Y}$ — входная проводимость цепи; $\underline{I}_n$ — ток n -й ветви цепи; $\underline{Y}_n$ — проводимость n -й ветви цепи.

Выражение входной проводимости исследуемой цепи в алгебраической и показательной форме записи можно записать соответственно как [7]:

$$\underline{Y} = \sum_n \underline{Y}_n = \sum_n (g_n - jb_n) = \sum_n g_n + j \sum_n b_n; \underline{Y} = ye^{-j\varphi},$$

где y — модуль входной проводимости цепи, иначе, полная входная проводимость; φ — аргумент входной проводимости цепи, равный разности фаз входных напряжения и тока; g_n — активная проводимость n -й ветви; b_n — реактивная проводимость n -й ветви, например равная разности индуктивной и емкостной проводимостей данной ветви [8]:

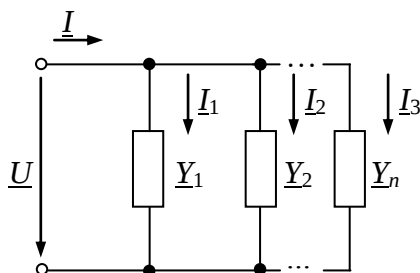


Рисунок 4.3 — Электрическая цепь с параллельным соединением пассивных элементов

$$b_n = b_{Ln} - b_{Cn} = \frac{1}{\omega L_n} - \omega C_n.$$

Связь между алгебраической и показательной формами входной проводимости цепи, определяется соотношениями:

$$\sum_n g_n = y \cos \varphi; \sum_n b_n = y \sin \varphi;$$

$$y = \sqrt{\left(\sum_n g_n \right)^2 + \left(\sum_n b_n \right)^2}; \varphi = \arctg \frac{\sum_n b_n}{\sum_n g_n}.$$

Из уравнений для данной цепи следуют соотношения, устанавливающие связь между токами ветвей и напряжением на входе цепи:

$$\underline{U} = \frac{\underline{I}}{\underline{Y}} = \frac{\underline{I}_n}{\underline{Y}_n}.$$

Из полученных соотношений следует, что при заданном по величине и фазе входном напряжении цепи, величины и фазы токов ветвей можно определить параметры пассивных элементов цепи.

Комплексная полная мощность $\underline{S}$ цепи с параллельным соединением элементов определяется выражением [8]:

$$\underline{S} = \sum_n \underline{U} \underline{I}_n^*,$$

где $\underline{I}_n^*$ — значение сопряженного тока в n -й цепи.

Активная и реактивная мощности исследуемой цепи рассчитываются соответственно по следующим выражениям:

$$P = U^2 \sum_n g_n; Q = U^2 \sum_n b_n,$$

а разность фаз входных напряжения и тока по выражению

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}.$$

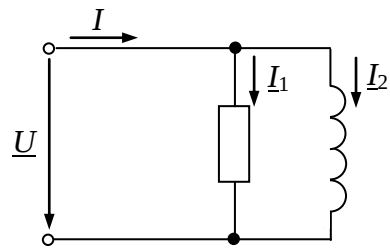
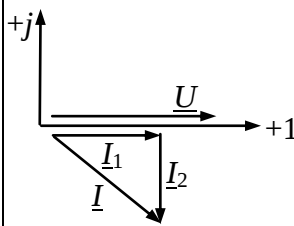
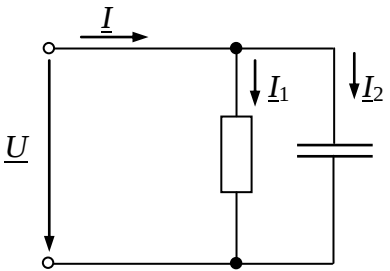
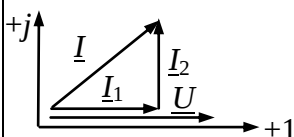
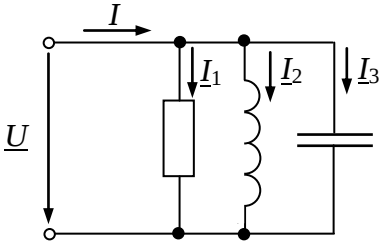
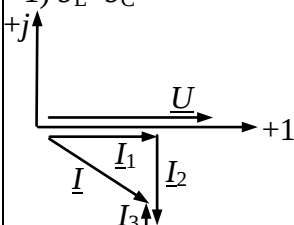
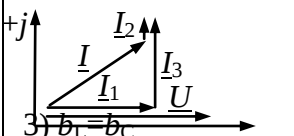
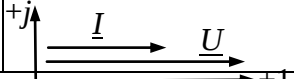
Основные соотношения и векторные диаграммы для цепей с параллельным соединением элементов R , L , C , при напряжении, подаваемом на вход цепи $u = U_m \sin \omega t$, приведены в таблице 4.6.

В цепи, содержащей параллельно соединенные катушку индуктивности и конденсатора, в зависимости от соотношения величин реактивных проводимостей возможны 3 случая: 1) $b_L > b_C$, 2) $b_L < b_C$, 3) $b_L = b_C$.

При третьем случае вследствие того, что значения токов в цепях, содер-

жащих реактивные элементы совпадают, ток в неразветвленной части цепи будет совпадать с приложенным напряжением к цепи по фазе ($\varphi=0$) и в цепи будет иметь место **резонанс токов**. Реактивная составляющая тока в неразветвленной части цепи и реактивная проводимость цепи будет равна нулю, а ток при резонансе в неразветвленной части цепи будет принимать минимальное значение.

Таблица 4.6 — Основные соотношения и векторные диаграммы для цепей с параллельным соединением элементов R, L, C

Электрическая цепь	Расчетные соотношения	Векторная диаграмма
	$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = g \cdot \underline{U} - jb_L \cdot \underline{U} = (g - jb_L) \cdot \underline{U} = \underline{Y} \cdot \underline{U} = I \cdot e^{j\varphi}, \text{ где } I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2},$ $\underline{Y} = g - jb_L = \frac{1}{R} - j \frac{1}{\omega L} = y \cdot e^{-j\varphi},$ $\varphi = -\arctg \frac{b_C}{g} = -\arctg \omega CR.$	
	$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = g \cdot \underline{U} + jb_C \cdot \underline{U} = (g + jb_C) \cdot \underline{U} = \underline{Y} \cdot \underline{U} = I \cdot e^{j\varphi}, \text{ где } I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2},$ $\underline{Y} = g + jb_C = \frac{1}{R} + j \frac{1}{\omega L} = y \cdot e^{-j\varphi},$ $\varphi = \arctg \frac{b_L}{g} = \arctg \frac{R}{\omega L}.$	
	$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = g \cdot \underline{U} - jb \cdot \underline{U} = y \cdot e^{-j\varphi},$ где $b = (b_L - b_C)$, $y = \sqrt{g^2 + b^2}$, $\varphi = \arctg \frac{b}{g}.$	1) $b_L > b_C$  2) $b_L < b_C$  3) $b_L = b_C$ 

4.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какой порядок действий при выполнении работы?
3. Какие элементы включает лабораторная установка?
4. Как определяются токи в рассматриваемой электрической цепи?

5. Чему равна комплексная проводимость исследуемой цепи?
6. Что такое реактивная проводимость цепи?
7. Что называется резонансом токов?
8. В каких случаях цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора носит индуктивный, емкостный и активный характеры?
9. Какое значение принимает ток в неразветвленной части цепи при резонансе?
10. Где на практике используются режим резонанса и резонансные свойства параллельного контура?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ “ЗВЕЗДА”

Время: 2 часа

5.1 Цель работы

5.1.1. Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении потребителей по схеме “Звезда”.

5.1.2. Экспериментальная проверка основных соотношений трехфазных систем при соединении потребителя по схеме “Звезда” при симметричной и несимметричной нагрузке фаз.

5.1.3. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

5.2 Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 5.1.

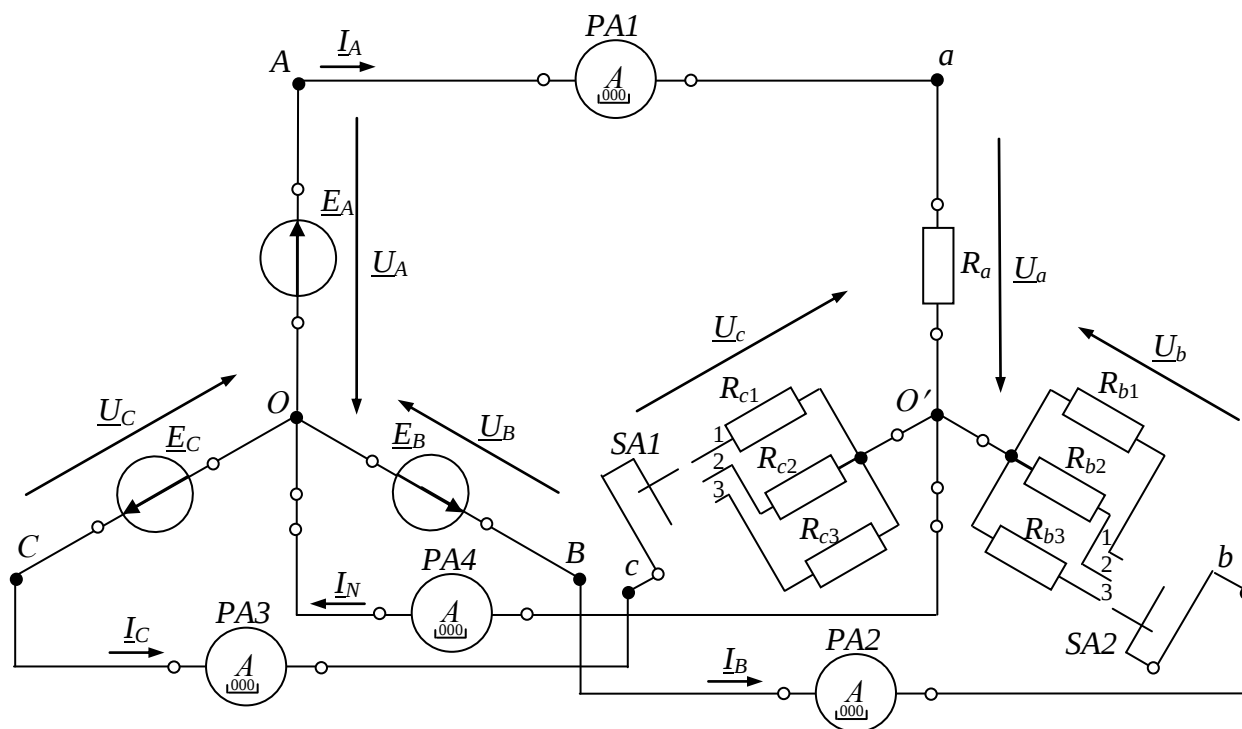


Рисунок 5.1 — Схема лабораторной установки по исследованию режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – звезда”

Схема лабораторной установки содержит [3]:

- источник электропитания;
- элементы электрических цепей;
- измерительные приборы.

Источник электропитания вырабатывает трехфазное переменное напряжение с действующим значением 9 В и частотой 50 Гц.

В качестве элементов электрических цепей используется трехфазная на-

грузка, соединенная по схеме “Звезда” с нейтралью и состоящая из резистора с нерегулируемым сопротивлением в фазе *A* ($R_a=50$ Ом), а также двух резисторов с регулируемым сопротивлением в фазах *B* ($R_b=50$ Ом, 200 Ом, 100 Ом) и *C* ($R_c=50$ Ом, 300 Ом, 150 Ом).

Регулирование сопротивлений резисторов осуществляется ступенчато с помощью переключателей SA1 и SA2 в фазах *C* и *B* соответственно.

В стенде для имитации сопротивления линии передачи имеют место три нерегулируемых резистора $R1—R3$ с сопротивлением 10 Ом. Однако в работе они не используются, поэтому на схеме не показаны.

Для измерения токов в фазах и нейтральном проводе применяются цифровые амперметры PA1—PA4, а для измерения линейного и фазного переменных напряжений — стрелочный вольтметр PV1 типа Ц42300 с пределом измерения 15 В.

При наличии трех фаз этот прибор подключаются к соответствующим точкам схемы установки. Для измерения линейного напряжения U_{AB} вольтметр PV1 подключается между линейными проводами, соответствующими фазам *A* и *B*. По аналогии для измерения линейного напряжения U_{BC} вольтметр PV1 подключается между линейными проводами, соответствующими фазам *B* и *C*, а для измерения линейного напряжения U_{CA} — между линейными проводами, соответствующими фазам *C* и *A*.

В свою очередь, для измерения фазного напряжения U_a на нагрузке потребителя фазы *a*, вольтметр PV1 подключается между точками **0-a**, для измерения фазного напряжения U_b на нагрузке потребителя фазы *b* — между точками **0-b** и для измерения фазного напряжения на нагрузке U_c потребителя фазы *c* — между точками **0-c**.

Подключение элементов стенда осуществляется с помощью электрических проводов.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1. Собрать, согласно рисунка 5.1, схему лабораторной установки.

5.3.2. Предъявить для проверки собранную лабораторную установку преподавателю (лаборанту) и получить от него разрешение на включение схемы под напряжение.

5.3.3. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 5.1 при **5-ти режимах работы трехфазной цепи**.

Таблица 5.1— Экспериментальные и расчетные данные

Режим	Измерено										Вычислено			
	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$U_a,$ В	$U_b,$ В	$U_c,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_N,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$P,$ Вт
1														
2														
3														
4														
5														

Режим 1 — режим работы трехфазной цепи при симметричной нагрузке с нулевым проводом. Переключатели *SA1* и *SA2* должны быть поставлены в положение 1

Далее следует включить питание стенда с помощью соответствующего тумблера на нем и провести измерения параметров цепи, указанных в таблице 5.1. Данные измерений зафиксировать и занести в таблицу.

Режим 2 — режим работы трехфазной цепи при симметричной нагрузке без нулевого провода.

Для выполнения техники безопасности выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

Положение переключателей *SA1* и *SA2* оставляем без изменения.

С целью исключения нулевого провода необходимо отключить амперметр *РА4*, включенный в нейтральный провод.

Далее следует подать напряжение на стенд, провести измерения и их данные занести в таблицу 5.1.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

Режим 3 — режим работы трехфазной цепи при симметричной нагрузке в случае обрыва одной из фаз.

Для исследования этого режима подключить амперметр *РА4* обратно в схему установки.

Положение переключателей *SA1* и *SA2* оставляем без изменения.

Так как у нас лабораторный стенд, а не электрическая сеть, то этот режим моделируем отключением линейного провода. Для имитации обрыва какой-то из фаз по указанию преподавателя исключаем из схемы стенда амперметр *РА1*, *РА2* или *РА3*.

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде провести измерения и их данные занести в таблицу 5.1.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

Режим 4 — режим работы трехфазной цепи при несимметричной нагрузке с нулевым проводом.

По указанию преподавателя смоделировать режим несимметричной нагрузки.

Для исследования этого режима переключатели *SA1* и *SA2* должны быть поставлены в положение, **отличное от положения 1.**

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде провести измерения и их данные занести в таблицу 5.1.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

Режим 5 — режим работы трехфазной цепи при несимметричной нагрузке без нулевого провода.

Положение переключателей, выставленное в предыдущем опыте, оставить без изменения.

С целью исключения нулевого провода необходимо отключить амперметр РА4.

В этом режиме, который будет аварийным для трехфазной нагрузки, наступит так называемый “Перекас фаз”. Напряжения на фазах будут отличаться от номинальных.

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде провести измерения и их данные занести в таблицу 5.1.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего тумблера на стенде.

5.3.4. Произвести вычисления мощностей фаз и потребителя в целом. Результаты вычислений занести в таблицу 5.1.

5.3.5. Результаты измерений и вычислений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему лабораторной установки.

5.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- а) цель работы;
- б) список лабораторного оборудования;
- в) схема лабораторной установки с номинальными данными элементов лабораторной установки;
- г) экспериментальные данные измерений (таблица 5.1);
- д) расчеты мощностей фаз и потребителя в целом;
- е) векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследуемых режимов работы трехфазной цепи;
- ж) выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - анализ полученных экспериментальных данных;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

5.5 Основные теоретические положения

В настоящее время в энергетике получили широкое применение трехфазные электрические цепи. Среди основных преимуществ, свойственных этим цепям, следует отметить следующие [7]:

- экономичность передачи энергии, по сравнению с однофазными цепями;
- возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для работы трехфазного асинхронного двигателя;
- возможность получения в одной установке двух напряжений: фазного и линейного.

5.5.1 Электрическая цепь, соединенная по схеме “Звезда” при симметричном режиме

При соединении трехфазного потребителя по схеме “Звезда” одни концы его фаз соединены в общую точку, называемую нейтральной или нулевой, другие концы фаз соединяются проводами с сетью (источником питания).

На рисунке 5.2 изображена схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – звезда” с нулевым проводом.

Провод, соединяющий нулевые точки потребителя и сети, называется нулевым. Остальные провода, соединяющие потребитель с сетью, называются линейными. Трехфазная цепь при наличии нулевого провода называется четырехпроводной, а без нулевого провода — трехпроводной.

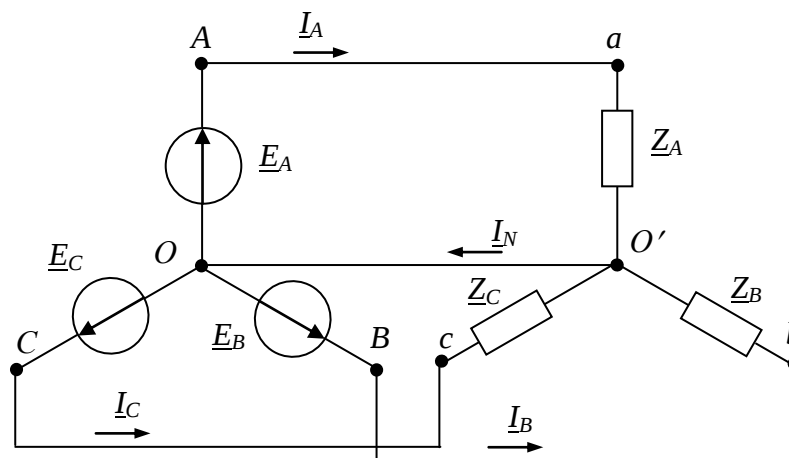


Рисунок 5.2 — Схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – звезда” с нулевым проводом

Напряжения между линейными проводами и токи в них называются линейными. Электрические величины, относящиеся к отдельным фазам, называются фазными.

Трехфазную цепь и трехфазный потребитель называют симметричными, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы [9], т.е.

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C.$$

В противном случае их называют **несимметричными**.

Режим трехфазной цепи, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны, называют симметричным. Если к симметричной трехфазной системе приложена симметричная система напряжений, то получается симметричная система токов. При симметричной системе токов в нейтральном проводе ток отсутствует [2]:

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

поэтому, если известно, что приемник является симметричным, нейтральный провод можно не применять.

Линейные напряжения определяются как разности фазных напряжений [10]:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Напряжения на фазах нагрузки можно найти по выражениям:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{AO'} = \underline{U}_A = \underline{E}_A; \underline{U}_b = \underline{U}_{BO'} = \underline{U}_B = \underline{E}_B; \underline{U}_c = \underline{U}_{CO'} = \underline{U}_C = \underline{E}_C.$$

На рисунке 5.3 изображена векторная диаграмма токов и напряжений для случая симметричной нагрузки, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$) и соединенной по схеме “Звезда”. В случае, если пренебречь внутренними сопротивлениями фаз генератора, фазные напряжения $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ будут численно равны фазным ЭДС и их значения можно представить в виде [10]:

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A; \underline{U}_B = \underline{E}_B; \underline{U}_C = \underline{E}_C.$$

$$\underline{I}_A = \underline{E}_A / \underline{Z}_A; \underline{I}_B = \underline{E}_B / \underline{Z}_B; \underline{I}_C = \underline{E}_C / \underline{Z}_C.$$

5.5.2 Трехфазные цепи, соединенные по схемам “Звезда – звезда” с нулевым и без нулевого провода при несимметричном режиме

$$\underline{U}_{O'O} = \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C)}{(\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C)},$$

В случае **несимметричной** нагрузки, при соединении источника с приемником по схеме **“Звезда – звезда” без нулевого провода** напряжение $U_{00} \neq 0$.

42

В результате такого “Перекоса фаз” фазные напряжения потребителя по модулю не равны друг другу и сдвиг по фазе между ними не равен 120° , т.е. они образуют несимметричную систему.

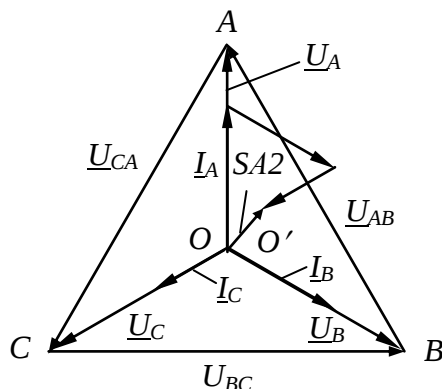


Рисунок 5.5 — Векторная диаграмма токов и напряжений для схемы “Звезда – звезда” с нулевым проводом при несимметричной активной нагрузке

Изменение комплексного сопротивления любой фазы потребителя вызывает изменение напряжения $\underline{U}_{OO'}$, фазных напряжений и токов других фаз потребителя. При известных значениях напряжений $\underline{U}_{OO'}$, $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ можно построить векторную диаграмму напряжений.

Напряжения на фазах приемника можно найти по выражениям:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{OO'}; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{OO'}; \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{OO'}.$$

При известных напряжениях на фазах приемника, токи в фазах приемника определяются по формулам:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_a \underline{Y}_A; \underline{I}_B = \underline{U}_b \underline{Y}_B; \underline{I}_C = \underline{U}_c \underline{Y}_C.$$

В случае **несимметричной** нагрузки, при соединении источника с приемником по схеме звезда-звезда с нулевым проводом, напряжение $\underline{U}_{OO'}=0$.

Нулевой провод обеспечивает независимый режим работы фаз потребителя [6]. Фазные токи образуют несимметричную систему, так как они разные по величине

$$\underline{I}_A = \underline{U}_a \underline{Y}_A; \underline{I}_B = \underline{U}_b \underline{Y}_B; \underline{I}_C = \underline{U}_c \underline{Y}_C.$$

Ток в нулевом проводе равен сумме комплексных действующих значений фазных токов:

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

5.5.3 Трехфазная цепь, соединенная по схеме “Звезда – звезда” без нулевого провода при несимметричном режиме и обрыве фазы или линейного провода

При работе трехфазных потребителей возможны аварийные режимы работы, например, обрыв фазы потребителя (обрыв линейного провода). При обрыве фазы или линейного провода для схемы “Звезда – звезда” **без нулевого провода**, например в фазе **A**, трехфазный симметричный **активный** потребитель превращается в однофазный. В результате сопротивления двух оставшихся фаз оказываются включенными последовательно на линейное напряжение [11].

На рисунке 5.6,а приведена векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 5.6,б — векторная диаграмма токов для схемы “Звезда – звезда” без нулевого провода при обрыве линейного провода от фазы *A* нагрузки.

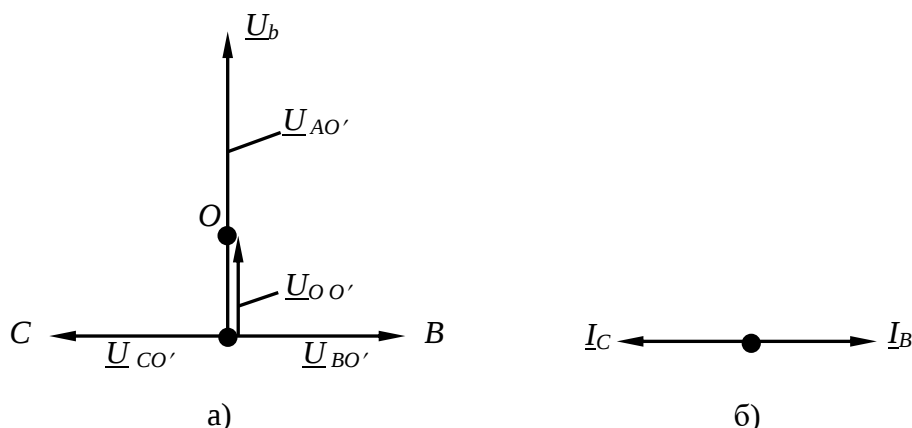


Рисунок 5.6 — Векторные диаграммы для схемы “Звезда – звезда” без нулевого провода при обрыве линейного провода от фазы *A* нагрузки:
а) — напряжений; б) — токов

Векторные диаграммы, приведенные на последних рисунках, соответствуют случаю **активной** нагрузки. При $Z_A = \infty$ получим токи в фазах нагрузки $I_A = 0$ и $I_B = -I_C$. Поэтому $\underline{U}_{BO'}/\underline{U}_{CO'} = Z_B I_B / Z_C I_C$.

В случае однородного характера нагрузки, т.е. $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$, отношение фазных напряжений будет равно $\underline{U}_{BO'}/\underline{U}_{CO'} = -z_B/z_C$, что означает отличие по фазе напряжений $\underline{U}_{BO'}$ и $\underline{U}_{CO'}$ на 180° и, следовательно, точка *O'* находится на отрезке, соединяющем точки *B* и *C* [11]. Ее положение на этом отрезке определяется отношением z_B/z_C (на рисунке 5.6 положение точки *O'* при $Z_A = \infty$ показано для случая $z_B/z_C = 1$).

Фазные напряжения потребителя по модулю примут значения

$$U_{BO'} = U_{CO'} = \frac{U_{\text{л}}}{2},$$

где $U_{\text{л}}$ — линейное напряжение между фазами *B* и *C*. Напряжение на фазе *A* будет отсутствовать, т.е. $U_a = 0$. Вольтметр, включенный между разомкнутыми концами фазы *A*, покажет напряжение, соответствующее значению $U_{AO'} = \left(\frac{3}{2}\right)U_A$, а между нейтральными точками — $U_{OO'} = \frac{U_A}{2}$ [7].

5.5.4 Расчет активной, реактивной и полной мощности трехфазного потребителя

Под **активной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму активных мощностей фаз нагрузки [10]:

$$P = P_A + P_B + P_C,$$

где P_A , P_B и P_C являются активными мощностями фаз нагрузки.

Для **трехфазной системы** активные мощности фаз нагрузки, соединенной по схеме **звезда – звезда** определяются по следующим выражениям [5, 7]:

$$P_A = U_a I_A \cos \varphi_A; P_B = U_b I_B \cos \varphi_B; P_C = U_c I_C \cos \varphi_C,$$

где U_a , U_b и U_c напряжения на фазах; I_a , I_b и I_c токи в фазах, а φ_A ; φ_B и φ_C углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок **A**, **B** и **C** соответственно.

Под **реактивной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму реактивных мощностей фаз нагрузки [11]:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C,$$

где Q_A , Q_B и Q_C являются реактивными мощностями фаз нагрузки. Для **трехфазной системы**, соединенной по схеме “**Звезда – звезда**” реактивные мощности фаз нагрузки определяются по следующим выражениям [5, 7]:

$$Q_A = U_a I_A \sin \varphi_A; Q_B = U_b I_B \sin \varphi_B; Q_C = U_c I_C \sin \varphi_C.$$

Полная мощность трехфазного потребителя определится следующим образом [3]:

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

Если нагрузка **симметричная**, то

$$P_A = P_B = P_C = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; Q_A = Q_B = Q_C = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi,$$

где φ_ϕ -сдвиг по фазе между фазным напряжением U_ϕ и фазным током I_ϕ . В результате при **симметричной** нагрузке фаз [5]:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; S = 3U_\phi I_\phi.$$

Независимо от способа соединения нагрузки в звезду или в треугольник при **симметричной** нагрузке фаз [4]:

$$3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}\sqrt{3}U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_{л} I_{л},$$

где $U_{л}$ — линейное напряжение на нагрузке; $I_{л}$ — линейный ток нагрузки, поэтому часто еще используют следующие формулы [6]:

$$P = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \cos \varphi_\phi; Q = \sqrt{3}U_{л} I_{л} \sin \varphi_\phi; S = \sqrt{3}U_{л} I_{л}.$$

5.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какой порядок действий при выполнении работы?
3. Какие элементы включает лабораторная установка?
4. Какова функция нулевого провода в трехфазной системе при соединении приемника по схеме “Звезда”?
5. Какие соотношения имеют место между линейными и фазными величинами в трехфазных системах при соединении приемника по схеме “Звезда” при симметричной нагрузке?
6. Какие достоинства имеют четырехпроводные трехфазные цепи по сравнению с трехпроводными?
7. Какая нагрузка называется симметричной?
8. Чему равняется угол сдвига по фазе между напряжением и током в фазе потребителя при активной нагрузке?
9. Как рассчитывается мощность трехфазного потребителя?
10. Как изменится режим работы трехфазной системы при обрыве фазы?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ “ТРЕУГОЛЬНИК”

Время: 2 часа

6.1 Цель работы

6.1.1. Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении потребителей по схеме “Треугольник” при симметричной и несимметричной нагрузке фаз.

6.1.2. Экспериментальная проверка основных соотношений трехфазной системы при соединении потребителя по схеме “Треугольник”.

6.1.3. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

6.2 Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 6.1.

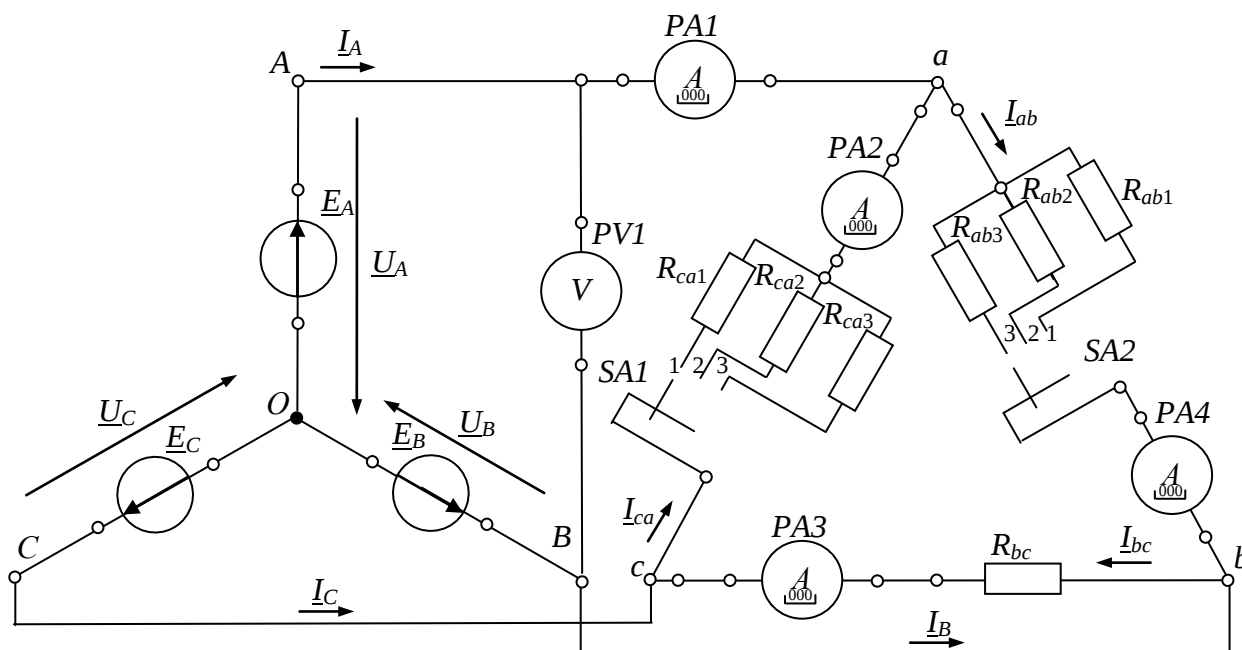


Рисунок 6.1 — Схема лабораторной установки по исследованию режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – треугольник”

Схема лабораторной установки содержит [3]:

- источник электропитания;
- элементы электрических цепей;
- измерительные приборы.

Источник электропитания вырабатывает трехфазное переменное напряжение с действующим значением 9 В и частотой 50 Гц.

В качестве элементов электрических цепей используется трехфазная на-

грузка, соединенная по схеме “Треугольник” и состоящая из:

- резистора с нерегулируемым сопротивлением ($R_{bc}=50\text{ Ом}$);
- резистора с регулируемым сопротивлением между точками фаз потребителя **c** и **a** ($R_{ca}=50\text{ Ом}, 200\text{ Ом}, 100\text{ Ом}$);
- резистора с регулируемым сопротивлением между точками фаз потребителя **a** и **b** ($R_{ab}=50\text{ Ом}, 300\text{ Ом}, 150\text{ Ом}$).

Регулирование сопротивлений резисторов осуществляется ступенчато с помощью переключателей *SA1* и *SA2*.

В стенде для имитации сопротивления линии передачи имеют место три нерегулируемых резистора *R1—R3* с сопротивлением 10 Ом . Однако в работе они не используются, поэтому на схеме не показаны.

Для измерения токов в фазах и линейном проводе применяются цифровые амперметры *PA1—PA4*, а для измерения линейного и фазного напряжений — стрелочный вольтметр *PV1* типа Ц42300 с пределом измерения 15 В .

При наличии трех фаз этот прибор подключаются к соответствующим точкам схемы установки. Для измерения линейного напряжения U_{AB} вольтметр *PV1* подключается между линейными проводами, соответствующими фазам **A** и **B**. По аналогии для измерения линейного напряжения U_{BC} вольтметр *PV1* подключается между линейными проводами, соответствующими фазам **B** и **C**, а для измерения линейного напряжения U_{CA} — между линейными проводами, соответствующими фазам **C** и **A**.

Для измерения фазного напряжения U_{ab} вольтметр *PV1* подключается между точками фаз потребителя **a** и **b**. По аналогии для измерения напряжения U_{bc} (этот случай показан на схеме) вольтметр *PV1* подключается между точками фаз потребителя **b** и **c**, а для измерения напряжения U_{ca} — между точками фаз потребителя **c** и **a**.

6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1. Перед исследованием режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – треугольник” необходимо измерить линейные напряжения источника питания на холостом ходу: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

6.3.2. Включить источник трехфазного напряжения. Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	Измерено		
	$U_{AB}, \text{В}$	$U_{BC}, \text{В}$	$U_{CA}, \text{В}$

6.3.3. Выключить электропитание.

6.3.4. Собрать схему лабораторной установки, согласно рисунка 6.1.

6.3.5. Предъявить для проверки собранную лабораторную установку преподавателю (лаборанту) и получить от него разрешение на включение схемы под напряжение.

6.3.6. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 6.2 при 4-х режимах работы трехфазной цепи.

Таблица 6.2 — Экспериментальные данные

Режим	Измерено								
	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А
1									
2									
3									
4									

Режим 1 — режим работы трехфазной цепи при симметричной нагрузке трехфазного потребителя, включенного по схеме “Треугольник”.

Переключатели $SA1$ и $SA2$ поставить в положение 1.

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде и провести измерения фазных напряжений — U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} , а также линейных токов — I_A , I_B , I_C , а также I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} .

Режим 2 — режим работы трехфазной цепи при несимметричной нагрузке трехфазного потребителя, включенного по схеме “Треугольник”.

Далее по указанию преподавателя необходимо смоделировать режим несимметричной нагрузки.

Для исследования этого режима переключатели $SA1$ и $SA2$ поставить в положение 2 или 3.

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде и провести измерения.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

Режим 3 — режим работы трехфазной цепи при обрыве одной из фаз потребителя.

Для исследования этого режима первоначально установить все переключатели фаз нагрузки режима $SA1$ и $SA2$ в положение 1.

С целью имитации обрыва, по указанию преподавателя, отключить одну из фаз.

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде и провести измерения.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

Режим 4 — режим работы трехфазной цепи при обрыве линейного провода.

Для исследования этого режима первоначально установить все переключатели фаз нагрузки $SA1$ и $SA2$ в положение 1.

С целью имитации обрыва линейного провода, по указанию преподавателя, отключить один из линейных проводов.

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде и провести измерения.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде.

6.3.4. Результаты измерений и вычислений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему лабораторной установки.

Результаты расчетов занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 — Расчетные данные

Режим	Вычислено		
	I_{ab}, A	I_{bc}, A	I_{ca}, A
1			
2			
3			
4			

6.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- а) цель работы;
- б) список лабораторного оборудования;
- в) схема лабораторной установки с номинальными данными элементов лабораторной установки;
- г) экспериментальные данные измерений;
- д) расчеты токов в фазах потребителей;
- е) векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследуемых режимов;
- ж) выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - анализ полученных экспериментальных данных;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

6.5 Основные теоретические положения

6.5.1 Симметричный режим трехфазной цепи, соединенной по схеме “Звезда – треугольник”

На рисунке 6.2. изображена схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – треугольник”.

Трехфазную цепь и трехфазный потребитель называют симметричными, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы [5], т.е.

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C.$$

В противном случае их называют **несимметричными**.

Режим трехфазной цепи, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны, называют симметричным.

При соединении нагрузки в треугольник напряжения на фазах нагрузки определяются по закону Ома.

Если напряжения и сопротивления фаз нагрузки заданы, то фазные токи определяются по формулам [7]:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{bc}}.$$

Напряжения на фазах нагрузки равны соответствующим линейным напряжениям, т.е.

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}; \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}; \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}.$$

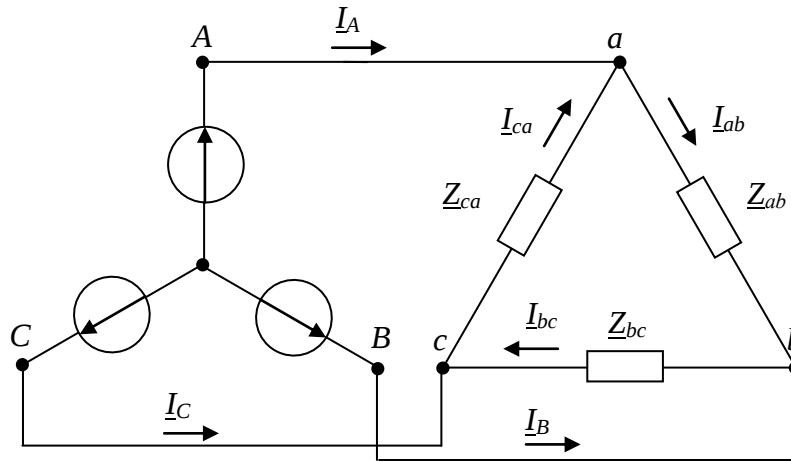


Рисунок 6.2 — Схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – треугольник”

Линейные токи находятся через фазные токи нагрузки по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

При этом $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

На рисунке 6.3,а изображена векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 6.3,б — векторная диаграмма токов при симметричной нагрузке, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$) и соединенной по схеме “Треугольник”.

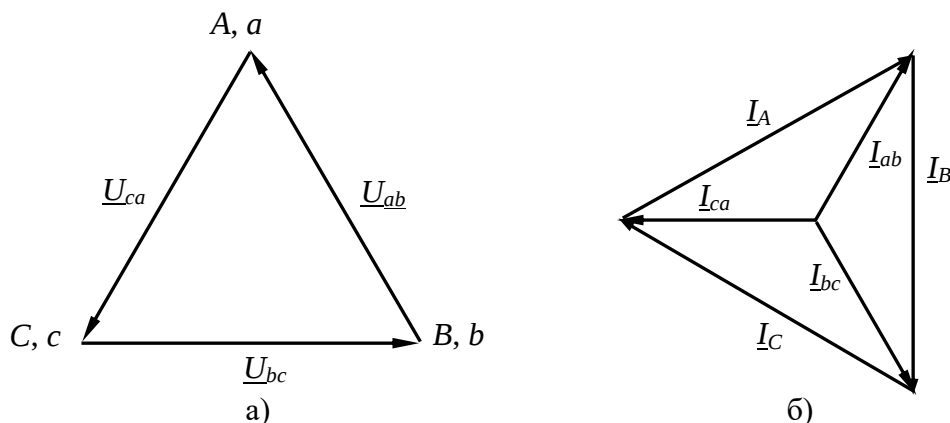


Рисунок 6.3 — Векторные диаграммы для схемы, соединенной по схеме “Треугольник” при симметричной нагрузке, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$): а) — напряжений; б) — токов

При равномерной нагрузке фаз модули комплексных сопротивлений фаз являются одинаковыми, но не всегда начальные фазы этих сопротивлений совпадают. Для этого случая линейные токи по модулю в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов нагрузки.

При симметричной нагрузке токи в фазах равны по величине, а углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям одинаковы.

Только при активной нагрузке фазные напряжения и токи будут совпадать по фазе.

6.5.2 Несимметричный режим трехфазной цепи, соединенной по схеме “Звезда – треугольник”

При несимметричной нагрузке, соединенной по схеме треугольник, расчет фазных и линейных токов проводится по тем же формулам, что и для симметричной нагрузки, но при этом фазные и линейные токи уже не образуют симметричной системы векторов.

На рисунке 6.4,а изображена векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 6.4,б — векторная диаграмма токов при несимметричной нагрузке.

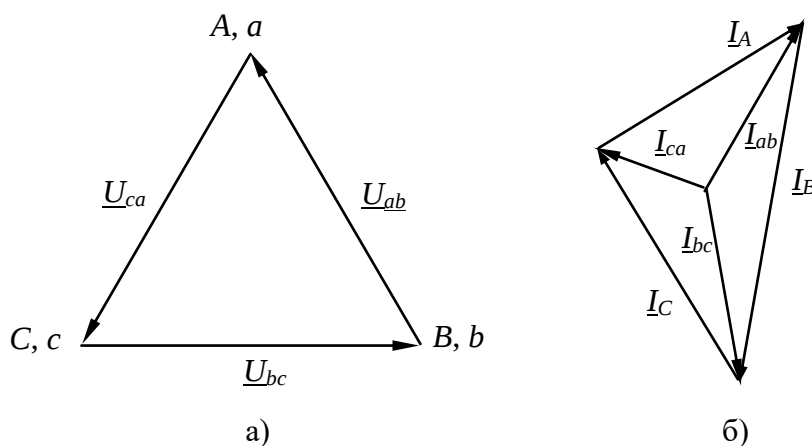


Рисунок 6.4 — Векторные диаграммы для схемы, соединенной по схеме “Треугольник”, при несимметричной нагрузке:
а) — напряжений; б) — токов

Важной особенностью соединения фаз нагрузки в треугольник является то, что при изменении сопротивления одной из фаз будут изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах, соединенных с этой фазой.

При работе трехфазного потребителя, соединенного по схеме треугольник, возможны также **аварийные режимы работы**, например, обрыв фазы потребителя, обрыв линейного провода или короткое замыкание в одной из фаз.

В случае обрыва, например, в ветви *в-с* нагрузки, ток $I_{bc}=0$, а токи I_{ab} и I_{ca} остаются без изменения, поэтому прежнее значение имеет и ток $I_A = I_{ab} - I_{ca}$. Токи I_B и I_C изменяются: $I_B = -I_{ab}$; $I_C = I_{ca}$.

Векторная диаграмма токов в случае обрыва одной из фаз потребителя изображена на рисунке 6.5 (до обрыва нагрузка была симметричной, сравните с векторной диаграммой токов, изображенной на рисунке 6.3,б).

При обрыве линейного провода, например, провода, соединяющего узлы *A* и *a* (сети и потребителя), трехфазный потребитель превращается в однофазный, а комплексные сопротивления фаз нагрузки Z_{ca} и Z_{ab} соединяются последовательно.

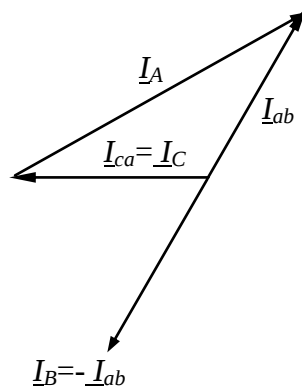


Рисунок 6.5 — Векторная диаграмма токов в случае обрыва одной из фаз потребителя

На рисунке 6.6,а изображена векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 6.6,б — векторная диаграмма токов для случая обрыва линейного провода.

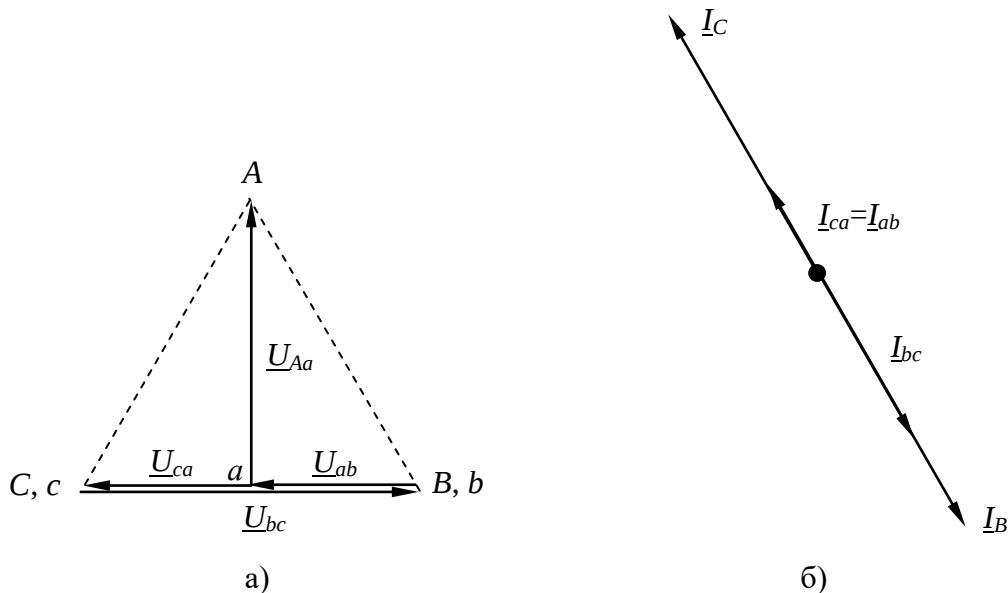


Рисунок 6.6 — Векторные диаграммы для схемы, соединенной по схеме “Треугольник”, при обрыве линейного провода: а) — напряжений; б) — токов

На каждое из этих сопротивлений приходится половина линейного напряжения U_{bc} . На векторной диаграмме напряжений, приведенной на рисунке 8.6,а точка **a** располагается на середине отрезка **b-c**. Согласно этому рисунку, напряжения на комплексных сопротивлениях ветвей **c-a** (U_{ca}) и **a-b** (U_{ab}) уменьшаются по модулю в 2 раза по сравнению с симметричным режимом.

Начальные фазы этих напряжений будут одинаковыми по значению и противоположными по знаку начальной фазы напряжения U_{bc} . Во столько же раз уменьшаются токи в этих ветвях: $I_{ab} = I_{ca}$ [10].

При построении векторной диаграммы следует вначале отложить вектор тока фазы, оставшейся под линейным напряжением (для нашего случая это ток I_{bc}). Далее следует отложить токи $I_{ab} = I_{ca}$, направленные на 180° относительно

тока $\underline{I}_{bc}$. Линейный ток $\underline{I}_A=0$, а токи $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ находим по векторной диаграмме (рисунк 6.6,б): $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$; $I_B = I_C$.

6.5.3 Расчет активной, реактивной и полной мощности трехфазного потребителя

Под **активной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму активных мощностей фаз нагрузки [8]:

$$P = P_A + P_B + P_C,$$

где P_A , P_B и P_C являются активными мощностями фаз нагрузки.

Для **трехфазной системы**, соединенной по схеме “Звезда – треугольник”, активные мощностей фаз нагрузки определяются по следующим выражениям [5]:

$$P_A = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_A; P_B = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_B; P_C = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_C,$$

где U_{ab} , U_{bc} и U_{ca} - напряжения на фазах; I_{ab} , I_{bc} и I_{ca} - токи в фазах, а φ_A , φ_B и φ_C - углы между напряжениями на фазах нагрузки и токами фаз нагрузок **A**, **B** и **C**, соответственно.

Под **реактивной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму реактивных мощностей фаз нагрузки [1, 7]:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C,$$

где Q_A , Q_B и Q_C являются реактивными мощностями фаз нагрузки.

Для **трехфазной системы**, соединенной по схеме “Звезда – треугольник”, реактивные мощности фаз нагрузки определяются по следующим выражениям [5,7]:

$$Q_A = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_A; Q_B = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_B; Q_C = U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_C.$$

Полная мощность трехфазного потребителя определится следующим образом [4]

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

Если нагрузка **симметричная**, то

$$P_A = P_B = P_C = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; Q_A = Q_B = Q_C = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi},$$

где φ_{ϕ} - сдвиг по фазе между фазным напряжением U_{ϕ} и фазным током I_{ϕ} .

В результате при **симметричной** нагрузке фаз [4]:

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; S = 3U_{\phi} I_{\phi}.$$

Независимо от способа соединения нагрузки в звезду или в треугольник при **симметричной** нагрузке фаз [4]:

$$3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{л} I_{л},$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение на нагрузке; $I_{л}$ – линейный ток нагрузки, поэтому при определении мощностей часто используют следующие выражения [4]:

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi_{\phi}; Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi_{\phi}; S = \sqrt{3} U_{л} I_{л}.$$

В случае аварийных режимов для трехфазного потребителя при обрыве фазы для схемы “Звезда – треугольник” активная и реактивная мощности этой оборванной фазы в расчетах, приведенных выше, **не учитываются**.

При обрыве линейного провода, например провода, соединяющего узлы A и a сети и потребителя для схемы “Звезда – треугольник” активная и реактивная мощности рассчитываются следующим образом

$$P = P_A + P_B + P_C = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_A + U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_B + U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_C,$$

причем в последних выражениях надо учитывать, что

$$U_{ab} = U_{ca} = U_{\Delta}/2 = U_{bc}/2,$$

а начальные фазы напряжений $\underline{U}_{ab}$ и $\underline{U}_{ca}$ будут отличаться от начальной фазы напряжения $\underline{U}_{bc}$ на 180° при расчете $\cos \varphi$.

6.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какой порядок действий при выполнении лабораторной работы?
3. Какие элементы включает лабораторная установка?
4. Какие существуют способы связывания трехфазных систем?
5. Каким образом соединяются фазы потребителя по схеме “Треугольник”?
6. Как определяются токи в фазах потребителя, соединенного по схеме “Треугольник”, если известны напряжения на фазах нагрузки и комплексные сопротивления фаз нагрузки?
7. Какие соотношения имеют место между линейными токами и фазными токами потребителя в трехфазной системе при соединении потребителя по схеме “Треугольник” при симметричной нагрузке?
8. Как рассчитываются активная, реактивная и полная мощности потребителя, соединенного по схеме “Треугольник”?
9. Как изменится режим работы оставшихся фаз потребителя, соединенного по схеме “Треугольник”, при обрыве одной из фаз?
10. Как изменится режим работы оставшихся фаз потребителя, соединенного по схеме “Треугольник”, при обрыве линейного провода?

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородяню В.Н., Электрические цепи постоянного тока: методические указания к проведению лабораторных работ / В.Н. Бородяню. — Челябинск: ЮУрГУ, 2020. — 22 с.
2. Бородяню В. Н., Однофазные цепи переменного тока: методические указания к проведению лабораторных работ / В.Н. Бородяню. — Челябинск: Учтех-Профи, 2016. — 14 с.
3. Бородяню В.Н., Трёхфазные электрические цепи: методические указания к проведению лабораторных работ / В.Н. Бородяню. — Челябинск: Учтех-Профи, 2018. — 10 с.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи : учебник для академического бакалавриата / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 831 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-10731-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/431365>
5. Кузовкин В. А. Электротехника и электроника : учебник для академического бакалавриата / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 431 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-08114-5. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/432002>
6. Электротехника и электроника в 3 т. Том 3. Основы электроники и электрические измерения : учебник и практикум для академического бакалавриата / Э. В. Кузнецов, Е. А. Куликова, П. С. Культиасов, В. П. Луниин ; под общей редакцией В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 234 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-8414-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433379>
7. Данилов, И. А. Общая электротехника в 2 ч. Часть 1 : учебное пособие для академического бакалавриата / И. А. Данилов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 426 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-01639-0. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/437897>
8. Данилов И. А. Общая электротехника в 2 ч. Часть 2 : учебное пособие для академического бакалавриата / И. А. Данилов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 251 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-01640-6. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/437898>
9. Миленина С. А. Электротехника : учебник и практикум для академического бакалавриата / С. А. Миленина, Н. К. Миленин ; под редакцией Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 263 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-05077-6. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/438003>
10. Электротехника: Учебное пособие / И.С. Рыбков. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2013. - 160 с.: 70x100 1/32. - (ВПО: Бакалавриат). (обложка, карм.

формат) ISBN 978-5-369-00144-8 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/369499>

11. Новожилов О. П. Электротехника и электроника : учебник для вузов / О. П. Новожилов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 653 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-2941-6. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/488194>

12. Матвеев Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: СевГУ, 2019. — 295 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Образец бланка титульного листа к лабораторной работе

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Морской институт

Кафедра “Судовое электрооборудование”

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №

по дисциплине “Общая электротехника и электроника”

Название работы _____
Цель работы _____

Студент _____

Группа _____

Дата выполнения _____

Проверил _____

Севастополь
2022 г.

Учебное издание

**Конева Светлана Андреевна
Матвеев Юрий Валентинович
Цалоев Владимир Муратович**

**ОБЩАЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

В 2 частях

Часть 1

В авторской редакции

Изд. № 134/2022. Объем 3,75 п.л. Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,675.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»