

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Морской институт

Ю.В. Матвеев

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ПО ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ**

для студентов специальности

**26.05.06 — Эксплуатация судовых энергетических установок
всех форм обучения**

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 621.3(075.8)+ 621.38(075.8)
ББК 31.21я73
М 33

Рецензент:

С.А. Конева — к.т.н., доцент, заведующий кафедрой “Судовое электрооборудование

Матвеев Ю.В.

М 33 Общая электротехника и электроника: учеб.-метод. пособие по лабораторному практикуму для студентов специальности: 26.05.06 — Эксплуатация судовых энергетических установок всех форм обучения / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: СевГУ, 2020. — 80 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов специальности: 26.05.06 — Эксплуатация судовых энергетических установок всех форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, выполняющих лабораторные работы по дисциплине “Общая электротехника и электроника”.

УДК 621.3(075.8)+621.38(075.8)
ББК 31.21я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой “Судовое электрооборудование” Морского института Севастопольского государственного университета в качестве учебно-методического пособия к выполнению лабораторных работ по дисциплине “Общая электротехника и электроника” для студентов специальности: 26.05.06 — Эксплуатация судовых энергетических установок всех форм обучения. Протокол заседания кафедры СЭО № 8 от 27.05.2020 г.

© Матвеев Ю.В. 2020
© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Правила техники безопасности.....	7
Лабораторная работа № 1. Исследование разветвленной линейной электрической цепи.....	9
Лабораторная работа № 2. Определение параметров электрических цепей.....	14
Лабораторная работа № 3. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением элементов.....	19
Лабораторная работа № 4. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением потребителей.....	24
Лабораторная работа № 5. Исследование трехфазной цепи при соединении потребителя по схеме “Звезда”.....	32
Лабораторная работа № 6. Исследование трехфазной цепи при соединении потребителя по схеме “Треугольник”.....	41
Лабораторная работа № 7. Исследование однофазного трансформатора....	49
Лабораторная работа № 8. Исследование однофазных выпрямителей.....	56
Лабораторная работа № 9. Исследование одиночного усилительного каскада.....	67
Литература.....	77
Приложение А. Образец бланка титульного листа к лабораторной работе....	78

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, класс;
- 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—14]. Для оценки погрешностей измерений можно воспользоваться учебным пособием [1].

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 оборудованием, измерительными приборами и документацией. Далее студенты проверяют соответствие электроизмерительных приборов ожидаемым значениям из-

меряемых величин и записывают в бланк отчета их номинальные данные и основные элементы лабораторной установки.

После этого студенты приступают к сборке схемы лабораторной установки, располагая измерительные приборы и, 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 точками 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., зав. кафедрой “Судовое электрооборудование” С.А. Коневой.

Автор

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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 лаборатории, где проводится занятие, напряжение сети имеет величину до 380 В, что является безусловно опасным для жизни, а при определенных условиях может оказаться смертельным. 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 или световой сигнал объявить устно: «Включаю» или «Подаю напряжение».
3. Студент должен расположиться таким образом, чтобы лабораторная установка постоянно находилась 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.

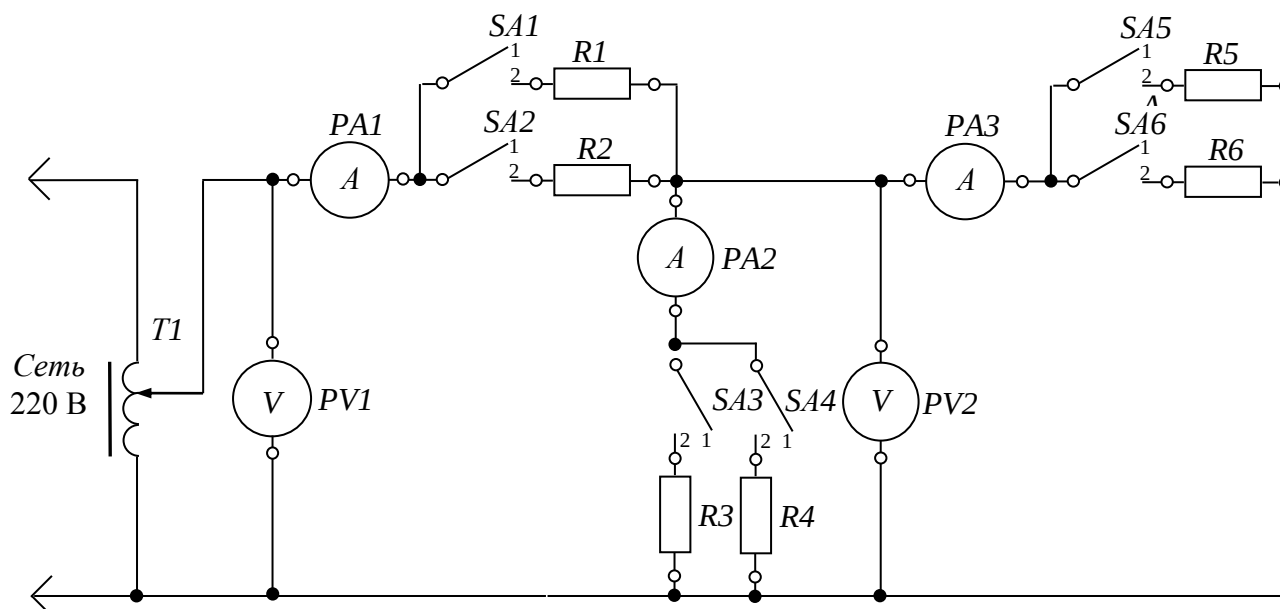


Рис. 1.1 — Схема лабораторной установки

Основными элементами установки являются: регулируемый источник напряжения, измерительные приборы, набор сопротивлений $R1 - R6$. Подключение сопротивлений в ветви электрической цепи осуществляется с помощью переключателей $SA1 - SA6$. Напряжение на входе исследуемой цепи регулируется лабораторным автотрансформатором $T1$. Для измерения токов и напряжений в установке используются измерительные приборы:

- вольтметр $PV1$, необходимый для измерения постоянного напряжения на входе исследуемой цепи;
- вольтметры $PV2$, необходимый для измерения падения напряжения на элементах исследуемой цепи;
- амперметры $PA1 - PA3$, предназначенные для измерения токов в ветвях электрической цепи.

1.3 Порядок выполнения работы

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

1.3.2. Используя вольтметр $PV1$, установить регулятором постоянного напряжения значение напряжения источника, равное 200 В.

1.3.3. Установить переключатели $SA1$, $SA3$ и $SA5$ в положение 2.

1.3.4. Снять показания вольтметра $PV2$ 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 в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — Экспериментальные и расчетные данные

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

1.3.7. Установить переключатели $SA1$, $SA2$, $SA3$, $SA4$ и $SA5$ в положение 2.

1.3.8. Снять показания вольтметра $PV2$ и амперметров $PA1 - PA3$.

1.3.9. Результаты опыта занести в таблицу 1.2.

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

1.3.11. Составить отчет по требуемой форме.

Таблица 1.2 — Экспериментальные и расчетные данные

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

1.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- а) название и цель работы;
- б) схема лабораторной установки с номинальными данными элементов лабораторной установки;
- в) список лабораторного оборудования;
- г) результаты измерений и вычислений (таблица 1.1 и 1.2);
- д) выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - анализ полученных экспериментальных данных;
 - 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.

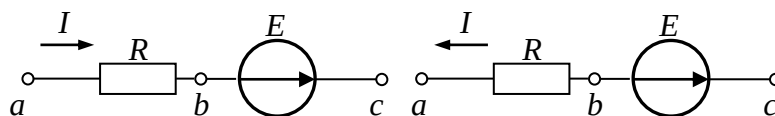


Рис. 1.3 — Участок цепи с ЭДС:

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

1.5.2 Расчет простых электрических цепей постоянного тока

При анализе сложной 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.

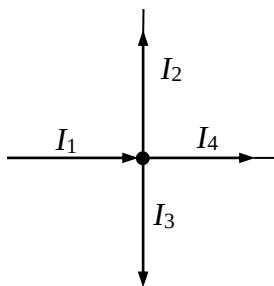


Рис. 1.4 — Участок цепи с электрическим узлом

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:

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

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 [2]:

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

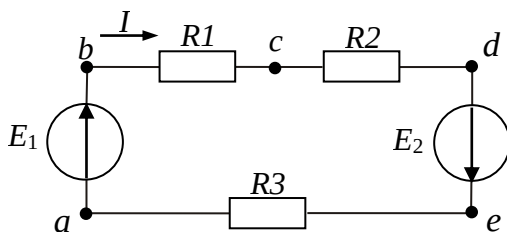


Рис. 1.5 — Электрический контур

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:

$$\sum_k U_k = 0.$$

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 [3]

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

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. Какой 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 формулируется первый и второй законы Кирхгофа?
7. Что понимают под напряжением на некотором участке электрической цепи?
8. Для чего 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

Время: 2 часа.

2.1 Цель работы

2.1.1. Экспериментальное определение параметров элементов электрических цепей.

2.1.2. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

2.2 Схема лабораторной установки

На рисунке 2.1 изображена схема лабораторной установки.

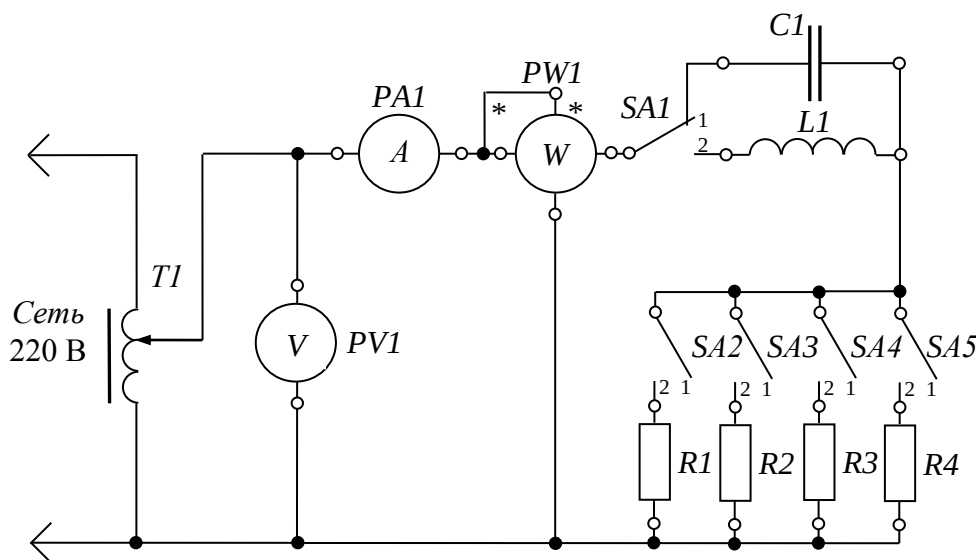


Рис. 2.1 — Схема лабораторной установки

Лабораторная установка содержит: измерительные приборы, катушку индуктивности, $L1$ конденсатор $C1$, набор сопротивлений $R1 - R4$. Подключение сопротивлений в ветви электрической цепи осуществляется с помощью переключателей $SA1 - SA4$. Для выбора типа исследуемой цепи используется переключатель $SA1$. Номинал емкости конденсатора изменяется с помощью магазина емкостей. Напряжение на входе исследуемой цепи регулируется лабораторным автотрансформатором $T1$.

Для фиксирования необходимых физических величин, характеризующих режим работы цепи, в составе элементов лабораторной установки имеются измерительные приборы:

- вольтметр $PV1$, необходимый для измерения входного напряжения;
- амперметр $PA1$, предназначенный для измерения тока в цепи;
- ваттметр $PW1$, служащий для измерения активной мощности, потребляемой цепью.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1. Собрать, согласно рисунку 2.1, схему лабораторной установки. По-

ложение ручки автотрансформатора установить в такое положение, чтобы напряжение на входе цепи было минимальным. Исходное значение емкости в магазине емкостей установить по указанию преподавателя.

2.3.2. Поставить переключатель $SA1$ в положение 1, а переключатель $SA2$ в положение 2.

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

2.3.4. Включить лабораторную установку под питание соответствующим выключателем на щитке питания и установить заданное напряжение по указанию лаборанта.

2.3.5. Используя вольтметр $PV1$, установить регулятором постоянного напряжения значение напряжения источника, равное 200 В.

2.3.6. Последовательно переключая переключатели $SA2$ – $SA4$ в положение 2 (изменяя значение сопротивления), зафиксировать показания приборов и записать их в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Измерено			Вычислено				
	U , В	I , А	P , Вт	R_1 , Ом	x , Ом	z , Ом	φ , град	C_1 , мкФ

2.3.7. Поставить переключатель $SA1$ в положение 2. Последовательно переключая переключатели $SA2$ — $SA4$ в положение 2 (изменяя значение сопротивления), зафиксировать показания приборов и записать их в таблицу 2.2.

В таблице 2.2 сопротивление R_k соответствует внутреннему сопротивлению катушки индуктивности.

Таблица 2.2 — Экспериментальные и расчетные данные

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

2.3.7. Выключить приборы.

2.3.8. Далее необходимо произвести вычисления активного сопротивления цепи (R_1+R_k) (значение сопротивления R_1 берется из лабораторной работы № 1), активного сопротивления катушки R_k , реактивного x и полного z сопротивлений исследуемых цепей, а также сдвига фаз φ между током и напряжением в цепи.

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

2.3.10. Построить векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей.

2.4 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 активного, реактивного и полного сопротивлений исследуемых RC и RL цепей, а также сдвига фаз φ между током и напряжением в цепи, приведенные в таблицах 2.1 и 2.2;
- е) векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых RC и RL цепей для всех проведенных опытов (построения необходимо выполнить отдельно для RC и RL цепей, но в одном масштабе);
- ж) выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - влияние изменения параметров цепи на активное R , реактивное x и полное z сопротивления исследуемых RC и RL цепей;
 - влияние изменения параметров цепи на сдвиг фаз φ между током и напряжением в цепи;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

2.5 Основные теоретические положения

Установившийся режим цепи с последовательным соединением пассивных элементов (см. рисунок 2.2) описывается вторым законом Кирхгофа и законом Ома.

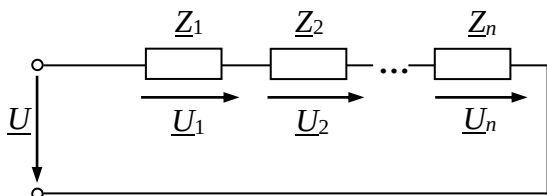


Рис. 2.2 – Цепь с последовательным соединением пассивных элементов

Для данной цепи запись этих законов в символической форме примет вид [2]:

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

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.

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 [4]. 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.

Эквивалентная схема RL -цепи и соответствующая ей векторная диаграмма показаны на рисунках 2.3,а и 2.3,б, а для RC -цепи – на рисунках 2.4,а и 2.4,б соответственно.

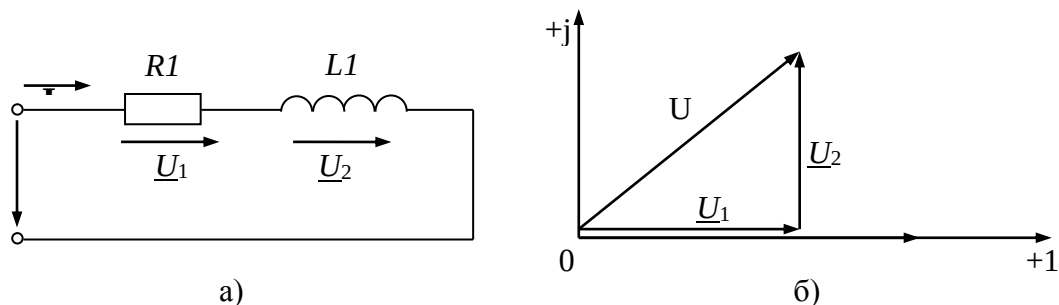


Рис. 2.3 — Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) RL -цепи

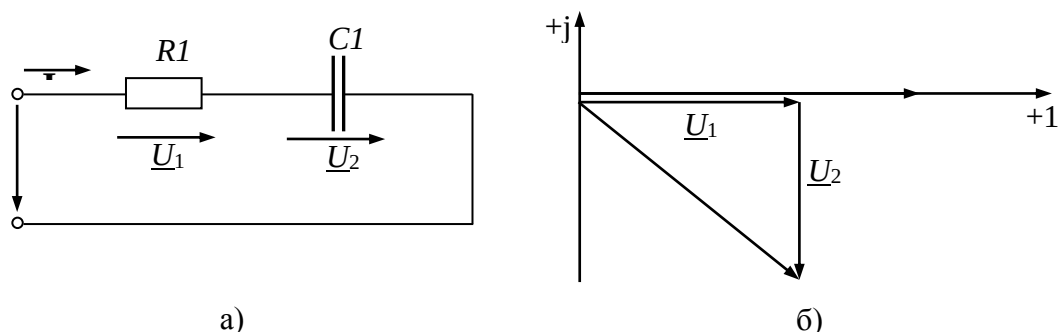


Рис. 2.4 — Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) RC -цепи

2.6 Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Время: 2 часа.

3.1 Цель работы

3.1.1. Исследование неразветвленной цепи переменного тока, состоящей из резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

3.1.2. Исследование резонансных свойств последовательного RLC - контура.

3.1.3. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

3.2 Схема лабораторной установки

На рисунке 3.1 изображена схема лабораторной установки.

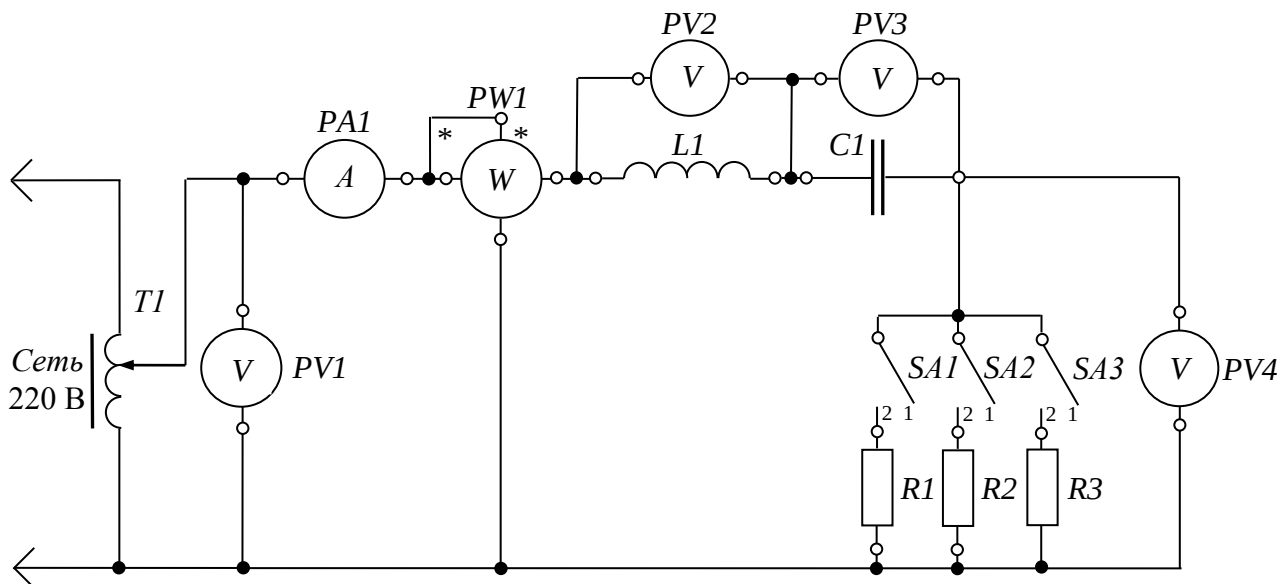


Рис. 3.1 — Схема лабораторной установки

Лабораторная установка содержит: измерительные приборы, катушку индуктивности $L1$, конденсатор $C1$, набор сопротивлений $R1$ и $R2$. Подключение сопротивлений в ветви электрической цепи осуществляется с помощью переключателей $SA1$ и $SA2$. Переключатель $SA3$ используется для исследования резонансных свойств цепи. Номинал емкости конденсатора изменяется с помощью магазина емкостей. Напряжение на входе исследуемой цепи регулируется лабораторным автотрансформатором $T1$. Для фиксирования необходимых физических величин, характеризующих режим работы цепи, в составе элементов лабораторной установки имеются измерительные приборы:

- вольтметр $PV1$, необходимый для измерения входного напряжения;
- вольтметры $PV2$, $PV3$ и $PV4$, предназначены для измерения напряжения на элементах цепи;
- амперметр $PA1$, предназначен для измерения тока в цепи;
- ваттметр $PW1$, служащий для измерения активной мощности, потребляемой цепью.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1. Собрать, согласно рисунка 3.1, схему лабораторной установки. Положение ручки автотрансформатора установить в такое положение, чтобы напряжение на входе цепи было минимальным. Исходное значение емкости в магазине емкостей установить по указанию преподавателя.

3.3.2. Переключатели $SA1$ и $SA2$ поставить в положение 2, а переключатель $SA3$ в положение 1.

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

3.3.4. **Исследовать неразветвленную цепь переменного тока.** Для этого следует включить лабораторную установку под питание соответствующим выключателем на щитке питания и установить, используя вольтметр $PV1$, регулятором переменного напряжения значение напряжения источника, равное 200 В.

3.3.5. Дискретно изменяя (не менее 3...5 раз) емкость конденсатора магазина емкостей, зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Экспериментальные данные						Расчетные данные		
	I, A	U_1, B	U_2, B	U_3, B	U_4, B	$P, Bт$	$R_1, R_2, Ом$	$L_1, Гн$	$C_1, мкФ$

3.3.6. **Исследовать резонансные свойства последовательного контура.** Для этого необходимо вначале положение ручки автотрансформатора установить в такое положение, чтобы напряжение на входе цепи было минимальным. Переключатель $SA3$ поставить в положение 2.

3.3.7. Изменяя положение ручки автотрансформатора установить регулятором переменного напряжения значение напряжения источника, равное 150 В.

3.3.8. Дискретно изменяя емкость магазина емкостей от значения $C=0$ до значения $C=C_{max}$ произвести настройку цепи в резонанс. В режиме резонанса показание амперметра $PA1$ должно быть максимальным, а показания вольтметров $PV2$ и $PV3$ — примерно равны. Следует учитывать, что напряжение на катушке индуктивности за счет наличия активной составляющей в режиме резонанса всегда несколько больше напряжения на конденсаторе. Зафиксировать показания всех приборов при резонансе для $C=C_{рез}$ и записать их значения в таблицу 3.2.

3.3.9. **Снять резонансные кривые.** Для снятия резонансных кривых необходимо, записать показания приборов **вначале** при дискретном **уменьшении**, а затем при дискретном **увеличении** значения емкости конденсатора. Опыт повторить в обоих случаях 5...7 раз. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 3.2.

3.3.10. Выключить приборы.

3.3.11. Далее необходимо произвести вычисления активного сопротивле-

ния цепи ($R_1 + R_k$) (значение сопротивления R_1 берется из лабораторной работы № 1), активного сопротивления катушки R_k , реактивного x и полного z сопротивлений исследуемых цепей, а также сдвига фаз φ между током и напряжением в цепи.

Таблица 3.2 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Экспериментальные данные						Расчетные данные					
	C , мкФ	I , А	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	P , Вт	R_k , Ом	x_l , Ом	x_c , Ом	R_k , Ом	z , Ом	φ , град
1												
⋮												
5												
при резонансе												
1												
⋮												
5												

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

3.3.13. 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 (таблицы 3.1 и 3.2);
- векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи для случаев: $x_L > x_C$; $x_L = x_C$; $x_L < x_C$;
- графики резонансных кривых зависимостей $U_2 = f_1(C)$; $U_3 = f_2(C)$; $I = f_3(C)$; $\varphi = f_4(C)$;
- выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - влияние изменения емкости на реактивное x и полное сопротивление z исследуемой цепи;
 - влияние изменения емкости на сдвиг фаз φ между током и напряжением в неразветвленной части цепи;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

3.5 Основные теоретические положения

Электрическая цепь с последовательным соединением R , L и C изображена на рисунке 3.2. Резонансом напряжений называют установившийся режим цепи синусоидального тока с последовательным соединением индуктивности и ем-

кости, при котором входное реактивное сопротивление цепи равно нулю [2]. Входное сопротивление последовательного RLC -контура выражается в виде [2,3]

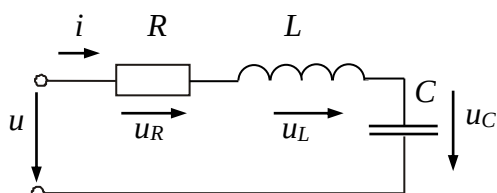


Рис. 3.2 — Электрическая цепь с последовательным соединением R , L и C

$$\underline{Z} = R + jx,$$

где R и x — активное и реактивное сопротивления контура соответственно.

Условие резонанса напряжений контура выражается равенством

$$x = x_L - x_C = 0 \text{ или } x_L = x_C, \text{ т.е. } \omega L = 1/\omega C.$$

При $x_L = x_C$ значения противоположных по фазе напряжений на индуктивности и ёмкости равны, поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называется резонансом напряжений. Полное сопротивление цепи z при $x=0$ минимально, т.е. $z = \sqrt{R^2 + x^2} = R$, а ток в цепи I при заданном входном напряжении U достигает наибольшего значения U/R . Векторная диаграмма токов и напряжений для RLC -контура при резонансе изображена на рисунке 3.3. 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

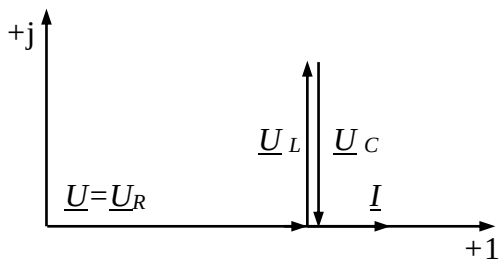


Рис. 3.3 — Векторная диаграмма токов и напряжений в RLC - контура при резонансе

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

Индуктивное и ёмкостное сопротивления при резонансе принимают значения

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

где ρ — характеристическое сопротивление контура.

Данная цепь обладает избирательными свойствами. Отношение 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 3.4 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 будет стремиться к нулю, а напряжение на конденсаторе — к значению $\frac{\pi}{2}$. В технике связи и радио-

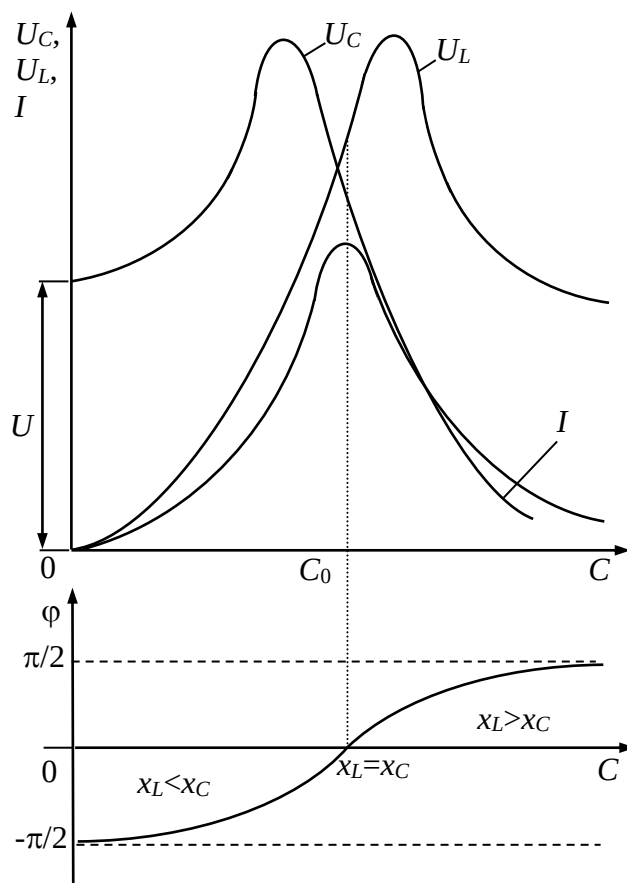


Рис. 3.4 — Резонансные кривые последовательного контура

технике 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. Что называется резонансом напряжения?
3. Как определяется добротность контура?
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 ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Время: 2 часа.

4.1 Цель работы

4.1.1. Исследование разветвленной цепи переменного тока, состоящей из резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

4.1.2. Исследование резонансных свойств параллельного RLC - контура.

4.1.3. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

4.2 Схема лабораторной установки

На рисунке 4.1 изображена схема лабораторной установки.

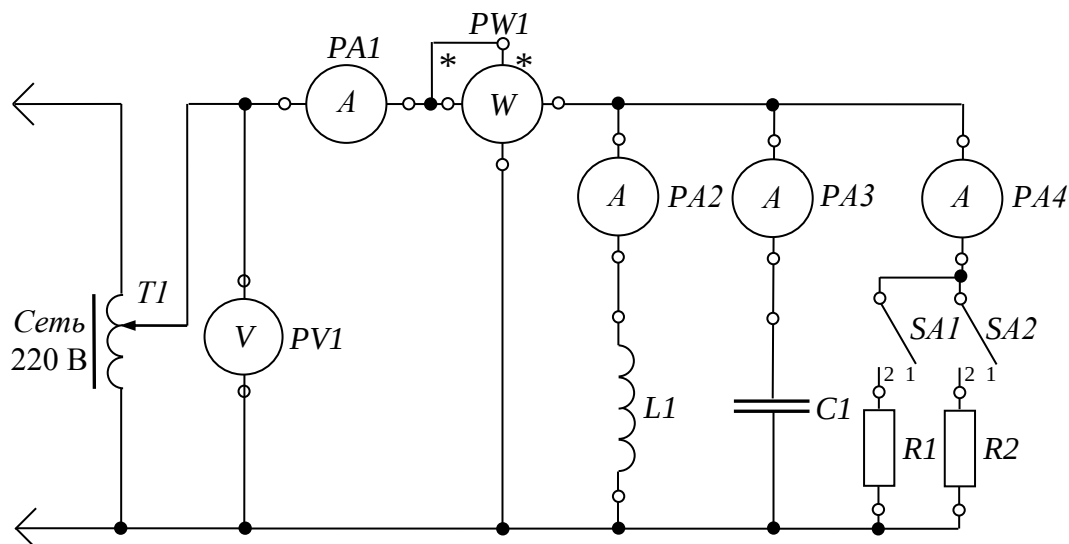


Рис. 4.1 — Схема лабораторной установки

Лабораторная установка содержит: измерительные приборы, катушку индуктивности $L1$, конденсатор $C1$, набор сопротивлений $R1$ и $R2$. Подключение сопротивлений в ветви электрической цепи осуществляется с помощью переключателей $SA1$ и $SA2$. Номинал емкости конденсатора изменяется с помощью магазина емкостей.

Напряжение на входе исследуемой цепи регулируется лабораторным автотрансформатором $T1$.

Для фиксирования необходимых физических величин, характеризующих режим работы цепи, в составе элементов лабораторной установки имеются измерительные приборы:

- вольтметр $PV1$, необходимый для измерения входного напряжения;
- амперметр $PA1$, предназначенный для измерения тока в неразветвленной части цепи;
- амперметры $PA2$, $PA3$ и $PA4$, необходимые для измерения тока в ветвях электрической цепи;
- ваттметр $PW1$, служащий для измерения активной мощности, потребляемой цепью.

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1. Собрать, согласно рисунка 4.1, схему лабораторной установки. Положение ручки автотрансформатора установить в такое положение, чтобы напряжение на входе цепи было минимальным. Исходное значение емкости в магазине емкостей $C=0$.

4.3.2. Переключатели $SA1$ и $SA2$ поставить в положение 2.

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

4.3.4. **Исследовать разветвленную цепь переменного тока.** Для этого необходимо включить лабораторную установку под питание соответствующим выключателем на щитке питания и установить, используя вольтметр $PV1$, регулятором переменного напряжения значение напряжения источника, равное 200 В.

4.3.5. Дискретно изменяя (не менее 3...5 раз) емкость конденсатора магазина емкостей, зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Экспериментальные данные						Расчетные данные								
	U_1 , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	I_4 , А	P , Вт	g , См	b , См	y , См	φ , град	b_L , См	b_C , См	R_1 , R_2 , Ом	L_1 , Гн	C_1 , мкФ

4.3.6. **Исследовать резонансные свойства параллельного контура.** Для этого необходимо вначале положение ручки автотрансформатора установить в такое положение, чтобы напряжение на входе цепи было минимальным. Переключатели $SA1$ и $SA2$ поставить в положение 1.

4.3.7. Изменяя положение ручки автотрансформатора установить регулятором переменного напряжения значение напряжения источника, равное 150 В.

4.3.8. Дискретно изменяя емкость магазина емкостей от значения $C=0$ до значения $C=C_{\max}$ произвести настройку цепи в резонанс. В режиме резонанса показание амперметра $PA1$ должно быть минимальным, а показания амперметров $PA2$ и $PA3$ — примерно равны. Здесь следует учитывать, что ток ветви с катушкой индуктивности в режиме резонанса за счет наличия активной составляющей всегда несколько больше тока в ветви с конденсатором.

Зафиксировать показания всех приборов при резонансе для $C=C_{\text{рез}}$ и записать их значения в таблицу 4.2.

4.3.9. **Снять резонансные кривые.** Для снятия резонансных кривых необходимо, записать показания приборов **вначале** при дискретном **уменьшении**, а затем при дискретном **увеличении** значения емкости конденсатора. Опыт повторить в обоих случаях 5...7 раз. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 — Экспериментальные и расчетные данные

Номер отсчетов	Экспериментальные данные						Расчетные данные								
	C , мкФ	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	I_4 , А	P , Вт	g , См	b , См	y , См	φ , град	b_L , См	b_C , См	R_1, R_2 , Ом	L_1 , Гн	C_1 , мкФ
1															
⋮															
5															
при резонансе															
1															
⋮															
5															

4.3.10. Выключить приборы.

4.3.11. Произвести вычисления параметров цепи.

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

4.3.13. Построить векторные диаграммы токов и напряжений исследуемых цепей.

4.4 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 (таблицы 4.1 и 4.2)
- расчет добротности контура Q ;
- векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи для случаев: $b_L > b_C$; $b_L = b_C$; $b_L < b_C$;
- графики резонансных кривых зависимостей $I = f_1(C)$; $I_1 = f_2(C)$; $I_2 = f_3(C)$; $\varphi = f_4(C)$ при $U = \text{const}$, $f = \text{const}$;
- выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - влияние изменения параметров цепи на активную, полную и реактивные проводимости исследуемой цепи;
 - влияние изменения параметров цепи на сдвиг фаз φ между током и напряжением в цепи;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

4.5 Основные теоретические положения

Установившийся режим электрической цепи с параллельным соединением

пассивных элементов (см. рисунок 4.2) описывается первым законом Кирхгофа и законом Ома. Для данной цепи форма записи этих законов в символической форме примет вид [2,6]:

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

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 [2,6]:

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

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 [2,6]:

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

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

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

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 [2,6]:

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

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

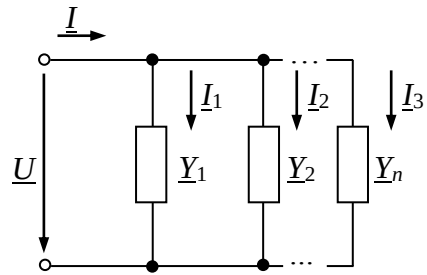


Рис. 4.2 — Электрическая цепь с параллельным соединением пассивных элементов

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

Для проверки правильности выполненных расчетов делают построение векторных диаграмм. Схема RL -цепи и соответствующая ей векторная диаграмма изображена на рисунках 4.3,а и 4.3,б, а для RC -цепи — на рисунках 4.4,а и 4.4,б соответственно.

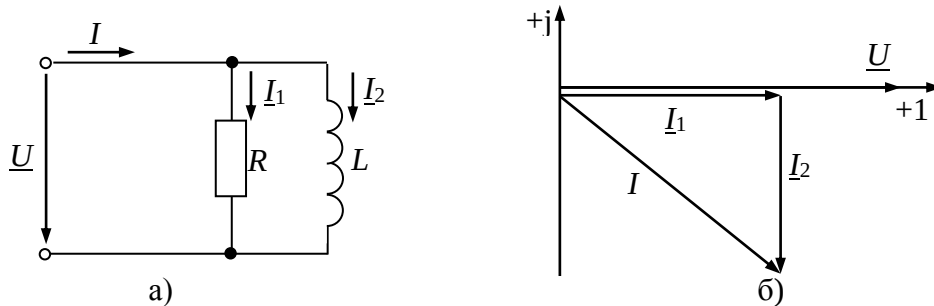


Рис. 4.3 — Электрическая RL -цепь:
а) — схема; б) — векторная диаграмма

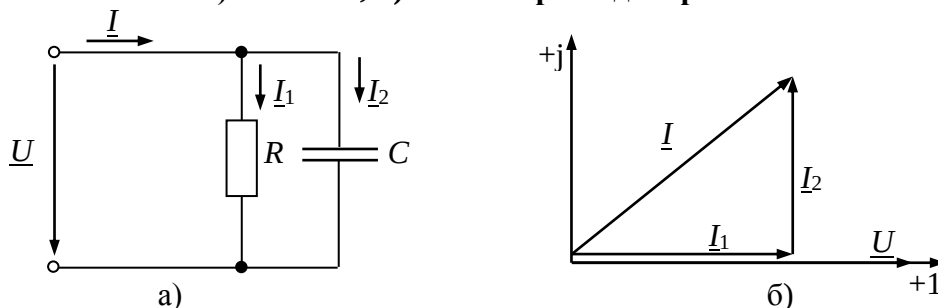


Рис. 4.4 — Электрическая RC -цепь:
а) — схема; б) — векторная диаграмма

Вследствие того, что катушка индуктивности обладает активным и индуктивным сопротивлением, то при расчетах цепей с этими элементами следует пользоваться схемами их замещения. Схемы замещения катушки индуктивности с последовательным и параллельным соединением ее элементов изображены на рисунках 4.5,а и 4.5,б соответственно. Разложение общего напряжения

на активную U_a и реактивную U_r составляющие можно записать (см. рисунок 4.5,а), как

$$U_a = U \cos \varphi; \quad U_r = U \sin \varphi.$$

Для другой схемы (см. рисунок 4.5,б) разложение общего тока на активную I_a и реактивную I_r составляющие можно записать, как

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_r = I \sin \varphi.$$

Обе схемы при соответствующем пересчете элементов цепи являются эквивалентными. Ниже приведены соотношения между сопротивлениями и проводимостями участка цепи:

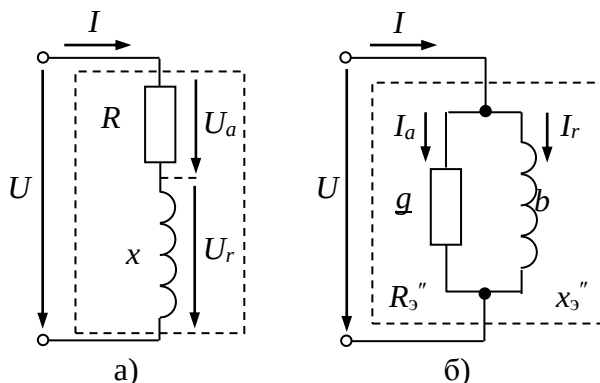


Рис. 4.5 — Схемы замещения катушки индуктивности с соединением ее элементов:
а) с последовательным; б) параллельным

$$y = \frac{1}{z}; g = \frac{R}{z^2}; b = \frac{x}{z^2}; z = \frac{1}{y}; R = \frac{g}{y^2}; x = \frac{b}{y^2}; \frac{1}{g} = R_3'' = \frac{R}{\cos^2 \varphi}; \frac{1}{b} = x_3'' = \frac{x}{\sin^2 \varphi}.$$

На рисунке 4.6 изображена электрическая цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

Резонансом токов называют установившийся режим цепи синусоидального тока с параллельным соединением индуктивности и емкости, при котором входная реактивная проводимость цепи равна нулю [3]. В работе исследуются резонансные свойства параллельного контура с потерями в ветви с индуктивностью.

Входная проводимость контура [2]:

$$\underline{Y} = g - jb$$

определяется суммой проводимостей первой и второй ветвей:

$$\underline{Y}_1 = g_1 - jb_1 = \frac{R_1}{z_1^2} - j \frac{x_L}{z_1^2}; \underline{Y}_2 = -jb_2 = \frac{j}{x_C},$$

где $x_L = \omega L; z_1 = \sqrt{(R^2 + x_L^2)}; x_C = \frac{1}{\omega C}$.

Таким образом, $\underline{Y} = g - j(b_1 + b_2)$.

Условие резонанса токов для параллельного контура выражается в виде равенства

$$b = b_1 + b_2 = 0 \text{ или } b_1 = -b_2,$$

отсюда

$$\frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = \omega C.$$

Из последнего выражения следует, что настройка контура в режим резонанса возможна за счет изменения частоты ω источника, индуктивности L , емкости C .

В режиме резонанса $b=0$ и, следовательно, входная проводимость определяется только активной составляющей, т.е.

$$\underline{Y} = g.$$

При этом сдвиг между током и напряжением φ в неразветвленной части цепи будет равен нулю. Резонансные значения частоты и емкости контура определяются из условия резонанса в виде [4]:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L\tilde{N}}} \sqrt{\frac{(L/C) - R^2}{(L/C)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{(L/C) - R^2}{(L/C)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R^2}{\rho^2}}.$$

Соотношения между входным напряжением и токами ветвей контура определяются первым законом Кирхгофа и законом Ома:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \underline{I} = \underline{Y}\underline{U} = g\underline{U};$$

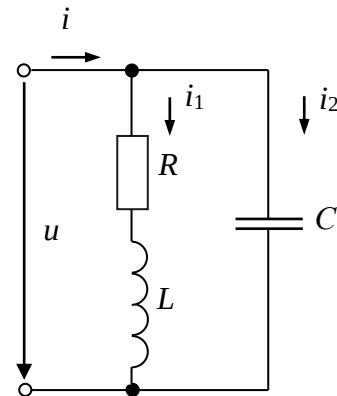


Рис. 4.6 — Электрическая цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора

$$\underline{I}_2 = \underline{Y}_2 \underline{U} = -jb_2 \underline{U}; \quad \underline{I}_1 = \underline{Y}_1 \underline{U} = g\underline{U} - jb_1 \underline{U},$$

Векторная диаграмма токов и напряжений в параллельном контуре в режиме резонанса изображена на рисунке 4.7. Комплексная мощность контура в режиме резонанса равна полной мощности цепи

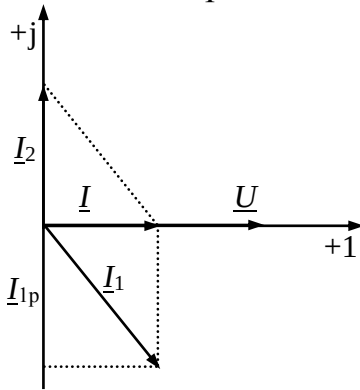


Рис. 4.7 — Векторная диаграмма токов и напряжений в параллельном контуре в режиме резонанса

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I} = UI = S.$$

Следовательно, реактивная мощность равна нулю, а активная мощность равна полной мощности, т.е.

$$P = UI = S.$$

Добротность параллельного контура определяют через отношение реактивных составляющих токов ветвей к входному току в режиме резонанса

$$Q = \frac{\omega L}{R}.$$

Анализ режима резонанса параллельного контура с потерями в ветви с индуктивностью позволяет установить следующие его особенности:

- входная проводимость контура имеет минимальное значение, равное активной проводимости g ;
- входной ток контура при заданном напряжении имеет минимальное значение, равное.

Примерный вид резонансных кривых $I = f_1(C)$; $I_1 = f_2(C)$; $I_2 = f_3(C)$; $\varphi = f_4(C)$ при значениях $\omega = \text{const}$; $U = \text{const}$; $L = \text{const}$; $R = \text{const}$ изображен на рисунке 4.8.

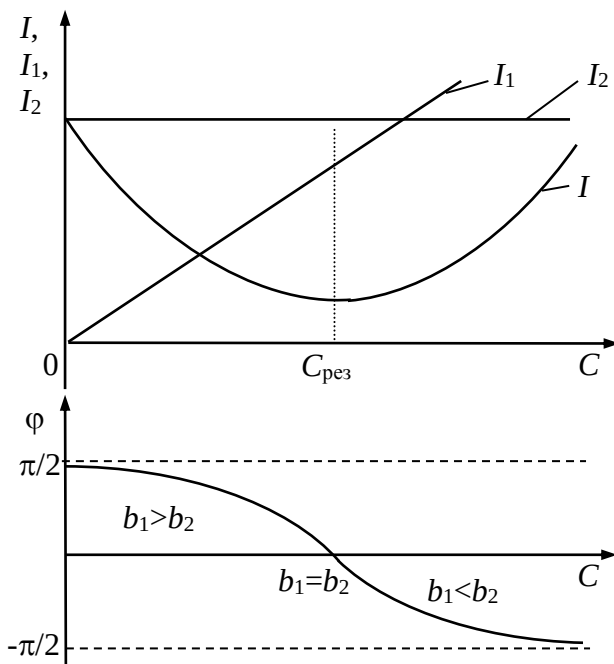


Рис. 4.8 — Резонансные кривые параллельного контура

Резонансные кривые параллельного контура при изменении параметра C получают из анализа следующих соотношений:

$$b_2 = -\omega C; \quad y = \sqrt{(g^2 + (b_1 + b_2)^2)};$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_1 + b_2}{g};$$

$$I = yU; \quad I_1 = y_1 U = \sqrt{(g^2 + b_1^2)} U;$$

$$I_2 = y_2 U = b_2 U.$$

При указанных условиях параметры $b_1 = \text{const}$; $g = \text{const}$ и следовательно ток I_1 будет сохранять неизменные значения.

В случае изменения значения $C \rightarrow 0$, значение проводимости b_2 будет стремиться к 0, а полной проводимости y к $\sqrt{(g^2 + b_1^2)}$. При этом

значение тока I в неразветвленной части цепи будет стремиться к значению $I_1 = \sqrt{(g^2 + b_1^2)}U$, а значение тока I_2 - к 0. Величина сдвига фаз φ будет принимать значение $\arctg \frac{b_1}{g} > 0$.

При значении $C = C_{\text{рез}}$ (режим резонанса) значение проводимости b_2 примет значение $b_2 = b_1$, а полной проводимости $y = g$. При этом значение тока I в неразветвленной части цепи будет равным $I = gU$, а в цепи, содержащей емкость значение $I_2 = \omega C_{\text{рез}} U$. Сдвиг фаз φ между током и напряжением в неразветвленной части цепи будет принимать значение $\varphi = 0$.

В случае изменения значения C к ∞ , а значения реактивной проводимости b_2 и полной проводимости y также будет стремиться к ∞ . В результате значения тока I в неразветвленной части цепи и тока I_2 в ветви с емкостью также будет стремиться к ∞ , а сдвиг фаз φ между током и напряжением в неразветвленной части цепи будет стремиться к значению $\frac{\pi}{2}$.

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 ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ “ЗВЕЗДА”

Время: 2 часа.

5.1 Цель работы

5.1.1. Исследование режимов работы трехфазной электрической цепи при соединении потребителя 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.

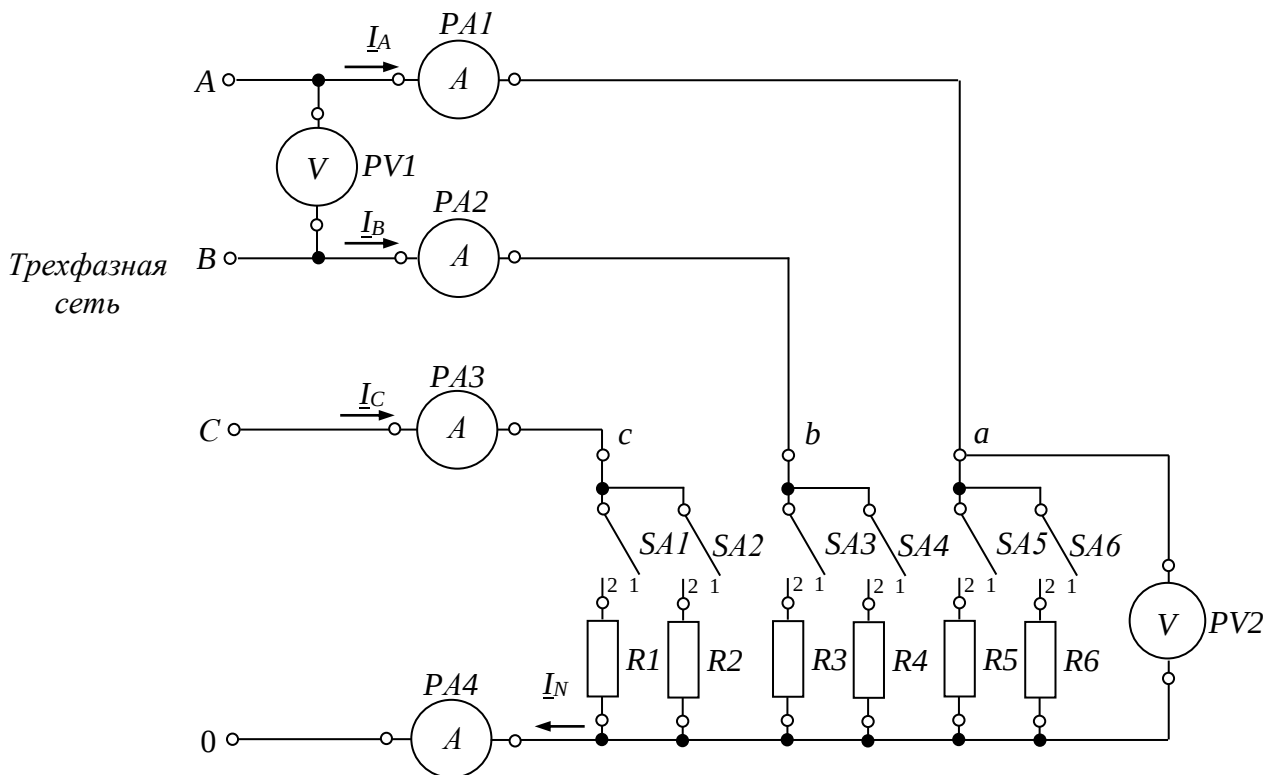


Рис. 5.1 — Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки содержит трехфазный потребитель, имеющий в каждой фазе по два одинаковых активных сопротивления. Эти сопротивления подключаются к соответствующим фазам *a*, *b* и *c* потребителя переключателями SA1—SA6.

Для измерения линейного тока в линейных проводах каждой из фаз установлены амперметры PA1—PA3. Амперметр PA4 предназначен для измерения тока в нулевом проводе.

В целях измерения линейного напряжения используется вольтметр $PV1$, а фазного напряжения — $PV2$. При наличии трех фаз эти приборы подключаются к соответствующим точкам схемы установки. Для измерения линейного напряжения U_{AB} (этот случай показан на схеме) 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 $PV2$ 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**.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1. Собрать, согласно рисунка 5.1, схему лабораторной установки. Переключатели $SA1$ — $SA6$ поставить в положение 2.

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. Все переключатели $SA1$ — $SA6$ должны быть поставлены в положение 2, как было сказано в пункте 5.3.1.

Далее следует включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде и проводим измерения.

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 $SA1$ — $SA6$ оставляем без изменения.

С целью исключения нулевого провода необходимо отключить амперметр *РА4*. Далее подключить питание и провести измерения.

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.

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 амперметр *РА1*, *РА2* или *РА3*.

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

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

Режим 4 — режим работы трехфазной цепи при несимметричной нагрузке с нулевым проводом. Для исследования этого режима вначале все переключатели *SA1— SA6* должны быть поставлены в положение 2.

Далее по указанию преподавателя смоделировать режим несимметричной нагрузки. Для этого второе сопротивление одной из фаз отключаем, с помощью переключателя *SA2*, *SA4* или *SA6*.

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 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 отключаем амперметр *РА4*. Далее подключить питание и провести измерения.

По окончании измерений выключить питание установки с помощью соответствующего переключателя 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.

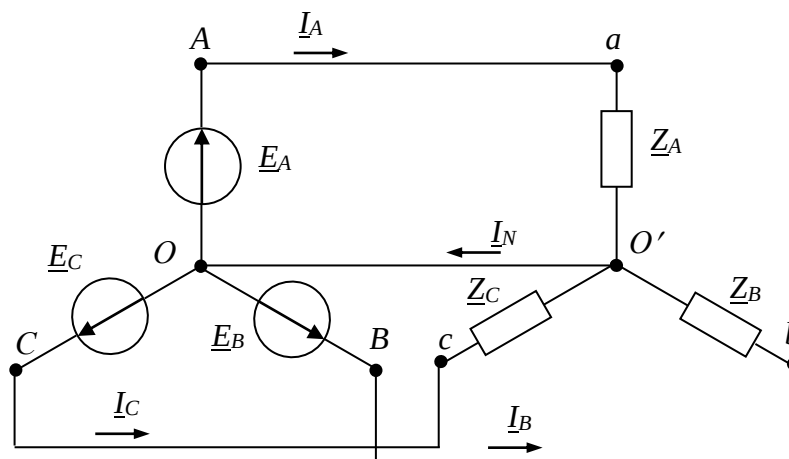


Рис. 5.2 — Схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме звезда – звезда с нулевым проводом

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.

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 [8], 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 [7]:

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

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”.

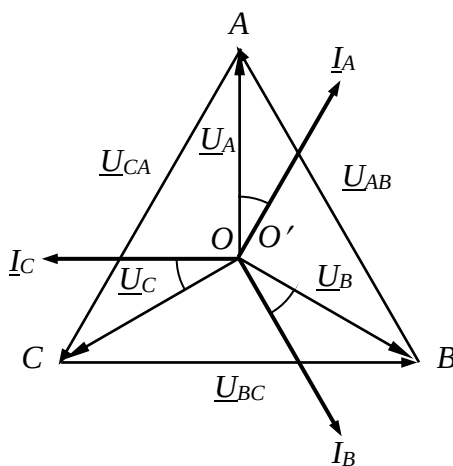


Рис. 5.3 — Векторная диаграмма токов и напряжений для случая симметричной нагрузки, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$) и соединенной по схеме “Звезда”

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 [2]:

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

В соответствии с тем, что при соединении источника с приемником по схеме “Звезда – звезда” линейные токи равны фазным, последние определяются следующим образом:

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

5.5.2 Трехфазные цепи, соединенные по схемам “Звезда – звезда”

с нулевым и без нулевого провода при несимметричном режиме

Для расчета токов в фазах нагрузки при соединении “Звезда – звезда” без нулевого провода целесообразно воспользоваться методом узловых потенциалов. Напряжение между двумя узлами равно [2,5]

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

где $\underline{Y}_A = 1/\underline{Z}_A$, $\underline{Y}_B = 1/\underline{Z}_B$ и $\underline{Y}_C = 1/\underline{Z}_C$ — комплексные проводимости нагрузки и цепей, соединяющих источник с приемником фаз A, B и C.

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

На рисунке 5.4 изображена векторная диаграмма токов и напряжений для схемы звезда–звезда без нулевого провода, а на рисунке 5.5 — с нулевым проводом при несимметричной активной нагрузке.

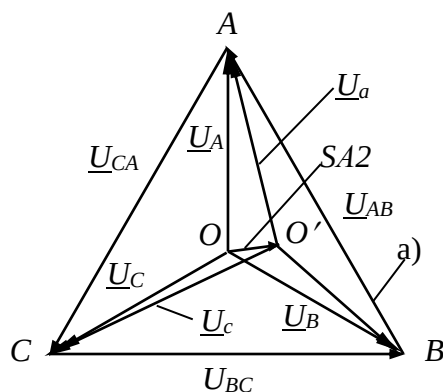


Рис. 5.4 — Векторная диаграмма токов и напряжений для схемы “Звезда – звезда” без нулевого провода

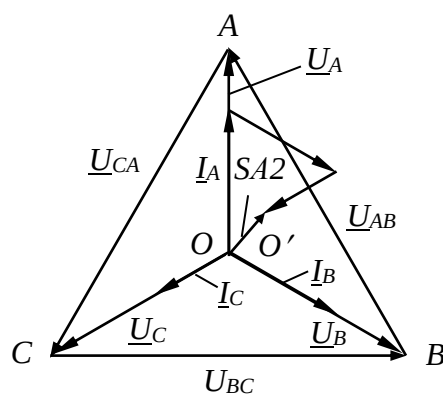


Рис. 5.5 — Векторная диаграмма токов и напряжений для схемы “Звезда – звезда” с нулевым проводом при несимметричной активной нагрузке

В результате такого “перекаса 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. Изменение комплексного сопротивления любой фазы потребителя вызывает изменение напряжения $\underline{U}_{O'O}$, фазных

напряжений и токов других фаз потребителя. При известных значениях напряжений $\underline{U}_{O'O}$, $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ можно построить векторную диаграмму напряжений.

Напряжения на фазах приемника можно найти по выражениям

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

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

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

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

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

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

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 [3].

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.

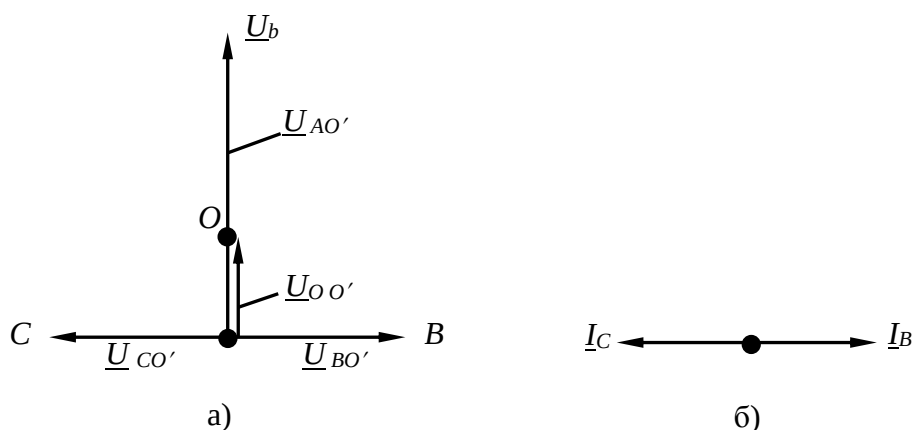


Рис. 5.6 — Векторные диаграммы для схемы “Звезда – звезда” без нулевого провода при обрыве линейного провода от фазы *A* нагрузки:
а) — напряжений; б) — токов

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** [7]. 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

$$U_{AO'} = \left(\frac{3}{2}\right)U_A, \text{ а между нейтральными точками — } U_{OO'} = \frac{U_A}{2} \text{ [7].}$$

5.5.4 Расчет активной, реактивной и полной мощности трехфазного потребителя

Под **активной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму активных мощностей фаз нагрузки [5,7]:

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

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 [5, 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 – 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 [4, 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]:

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

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

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

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 ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ “ТРЕУГОЛЬНИК”

Время: 2 часа.

6.1 Цель работы

6.1.1. Исследование работы трехфазной электрической цепи при соединении потребителя 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.

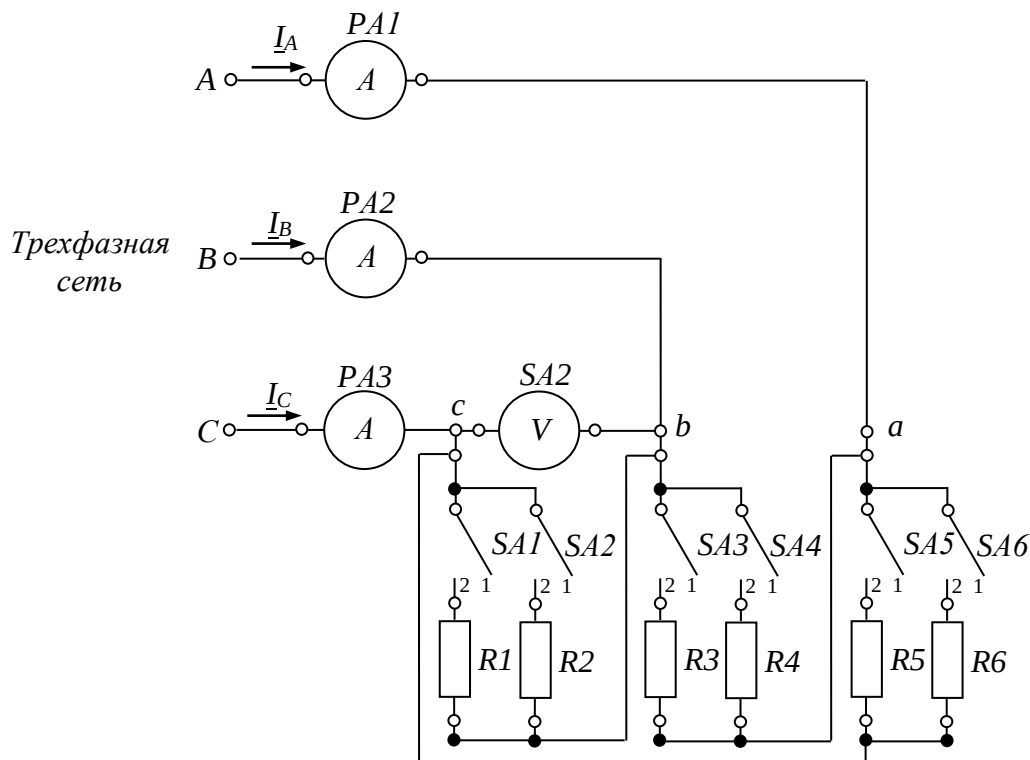


Рис. 6.1 — Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки содержит трехфазный потребитель, имеющий в каждой фазе по два одинаковых активных сопротивления. Эти сопротивления подключаются к соответствующим фазам *a*, *b* и *c* потребителя переключателями SA1—SA6.

Для измерения линейных токов в линейных проводах каждой из фаз установлены амперметры PA1—PA3.

В целях измерения линейных (фазных) напряжений используется вольт-

метр $PV1$. При наличии трех фаз этот прибор подключается к соответствующим точкам схемы установки.

Для измерения 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. Собрать, согласно рисунка 6.1, схему лабораторной установки. Переключатели $SA1$ — $SA6$ поставить в **положение 2**.

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

6.3.3. Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 6.1 при 4-х режимах работы трехфазной цепи.

Таблица 6.1 — Экспериментальные и расчетные данные

Режим	Измерено						Вычислено		
	$U_{ab},$ 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”.

Все переключатели $SA1$ — $SA6$ должны быть поставлены в **положение 2**.

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

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

Для исследования этого режима вначале все переключатели $SA1$ — $SA6$ должны быть поставлены в **положение 2**.

Далее по указанию преподавателя необходимо смоделировать режим несимметричной нагрузки. Для этого второе сопротивление одной из фаз отключить с помощью переключателя $SA2$, $SA4$ или $SA6$.

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 SA1— SA6 в **положение 2**.

С целью имитации обрыва, по указанию преподавателя, отключить одну из фаз с помощью пары переключателей SA1, SA2 или SA3, SA4 (SA5, SA6).

Включить питание установки с помощью соответствующего переключателя на стенде и проводим 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— SA6 в положение 2.

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.

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 (таблица 6.1);
- д) расчеты токов в фазах потребителя (таблица 6.1);
- 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**.

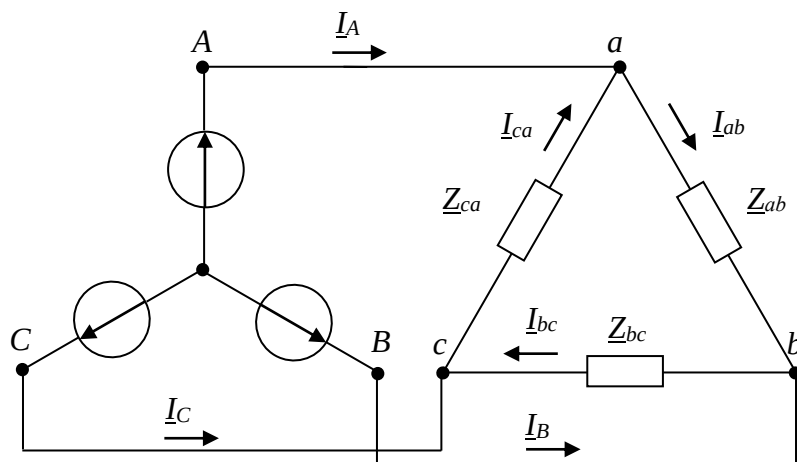


Рис. 6.2 — Схема соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой по схеме “Звезда – треугольник”

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 [5,7]:

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

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

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

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”.

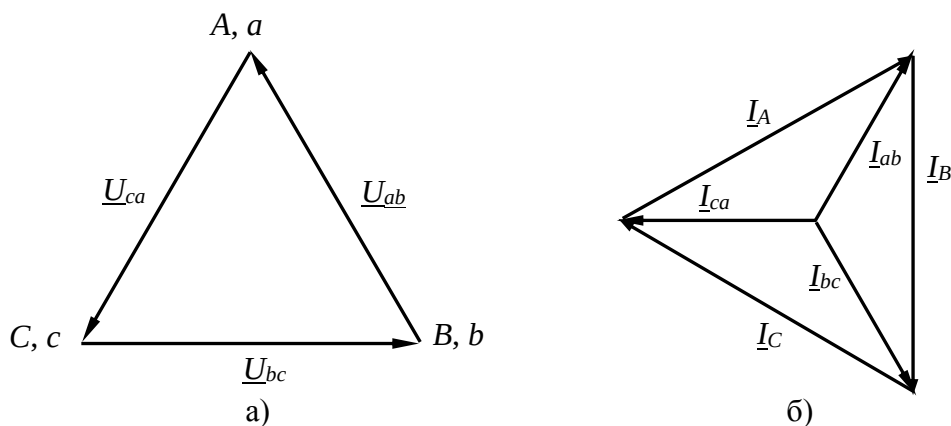


Рис. 6.3 — Векторные диаграммы для схемы, соединенной по схеме “Треугольник” при симметричной нагрузке, имеющей индуктивный характер ($\varphi > 0$): а) — напряжений; б) — токов

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.

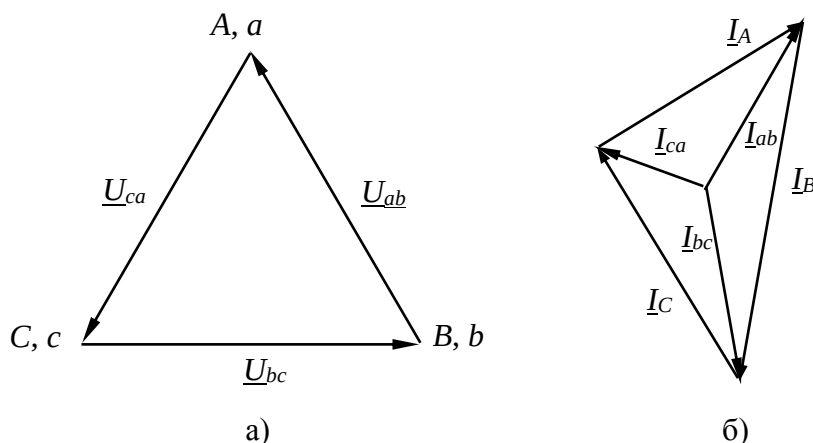


Рис. 6.4 — Векторные диаграммы для схемы, соединенной по схеме “Треугольник”, при несимметричной нагрузке:
а) — напряжений; б) — токов

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).

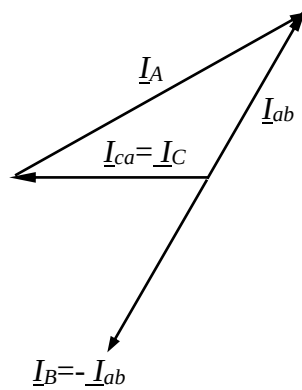


Рис. 6.5 — Векторная диаграмма токов в случае обрыва одной из фаз потребителя

При обрыве линейного провода, например, провода, соединяющего узлы A и a (сети и потребителя), трехфазный потребитель превращается в однофазный, а комплексные сопротивления фаз нагрузки $\underline{Z}_{ca}$ и $\underline{Z}_{ab}$ соединяются последовательно. На рисунке 6.6,а изображена векторная диаграмма напряжений, а на рисунке 6.6,б — векторная диаграмма токов для случая обрыва линейного провода.

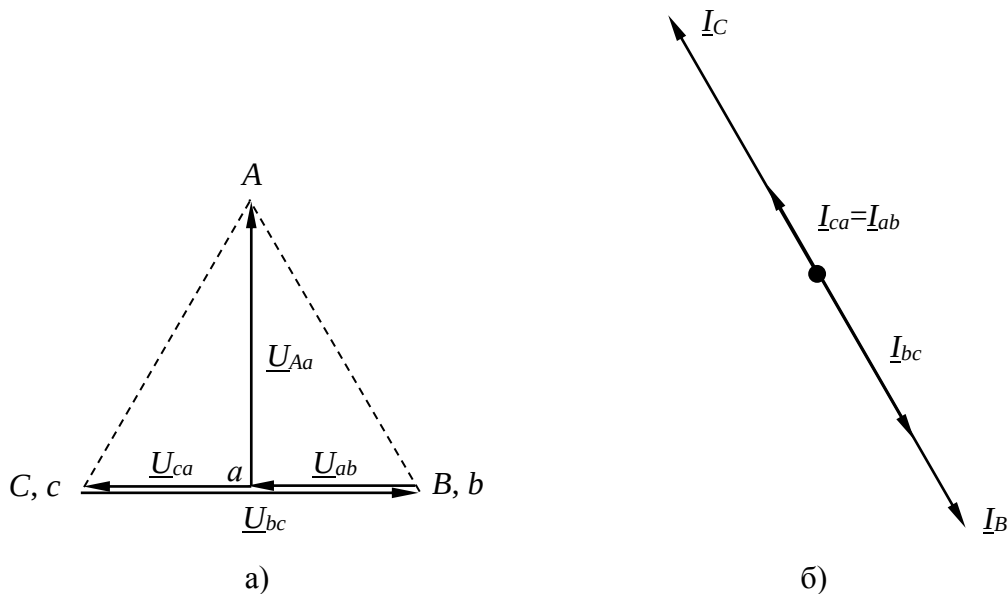


Рис. 6.6 — Векторные диаграммы для схемы, соединенной по схеме “Треугольник”, при обрыве линейного провода: а) — напряжений; б) — токов

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 $c-a$ ($\underline{U}_{ca}$) и $a-b$ ($\underline{U}_{ab}$) 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 $\underline{U}_{bc}$. Во столько же раз уменьшаются токи в этих ветвях: $\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca}$ [5,7].

При построении векторной диаграммы следует вначале отложить вектор тока фазы, оставшейся под линейным напряжением (для нашего случая это ток $\underline{I}_{bc}$). Далее следует отложить токи $\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca}$, 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): $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$; $\underline{I}_B = \underline{I}_C$.

6.5.3 Расчет активной, реактивной и полной мощности трехфазного потребителя

Под **активной мощностью трехфазного потребителя** понимают сумму активных мощностей фаз нагрузки [1, 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 [5,7]:

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

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]:

$$3U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \sqrt{3} U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_L I_L,$$

где U_L – линейное напряжение на нагрузке; I_L – линейный ток нагрузки, поэтому при определении мощностей часто используют следующие выражения [4]:

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_\phi; Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_\phi; S = \sqrt{3} U_L I_L.$$

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?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Время: 2 часа.

7.1 Цель работы

7.1.1. Исследовать режимы работы однофазного трансформатора.

7.1.2. Сделать расчеты параметров схемы замещения приведённого трансформатора и его коэффициента трансформации.

7.1.3. Приобрести практические навыки по работе с однофазным трансформатором.

7.2 Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 7.1.

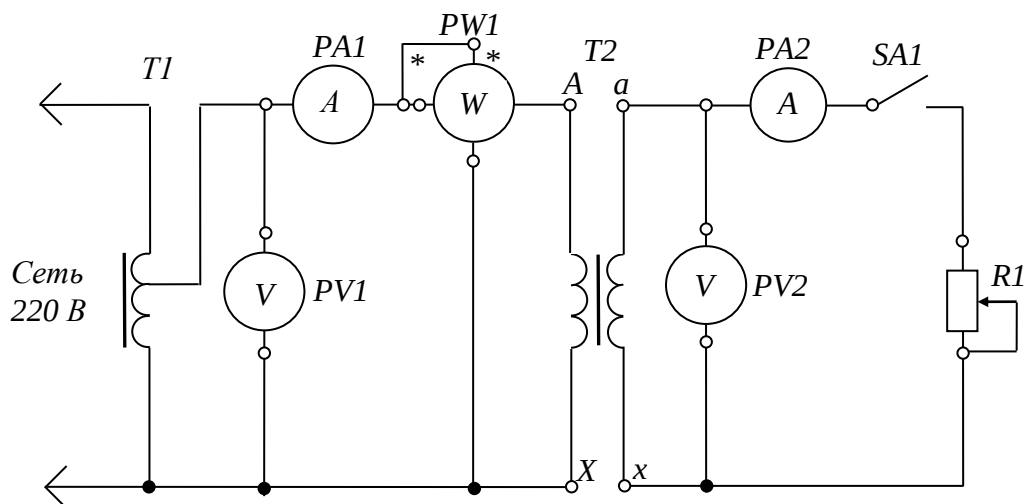


Рис. 7.1 — Схема лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя сам объект исследований — однофазный трансформатор $T2$.

Зажимы первичной обмотки однофазного трансформатора обозначена $A-X$, а вторичной — $a-x$.

Напряжение, подводимое к зажимам $A-X$ первичной обмотки однофазного трансформатора, регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТР) $T1$.

С помощью переключателя $SA1$ к вторичной обмотке трансформатора (клеммы $a-x$) подключается активная нагрузка — реостат $R1$.

В составе установки имеются следующие измерительные приборы:

- амперметры $PA1$ и $PA2$, необходимые для измерения действующих значений тока в первичной и во вторичной обмотках трансформатора, соответственно;

- вольтметры $PV1$ и $PV2$, служащие для измерения действующих значений напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора, соответственно;

- ваттметр $PW1$, предназначенный для измерения активной мощности.

7.3 Порядок выполнения работы

7.3.1 Исследование работы однофазного трансформатора в режиме холостого хода

Для выполнения данного пункта исследований необходимо:

- 1) согласно схеме установки (рисунок 7.1) собрать лабораторную установку;
- 2) переключателем *SA1* отключить нагрузку;
- 3) записать технические данные исследуемого трансформатора в таблицу 7.1;

Таблица 7.1 — Технические данные исследуемого трансформатора

Трансформатор	Тип	$U_{1н}$, В	$I_{1н}$, А	f , Гц	U_{20} , В	$S_{н}$, ВА	U_k , В	η , %

- 4) предъявить собранную установку преподавателю (лаборанту) и, получив от него разрешение, подать питающее напряжение на лабораторную установку;
- 5) с помощью ЛАТР установить напряжение на первичной обмотке трансформатора, равным номинальному $U_1=U_{1н}$ (значение $U_{1н}$ взять из таблицы 7.1);
- 6) записать показания всех приборов в таблицу 7.2;

Таблица 7.2 — Экспериментальные и расчетные данные

Измеренные величины				Вычисленные величины				
U_{10} , В	I_{10} , А	P_0 , Вт	U_{20} , В	$\cos \varphi$	k	z_0 , Ом	R_0 , Ом	x_0 , Ом

- 7) выключить питающее напряжение с лабораторной установки;
- 8) результаты измерений и вычислений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему.

7.3.2 Исследование работы однофазного трансформатора при коротком замыкании нагрузки

Внимание! Во избежание выхода трансформатора из строя необходимо перед проведением данного опыта убедиться, что напряжение на входе трансформатора равно нулю. Для этого следует подать напряжение на лабораторную установку, включив соответствующий автомат на щите питания, и снять показания вольтметра *PV1*. Если показания этого вольтметра ненулевые, то следует, вращая рукоятку регулятора выходного напряжения ЛАТР добиться этих значений. **После этой проверки выключить питание с установки.**

Для исследования работы однофазного трансформатора в опыте короткого замыкания необходимо:

- 1) не нарушая всех соединений в установке после выполнения § 7.3.1 соединить накоротко проводом зажимы *a* и *x* вторичной обмотки трансформатора;

- 2) включить питание установки;
- 3) следя за показаниями амперметра $PA1$, с помощью ЛАТР **медленно** увеличить напряжение на первичной обмотке трансформатора до тех пор, пока ток в первичной обмотке трансформатора не достигнет номинальной величины $I_{1н}$ (значение $I_{1н}$ взять из таблицы 7.1);
- 4) зафиксировать показания приборов, установленных в первичной обмотке трансформатора и занести их значения в таблицу 7.3 бланка отчёта по лабораторной работе;
- 5) отключить питание с лабораторной установки и отсоединить провод, замыкающий разъёмы **a** и **x** вторичной обмотки трансформатора.

Таблица 7.3 — Экспериментальные и расчетные данные

Измеренные величины				Вычисленные величины					
$U_{1к}, В$	$I_{1к}, А$	$P_k, Вт$	$I_{2к}, А$	$\cos\varphi_1$	$z_k, Ом$	$R_k, Ом$	$x_k, Ом$	$R_1, Ом$	$x_1, Ом$

7.3.3 Исследование работы однофазного трансформатора с активной нагрузкой

Для проведения данного пункта исследований необходимо:

- 1) согласно схеме лабораторной установки с помощью переключателя $SA1$ к вторичной обмотке трансформатора подключить активную нагрузку-реостат ($R1$);
- 2) установить на первичной обмотке трансформатора с помощью ЛАТР напряжение U_1 , равное номинальному напряжению первичной обмотки $U_{1н}$ (значение $U_{1н}$ взять из таблицы 7.1);
- 3) изменяя сопротивление реостата $R1$ и фиксируя показания всех приборов, провести 6...8 опытов и занести их значения в таблицу 7.4;
- 4) выключить питание с установки;
- 5) результаты всех опытов, зафиксированных в таблицах 9.1-9.4, предъявить преподавателю и по его указанию разобрать лабораторную установку.

Таблица 7.4

Номер опыта	Измеренные величины				Вычисленные величины				
	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$\cos\varphi_1$	$P_2, Вт$	$\eta, \%$	$\Delta U, \%$

7.4 Примерный план отчёта

В отчёте по лабораторной работе должно быть:

- а) цель работы;
- б) список лабораторного оборудования;
- в) схема лабораторной установки;
- г) таблицы с экспериментальными данными и вычисленными величинами;
- д) графики зависимостей $U_2=f(I_2)$, $\cos\varphi_1=f(I_2)$, $\eta=f(I_2)$;

- е) расчётные формулы;
- ж) выводы по работе, в которых отметить:
 - причины потерь энергии в трансформаторе и его КПД;
 - практический опыт, полученный при выполнении лабораторной работы.

7.5 Основные теоретические положения

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения той же частоты [2].

Действие трансформатора основано на законе электромагнитной индукции и явлении взаимной индукции.

7.5.1 Определение коэффициента трансформации

Важной характеристикой, определяемой в опыте холостого хода трансформатора (нагрузка в опыте отключена), является коэффициент трансформации k . Коэффициент трансформации представляет собой отношение числа витков или ЭДС первичной и вторичной обмоток [2,8]

$$k = \frac{\varpi_1}{\varpi_2} = \frac{E_1}{E_2},$$

где ϖ_1 и ϖ_2 - числа витков, а E_1 и E_2 — значения ЭДС первичной и вторичной обмоток, соответственно.

При холостом ходе трансформатора напряжение на вторичной обмотке равно ЭДС, а напряжение на первичной обмотке трансформатора из-за незначительной величины тока холостого хода весьма мало отличается от значения ЭДС, подаваемого на эту обмотку.

Фактически коэффициент трансформации принимают равным отношению напряжений на первичной и вторичной обмотках при холостом ходе трансформатора [2]:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}},$$

где U_{10} и U_{20} — напряжения на первичной и вторичной обмотках при холостом ходе трансформатора, соответственно.

Из опыта холостого хода можно определить коэффициент мощности трансформатора, ненагруженного потребителем

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1},$$

где U_1 — напряжение на первичной обмотке; I_1 — ток в первичной обмотке и P_1 — мощность, потребляемая первичной обмоткой.

7.5.2 Расчёт параметров приведённой электрической схемы замещения трансформатора

Расчёты режимов работы трансформатора производят с использованием приведённой электрической схемы замещения, изображённой на рисунке 7.2.

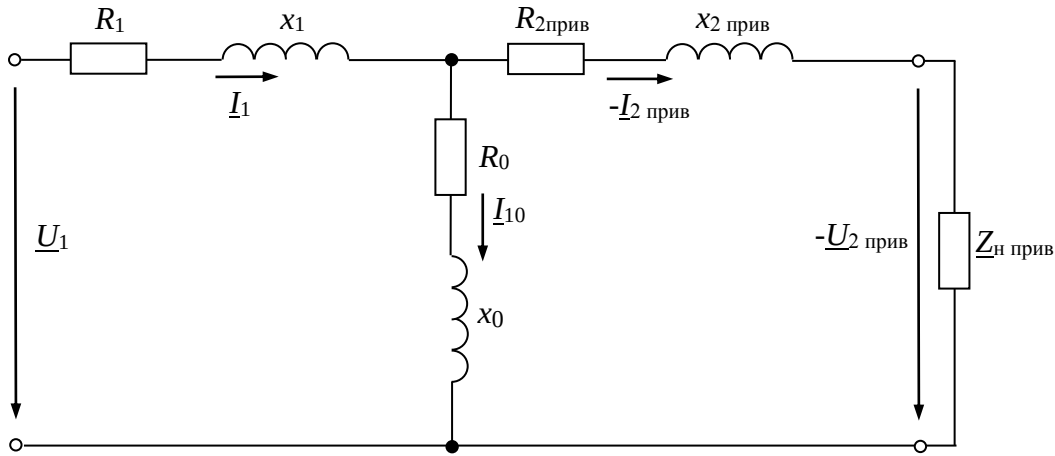


Рис. 7.2 — Приведённая электрическая схема замещения однофазного трансформатора

На изображенной схеме замещения трансформатора различают три ветви: первичную с параметрами первичной обмотки R_1 и x_1 ; вторичную с параметрами приведённой вторичной обмотки $R_{2\text{прив}}$ и $x_{2\text{прив}}$ и приведённой нагрузки $z_{\text{нприв}}$ ($R_{\text{нприв}}$, $x_{\text{нприв}}$) и ветвь намагничивания с параметрами R_0 и x_0 .

Из условий эквивалентности соотношения между приведенными и реальными электрическими величинами вторичной цепи можно записать как

$$E_{2\text{прив}} = kE_2 = E_1; U_{2\text{прив}} = kU_2; I_{2\text{прив}} = \frac{1}{k}I_2; R_{2\text{прив}} = k^2R_2;$$

$$x_{2\text{прив}} = k^2x_2; z_{\text{нприв}} = k^2z_{\text{н}}; R_{\text{нприв}} = k^2R_{\text{н}}; x_{\text{нприв}} = k^2x_{\text{н}}.$$

Для приведённого трансформатора уравнение электрического равновесия подобны таковым для реального трансформатора и имеют в комплексной форме следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{10} + (-I_{2\text{прив}}); \\ U_1 &= -E_1 + I_1R_1 + jI_1x_1; \\ U_{2\text{прив}} &= E_{2\text{прив}} - I_{2\text{прив}}R_{2\text{прив}} - jI_{2\text{прив}}x_{2\text{прив}}. \end{aligned}$$

Параметры приведенной схемы замещения трансформатора обычно определяют косвенным путем по результатам двух опытов, проводимых на реальном трансформаторе: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Из опыта холостого хода по показаниям приборов оказываются известными напряжения на первичной и вторичной обмотках U_{10} и U_{20} , соответственно, ток в первичной обмотке I_{10} и мощность, потребляемая трансформатором P_0 (см. таблицу 7.2). По этим данным определяются параметры ветви намагничивания:

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; x_0 = \sqrt{(z_0^2 - R_0^2)}; z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}.$$

Из опыта короткого замыкания по показаниям приборов становятся известными: напряжение на первичной обмотке $U_{1к}$, ток в первичной обмотке $I_{1к}$ и мощность, потребляемая трансформатором в этом опыте $P_{1к}$.

По этим данным определяются следующие параметры:

$$R_1 \approx R_{2\text{прив}} \approx \frac{R_k}{2}; \quad x_1 \approx x_{2\text{прив}} \approx \frac{x_k}{2},$$

где $R_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; \quad z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; \quad x_k = \sqrt{(z_k^2 - R_k^2)}.$

Следует отметить, что расчёты параметров приведённой схемы трансформатора являются приближёнными, но вполне удовлетворительными по точности.

7.5.3 Определение потерь энергии в трансформаторе и его коэффициента полезного действия

Потери энергии в трансформаторе в основном обусловлены так называемыми потерями в меди и стали. Потери в меди (P_m) связаны с нагревом проводников первичной и вторичной обмоток за счёт протекания по ним токов. Эти потери являются переменными и зависят от величины токов в обмотках или от загрузки трансформатора [8]:

$$P_m \approx \frac{I_1^2}{I_{1н}^2} P_{1к}.$$

Потери энергии от периодического перемагничивания сердечника трансформатора называются потерями в стали ($P_{ст}$). Эти потери зависят от величины магнитной индукции в сердечнике, частоты перемагничивания и веса сердечника. В режиме холостого хода потери в меди незначительны по сравнению с потерями в стали, поэтому потери в стали можно определить по выражению

$$P_{ст} \approx P_{10} - I_{10}^2 R_1,$$

где P_{10} — мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе; R_1 — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора. В режиме короткого замыкания потери в стали являются незначительными по сравнению с потерями в меди.

Активная мощность, переданная потребителю, определяется по следующему выражению

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

В свою очередь мощность, подведённая к первичной обмотке трансформатора, определится как

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

или

$$P_1 = P_2 + P_{ст} + P_m.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется по следующему выражению

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

В режиме холостого хода КПД трансформатора равен нулю.

Если ток в нагрузке трансформатора больше номинального ($I_2 > I_{2н}$), то растут потери в меди и КПД трансформатора снижается.

7.5.4 Внешняя характеристика трансформатора

Примерный вид внешней характеристики при различной по характеру нагрузке изображён на рисунке 7.3.

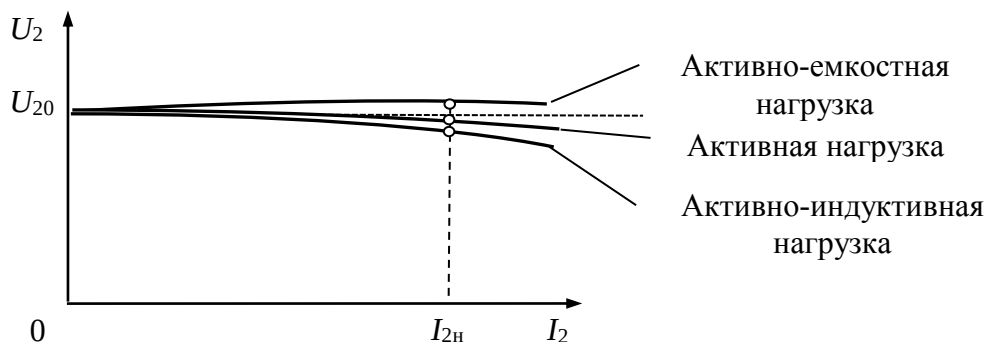


Рис. 7.3 — Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора $U_2 = f(I_2)$ позволяет судить об изменении напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100\%,$$

где U_{20} — напряжение на зажимах вторичной обмотке трансформатора при холостом ходе, а U_2 — напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при подключенной нагрузке. Данная характеристика снимается при постоянном значении коэффициента мощности нагрузки.

7.6 Контрольные вопросы

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каков порядок выполнения лабораторной работы?
3. Как устроен трансформатор?
4. Какие физические принципы лежат в работе трансформатора?
5. Что представляет из себя эквивалентная приведённая электрическая схема замещения трансформатора?
6. Что такое внешняя характеристика трансформатора и как зависит она от характера нагрузки?
7. Для чего необходимы опыты холостого хода и короткого замыкания при исследовании рабочих свойств трансформатора?
8. Что такое потери в меди и стали?
9. От чего зависит КПД трансформатора?
10. Какие бывают виды трансформаторов?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Время: 2 часа.

8.1 Цель работы

8.1.1. Исследование принципов действия и основных характеристик схем выпрямления однофазного переменного напряжения.

8.1.2. Исследование характеристик емкостного фильтра в схеме выпрямителя.

8.1.3. Приобрести практические навыки по работе с выпрямителями.

8.2 Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 8.1.

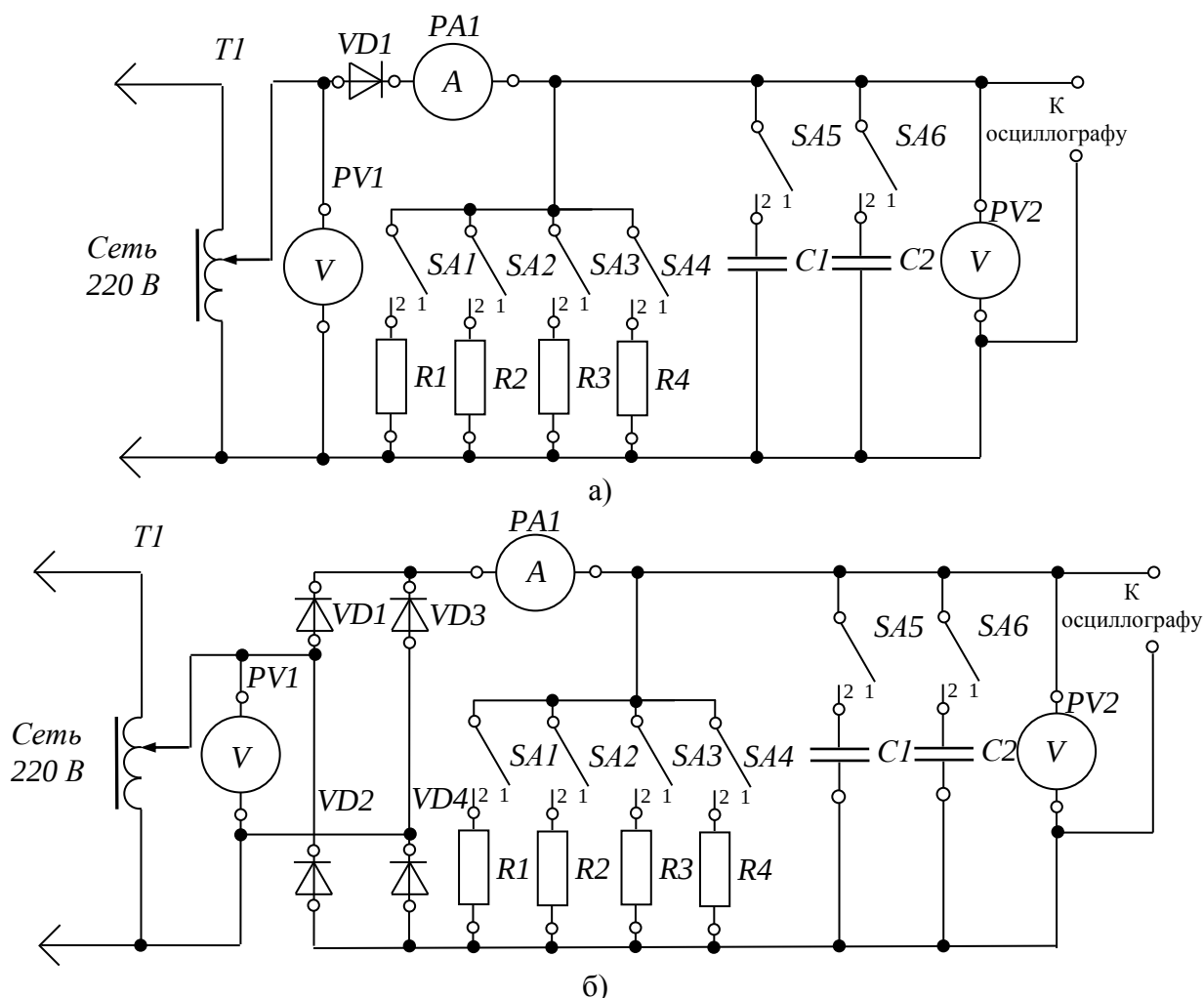


Рис. 8.1 — Схема лабораторной установки:

а) — однополупериодная схема выпрямителя;

б) — двухполупериодная мостовая схема выпрямителя

Лабораторная установка включает однополупериодную и двухполупериодную мостовую схемы выпрямителей. Напряжение на входе исследуемых цепей регулируется лабораторным автотрансформатором $T1$. Лабораторная установка содержит элементы цепи: сопротивления $R1-R4$, которое является нагрузкой.

зочным, конденсатор $C1$ ($C2$), выполняющий роль фильтра вместе с сопротивлением нагрузки. Выпрямление переменного напряжения в схеме рисунка 8.1,а осуществляется с помощью полупроводникового диода $VD1$, а в схеме рисунка 8.1,б — диодов $VD1$ - $VD4$. В составе установки имеются следующие измерительные приборы:

- вольтметр $PV1$, служащий для измерения действующих значений переменного напряжения;
- вольтметр $PV2$, измеряющий среднее значение выпрямленного напряжения;
- амперметр $PA1$, измеряющий среднее значение выпрямленного тока;
- осциллограф (на схеме не показан), предназначенный для наблюдения формы выходного напряжения.

8.3 Порядок выполнения работы

8.3.1. Ознакомиться с элементами лабораторной установки.

8.3.2. Определить значения сопротивлений $R1$ - $R4$, подав на них через амперметр заданное значение переменного напряжения.

8.3.3. Собрать схему лабораторной установки, содержащую схему **однополупериодного выпрямителя**, изображенную на рисунке 8.1,а.

8.3.4. Ручку автотрансформатора установить в такое положение, чтобы напряжение на входе цепи было минимальным.

8.3.5. Предъявить для проверки собранную лабораторную установку преподавателю и получить от него разрешение на включение схемы под напряжение.

8.3.6. Включить лабораторную установку под питание соответствующим выключателем на щитке питания и установить заданное напряжение по указанию преподавателя (порядка 20...30 В).

8.3.6. Переключатели $SA5$ и $SA6$ установить в **положение 1**, отключив конденсаторы $C1$ и $C2$ от схемы.

8.3.7. Снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой $U_0=f(I_0)$. Для этого провести измерения средних значений выпрямленного тока и напряжения, используя амперметр $PA1$ и вольтметр $PV2$. Дискретно, изменяя сопротивление нагрузки путем параллельного подключения дополнительных сопротивлений нагрузки, установить по очереди переключатели $SA1$ - $SA4$ в положение 2 в 4-х опытах.

Зафиксировать показания приборов и записать их в таблицу 8.1.

8.3.8. Подключить вход осциллографа к нагрузке и зарисовать осциллограммы выпрямленного напряжения.

8.3.9. Повторить опыты п. 8.3.7, но с подключенной емкостной нагрузкой. Для этого **переключатели $SA5$ и $SA6$** установить в **положение 1** и провести измерения средних значений выпрямленного тока I_0 и напряжения U_0 вначале при значении емкости конденсатора 10 мкФ, а затем при значении 20 мкФ.

Зафиксировать показания приборов и записать их значения в таблицу 8.1.

8.3.10. Подключить вход осциллографа к нагрузке и зарисовать осциллограммы выпрямленного напряжения.

Таблица 8.1 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	$U_{вх}, В$	$R_n, Ом$	$C_n, мкФ$	$U_0, В$	$I_0, А$
Исследование однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой					
1					
⋮					
4					
Исследование однополупериодного выпрямителя с емкостной нагрузкой ($C1$)					
1					
⋮					
4					
Исследование однополупериодного выпрямителя с емкостной нагрузкой ($C1, C2$)					
1					
⋮					
4					

8.3.11. Исследовать работу **двухполупериодного мостового выпрямителя**. Для этого собрать схему лабораторного установки, изображенную на рисунке 8.1,б. Провести исследования повторив опыты п. 8.3.6-8.3.10.

Зафиксировать показания приборов и записать их показания в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 — Экспериментальные данные

Номер отсчетов	$U_{вх}, В$	$R_n, Ом$	$C_n, мкФ$	$U_0, В$	$I_0, А$
Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя с активной нагрузкой					
1					
⋮					
4					
Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостной нагрузкой ($C1$)					
1					
⋮					
4					
Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостной нагрузкой ($C1, C2$)					
1					
⋮					
4					

8.3.12. Выключить приборы. Результаты измерений предъявить преподавателю и по его указанию разобрать схему лабораторной установки.

8.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- цель работы;
- схема лабораторной установки с номинальными данными элементов лабораторной установки;
- список лабораторного оборудования;
- экспериментальные данные измерений;
- осциллограммы выходного напряжения для однополупериодного и мо-

стового выпрямителя без фильтра и с емкостным фильтром (для двух значений емкости конденсатора);

е) выводы по лабораторной работе.

8.5 Основные теоретические положения

Производство и распределение электрической энергии, вырабатываемой электрическими станциями, осуществляется на переменном токе. Это связано с тем, что трансформация переменного тока значительно проще и дешевле, чем постоянного тока. Вместе с тем, для электропитания всевозможных устройств, работающих на постоянном токе, в том числе электронных устройств, требуются устройства, преобразующие переменное напряжение в постоянное.

Устройство, которое преобразует переменный ток в постоянный, называется **выпрямителем**.

На рисунке 8.2 изображена функциональная схема однофазного выпрямителя. В схему выпрямителя входят: силовой трансформатор, вентильный блок, сглаживающий фильтр и цепь нагрузки.

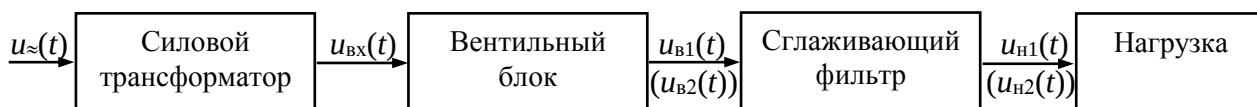


Рис. 8.2 — Функциональная схема однофазного выпрямителя

Силовой трансформатор используется для преобразования по величине напряжения сети $u_{\text{с}}(t)$ до значения $u_{\text{вх}}(t)$, необходимого для выпрямления, а также осуществления гальванической развязки питающей сети с нагрузкой. Вентильный блок преобразует переменное напряжение $u_{\text{вх}}(t)$ в постоянное по знаку напряжение с некоторым уровнем пульсаций $u_{\text{в1}}(t)$ (или $u_{\text{в2}}(t)$). Уровень таких пульсаций определяется числом фаз питающей сети и выбранной схемой выпрямителя. Причем, напряжение $u_{\text{в1}}(t)$ соответствует выпрямленному напряжению исследуемой однофазной однополупериодной схемы выпрямления, а напряжение $u_{\text{в2}}(t)$ — выпрямленному напряжению с однофазной двухполупериодной мостовой схемой выпрямления. Вентильный блок состоит из набора нелинейных двухполюсников, пропускающих ток преимущественно в одном (прямом) направлении. В идеальном случае вентиль обладает нулевым сопротивлением для прямого тока и бесконечно большим сопротивлением для обратного тока. В схемах неуправляемых выпрямителей используются полупроводниковые диоды. При выборе выпрямительных диодов используются максимально допустимые параметры: ток прямой максимально допустимый и напряжение обратное максимально допустимое.

Полупроводниковые выпрямители различают по следующим признакам:

- по числу фаз источника (однофазные, многофазные);
- по выходной мощности (малой мощности — порядка до 0,6 кВт, средней мощности — до 100 кВт и большой мощности — свыше 100 кВт);
- по коэффициенту пульсаций $K_{\text{п}}$, определяемым числом полупериодов протекания тока во вторичной обмотке трансформатора за полный период входного напряжения $u_{\text{вх}}(t)$;

— по числу импульсов постоянного знака в кривой выпрямленного напряжения за период питающего напряжения (однополупериодные, двухполупериодные, n -полупериодные).

В управляемых выпрямителях в качестве вентилей используются тиристоры, транзисторы и т.д.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения (тока) до значения, допустимого для работы нагрузки, служит сглаживающий фильтр.

К основным параметрам, характеризующим качество работы выпрямителя, относят следующие.

1. Средние значения выпрямленного (выходного) напряжения (U_0) и тока (I_0) в нагрузке.

2. Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения K_n , определяемый как

$$K_n = \frac{U_{1m}}{U_0},$$

где U_{1m} — амплитуда первой гармоники, содержащейся в выпрямленном напряжении,

3. Внешняя характеристика выпрямителя — зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения выпрямленного тока

$$U_0 = f(I_0).$$

По этой характеристике можно определить выходное сопротивление выпрямителя при номинальных значениях выпрямленного тока и напряжения по формуле

$$R_{\text{вых}} = \frac{-\Delta U_0}{\Delta I_0}.$$

3. Мощность постоянного тока в нагрузке

$$P_0 = U_0 I_0.$$

4. Коэффициент полезного действия выпрямителя с учетом потерь $P_{\text{пот}}$ в элементах выпрямителя, включающих потери в диодах, сглаживающем фильтре и в сетевом трансформаторе

$$\eta = \frac{P_0}{(P_0 + P_{\text{пот}})}.$$

5. Угол отсечки тока диодов выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку

$$\theta = \tau_{\text{и}} / T_{\text{и}},$$

где $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса тока через диод, а $T_{\text{и}}$ — период повторения импульсов тока через диод. Углом отсечки θ тока диода называется половина времени, в течение которого во вторичной фазной обмотке и диоде (диодах) протекает ток.

На рисунке 8.3,а изображена схема однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой, а на рисунке 8.3,б — с емкостным фильтром. Рассмотрим принцип работы однополупериодного выпрямителя. Полупроводниковый диод

обладает свойством проводить ток только в течение одной половины периода переменного напряжения.

В положительный полупериод, когда на аноде диода $VD1$ положительный потенциал, он открывается, все напряжение прикладывается к сопротивлению нагрузки. В отрицательный полупериод диод закрыт, ток через него равен нулю, а все приложенное напряжение вторичной обмотки трансформатора прикладывается к диоду. Ток в цепи нагрузки является пульсирующим (неизменным по направлению, но изменяющимся по значению).

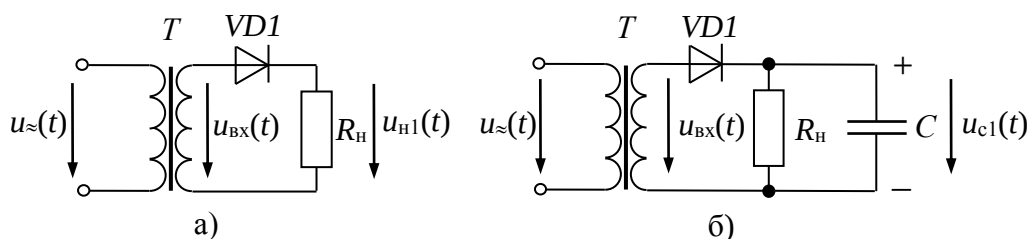


Рис. 8.3 — Схема однополупериодного выпрямителя:
а) — с активной нагрузкой; б) — с емкостным фильтром

На рисунке 8.4, а изображены временные диаграммы входного напряжения, а на рисунках 8.4, б-в и 8.4, г-д — временные диаграммы тока и напряжения однополупериодного и двухполупериодного мостового выпрямителей соответственно.

Напряжение, подводимое к выпрямителю, имеет гармоническую форму

$$u_{\text{вх}}(t) = U_m \sin \omega t .$$

После процесса выпрямления постоянная составляющая выпрямленного тока в нагрузке за период (среднее значение выпрямленного тока) в схеме однополупериодного выпрямителя примет значение

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi} = 0,318 I_m ,$$

а постоянная составляющая выпрямленного напряжения (среднее значение выпрямленного напряжения), с учетом выражения для тока, примет значение

$$U_0 = R_{\text{н}} I_0 = \frac{I_m}{\pi} R_{\text{н}} = \frac{U_m}{\pi} = 0,318 U_m \approx 0,45 U_{\text{вх}} ,$$

где $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки.

Выпрямленное напряжение имеет несинусоидальную форму сигнала, поэтому может быть разложено в ряд Фурье

$$U_{\text{н}} = U_0 \left(1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 3\omega t + \dots \right) .$$

Вследствие того, что частота пульсаций выпрямленного напряжения равна частоте сети, то при расчете коэффициента пульсаций берут напряжение основной первой гармоники

$$K_{\text{н}} = \frac{U_{1\text{м}}}{U_0} = \frac{\frac{\pi}{2} U_0}{U_0} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57 .$$

Выпрямленное напряжение с такими значительными пульсациями, как правило, не пригодно для практических целей.

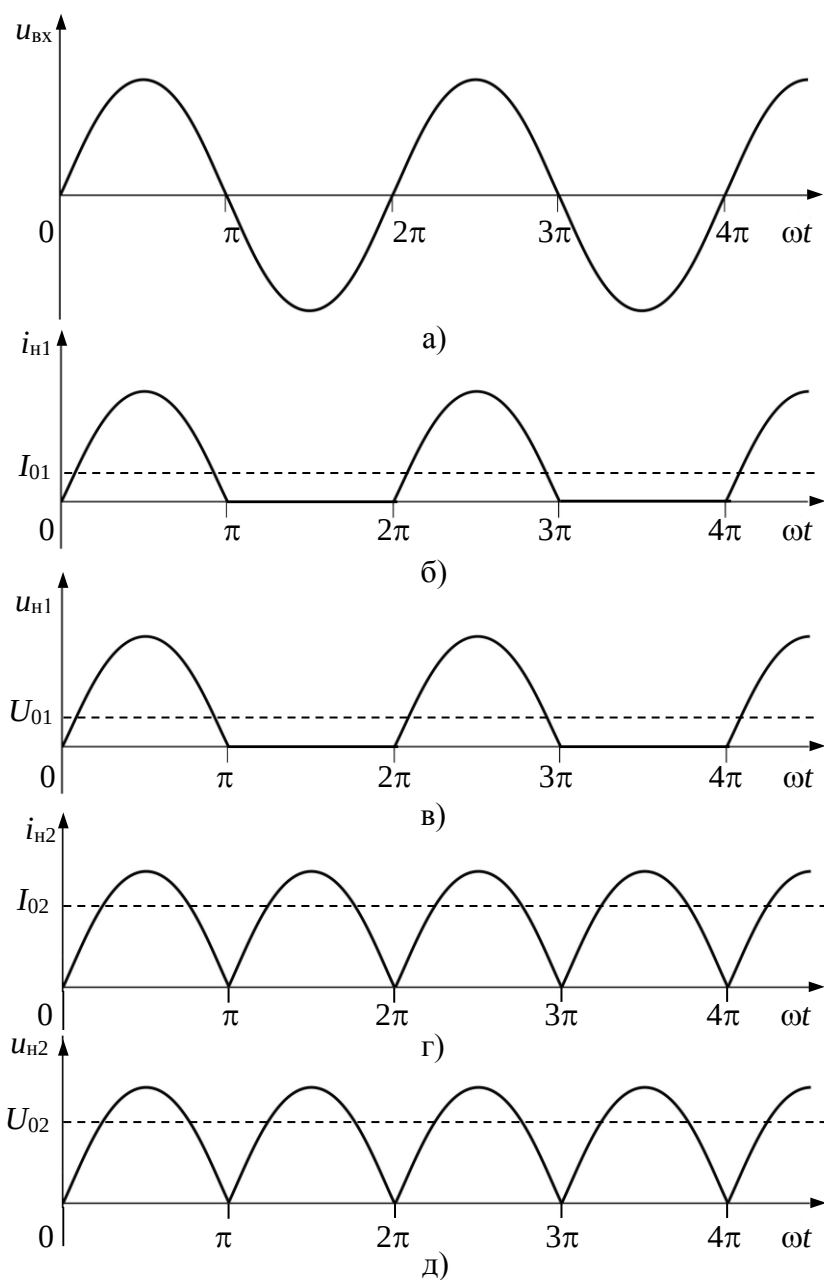


Рис. 8.4 — Временные диаграммы: а) — входного напряжения; б), в) — тока и напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой; г), д) — тока и напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя с активной нагрузкой

Для уменьшения коэффициента пульсаций используются двухполупериодные схемы выпрямления, среди которых наибольшее применение получили двухполупериодные мостовые схемы выпрямителей. На рисунке 8.5, а изображена схема двухполупериодного мостового выпрямителя с активной нагрузкой, а на рисунке 8.5, б — с емкостным фильтром. Выпрямитель, выполненный по мостовой схеме, позволяет получить двухполупериодное выпрямление переменного тока. В этой схеме в течение одного полупериода ток пропускают дио-

ды $VD1$ и $VD4$, при этом диоды $VD2$ и $VD3$ являются закрытыми. В следующий полупериод будут проводить ток соответственно диоды $VD2$ и $VD3$, а диоды $VD1$ и $VD4$ будут закрытыми, то есть не будут проводить ток. Направление тока в цепи нагрузки в течение обоих полупериодов переменного напряжения при этом не меняется.

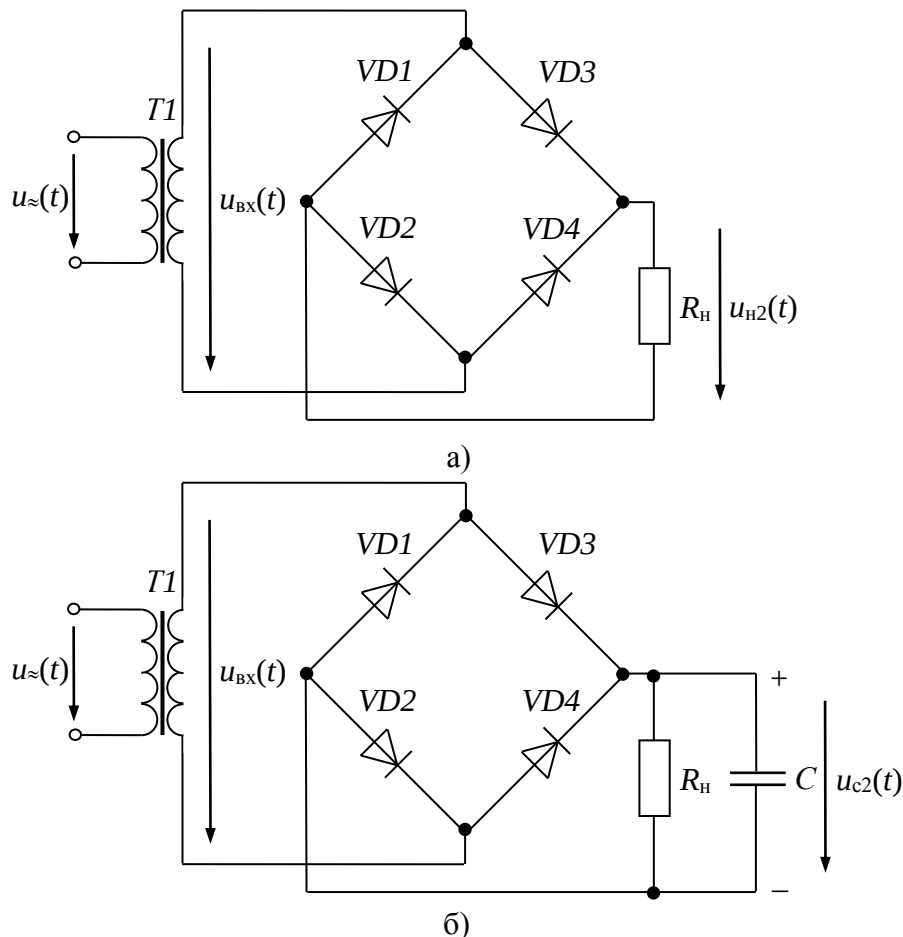


Рис. 8.5 — Схема двухполупериодного мостового выпрямителя:

а) — с активной нагрузкой; б) — с емкостным фильтром

Средние значения выпрямленного тока и напряжения для мостовых схем имеют значения

$$I_0 = \frac{0,9U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{н}}}, U_0 = \frac{2U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_{\text{ВХ}}}{\pi} \approx 0,9U_{\text{ВХ}}.$$

Выпрямленное напряжение имеет несинусоидальную форму сигнала, и может быть разложено в ряд Фурье

$$U_{\text{н}} = U_0 \left(1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 3\omega t + \dots \right).$$

Для данной схемы коэффициент пульсаций примет значение

$$K_{\text{п}} = \frac{\frac{2}{3}U_0}{U_0} \approx 0,67.$$

Ввиду более низкого значения коэффициента пульсаций мостовая схема выпрямления получила широкое применение в схемах однофазных выпрямителей.

В качестве сглаживающих фильтров в схемах выпрямителей используются фильтры нижних частот, состоящие в простейшем случае из последовательно включаемых резистора или сглаживающего дросселя и параллельно включаемых конденсаторов. На рисунках 8.6, а,б изображены временные диаграммы напряжения и тока ($i_{д1}$) однофазного однополупериодного выпрямителя с фильтром, а на рисунках 8.6, в,г — напряжения и тока ($i_{д2}$) однофазного мостового выпрямителя с фильтром соответственно.

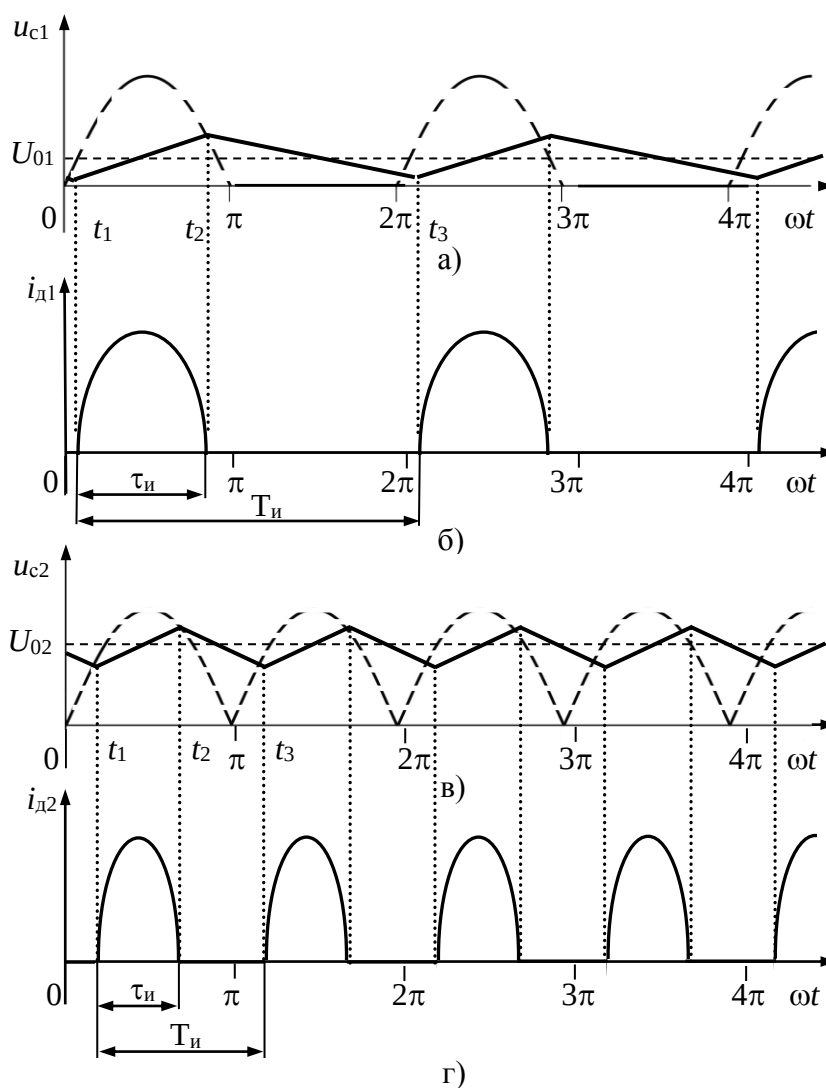


Рис. 8.6 — Временные диаграммы:

- а) — напряжения на выходе однофазного однополупериодного выпрямителя с фильтром; б) — тока на выходе однофазного однополупериодного выпрямителя с фильтром;**
- в) — напряжения на выходе однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя с фильтром; г) — тока на выходе однофазного однополупериодного выпрямителя с фильтром**

В схемах выпрямителей малой мощности в качестве сглаживающего филь-

тра достаточно использовать блок конденсаторов требуемой емкости. Для значительного снижения уровня пульсаций постоянного напряжения во вторичных источниках питания используется дополнительно стабилизатор напряжения (на схеме не показан).

Параметры схемы однополупериодного выпрямителя резко изменяются при подключении конденсатора параллельно сопротивлению нагрузки R_n . В работе однофазного однопериодного выпрямителя выделяют два цикла. За время первого цикла (t_1-t_2) конденсатор заряжается током диода примерно до амплитудного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора. Ток через диод будет протекать только в интервалы времени, когда заряжается конденсатор. Чем больше емкость конденсатора, тем меньше время работы диода, а амплитуда тока больше.

За время второго цикла (t_2-t_3) конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки до минимального значения напряжения на конденсаторе.

Скорость заряда конденсатора определяется постоянной времени заряда

$$\tau_3 = RC,$$

где $R = R_d + R_T$, R_d и R_T — внутреннее сопротивление диода и сопротивление обмотки трансформатора соответственно. В свою очередь, скорость разряда определяется постоянной времени разряда $\tau_p = R_n C$, причем $R_n \gg R$.

При неизменной величине емкости конденсатора и при увеличении сопротивления нагрузки угол отсечки тока θ будет уменьшаться. В схеме однополупериодного однофазного выпрямителя с активной нагрузкой угол отсечки $\theta = 90^\circ$.

При подключении конденсатора параллельно сопротивлению нагрузки увеличивается среднее значение напряжения U_0 , уменьшается угол отсечки тока и резко возрастает импульс тока через диод. Среднее значение тока I_0 через диод оказывается значительно ниже максимального тока через диод. В результате диод в схеме выпрямителя с нагрузкой и конденсатором используется не полностью.

На рисунке 8.7 изображены внешние характеристики однополупериодного выпрямителя с активной и емкостной нагрузкой. Крутой спад внешней характеристики выпрямителя с RC -нагрузкой при возрастании тока I_0 при уменьшении сопротивления нагрузки R_n объясняется уменьшением постоянной времени разряда конденсатора τ_p .

Для двухполупериодной мостовой схемы процесс выпрямления и получения постоянного напряжения будет

аналогичным, но охватывающим по времени уже два полупериода.

Из анализа временных диаграмм видно, что с изменением емкости конденсатора C_f будет изменяться значение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения. При этом, чем за меньшее время разрядится конденсатор, тем

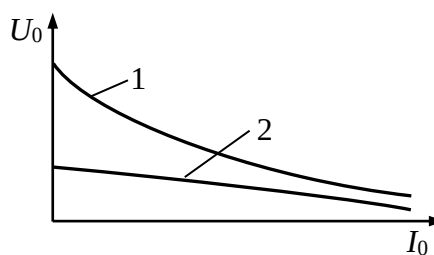


Рис. 8.7 — Внешние характеристики выпрямителя: 1 — с емкостной нагрузкой; 2 — с активной нагрузкой

меньше будут пульсации в выпрямленном токе. Для выбора конденсатора необходимо рассчитать его емкость и рабочее напряжение. Емкость конденсатора фильтра, в случае малых пульсаций для однополупериодного выпрямителя, определяется по выражению

$$C_{\phi} \geq \frac{1}{2 f_c R_n K_n},$$

где f_c — частота сетевого напряжения.

Для двухполупериодной схемы емкость конденсатора фильтра определяется по формуле

$$C_{\phi} \geq \frac{1}{4 f_c R_n K_n}.$$

Существенным недостатком однофазного однополупериодного выпрямителя является вынужденное подмагничивание сердечника трансформатора. Это происходит вследствие того, что выпрямленный ток течет по обмотке в одну и ту же сторону, приводящий к возникновению дополнительного магнитного потока. В результате увеличиваются габариты сердечника трансформатора и снижается коэффициент использования обмоток. В свою очередь, в мостовой схеме вторичная обмотка трансформатора используется дважды за период питающего напряжения. При этом коэффициент использования вторичной фазной обмотки увеличивается примерно вдвое по сравнению с однополупериодной схемой равной мощности. Токи вторичной фазной обмотки в течение первой и второй половины периода питающего напряжения текут навстречу, поэтому в схеме отсутствует подмагничивание сердечника силового трансформатора. Это уменьшает габаритную мощность трансформатора.

8.6 Контрольные вопросы

1. Какими показателями характеризуется работа выпрямителя?
2. Чем определяется фазность схем выпрямления?
3. Каков принцип действия однофазного однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой?
4. Для каких целей служит в схеме выпрямителя сглаживающий фильтр?
5. От каких параметров зависит коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения?
6. Как изменяется угол отсечки тока с подключением фильтрующего конденсатора?
7. Каков принцип действия однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя с активной нагрузкой?
8. В чем заключаются преимущества двухполупериодного мостового выпрямителя по отношению к однополупериодной схеме выпрямителя?
9. Как можно снять внешнюю характеристику выпрямителя?
10. От каких параметров зависит значение емкости конденсатора, служащего для сглаживания пульсаций выходного напряжения?

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Время: 2 часа.

9.1 Цель работы

9.1.1. Изучение принципа работы одиночного усилительного каскада.

9.1.2. Снятие амплитудных и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) одиночного усилительного каскада в зависимости от значений элементов схемы усилителя.

9.1.3. Получение практических навыков при пользовании измерительными приборами.

9.2 Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки изображена на рисунке 9.1.

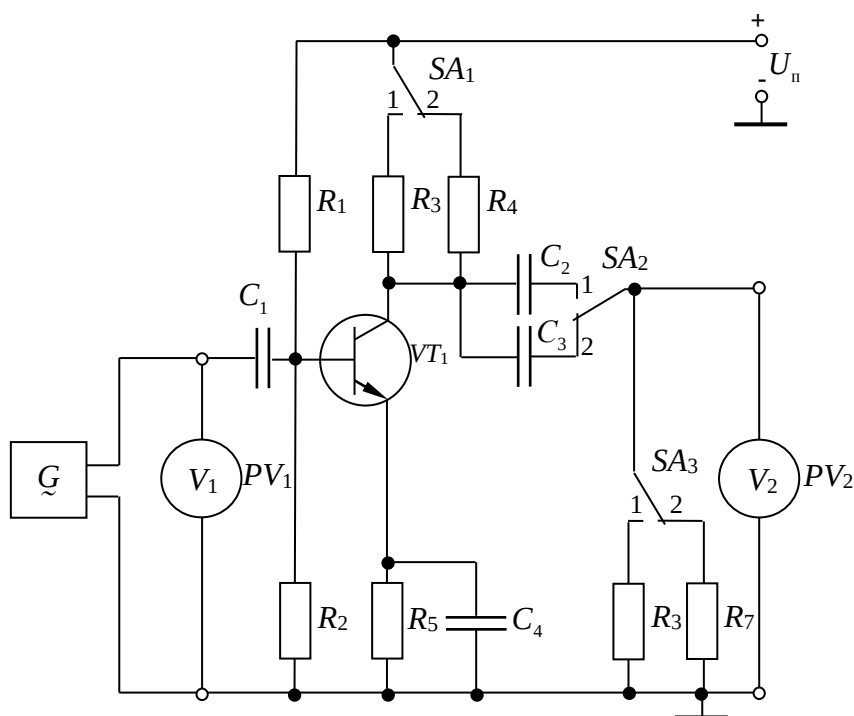


Рис. 9.1 — Схема лабораторной установки

В состав лабораторного оборудования входят следующие приборы:

— лабораторный стенд со схемой лабораторной установки и блоком питания;

— цифровые вольтметры PV_1 и PV_2 типа Щ4313 (В7-22);

— генератор сигналов низкочастотный ГЗ-102.

Стенд, на котором размещена лабораторная установка содержит источник постоянного напряжения на 12 В, включаемый с помощью тумблера на панели стенда. Все элементы лабораторной установки, за исключением цифровых вольтметров PV_1 и PV_2 , находятся на лабораторном стенде. Подключение внешних цифровых вольтметров PV_1 и PV_2 типа Щ4313 осуществляется с помощью высокочастотных соединительных кабелей.

Для снятия характеристик усилительного каскада к входу усилительного каскада подключается низкочастотный генератор G .

9.3 Порядок выполнения работы

9.3.1. Собрать, согласно рисунку 2.1, схему лабораторной установки.

9.3.2. Переписать со стенда номиналы элементов усилителя и значение напряжения источника питания.

9.3.3. Снять амплитудные характеристики одиночного усилительного каскада при разных положениях переключателей SA_1 , SA_2 и SA_3 .

Первую амплитудную характеристику одиночного усилительного каскада следует снять при переведенных в положение «1» переключателей SA_1 , SA_2 , SA_3 .

Для снятия амплитудной характеристики необходимо установить частоту низкочастотного генератора, равной 1000 Гц.

Далее, изменяя напряжение с выхода генератора в диапазоне 10 мВ...0,5 В, с помощью вольтметра PV_2 фиксировать с выхода каскада напряжение $U_{\text{вых}}$. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ измерять с помощью вольтметра PV_1 .

Провести 10 измерений. Результаты измерений занести в таблицу 9.1.

9.3.4. Снять амплитудную характеристику одиночного усилительного каскада при положении переключателя SA_1 в положении «2», повторив опыты согласно § 9.3.3. Результаты измерений для построения амплитудной характеристики занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 — Результаты измерений для построения амплитудной характеристики

№ опыта	Все переключатели (SA_1 , SA_2 , SA_3) в положении 1			Переключатели SA_2 и SA_3 в положении 1, переключатель SA_1 в положении 2		
	Измерено		Вычислено	Измерено		Вычислено
	$U_{\text{вх}}$, В	$U_{\text{вых}}$, В		$U_{\text{вх}}$, В	$U_{\text{вых}}$, В	
1						
⋮						
10						

9.3.5. Снять АЧХ одиночного усилительного каскада при разных положениях переключателей SA_1 , SA_2 и SA_3 .

Первую АЧХ одиночного усилительного каскада следует снять при переведенных в положение «1» переключателей SA_1 , SA_2 , SA_3 .

Для снятия АЧХ каскада необходимо установить неизменным действующее значение напряжения на его входе $U_{\text{вх}}$ в диапазоне значений 10...50 мВ. Для измерения входного напряжения $U_{\text{вх}}$ следует использовать вольтметр PV_1 .

Далее, изменяя частоту выходного сигнала генератора, одновременно следует измерять действующее значение напряжения на выходе усилителя $U_{\text{вых}}$.

Значение частоты выходного сигнала генератора следует менять в диапазоне от 10 Гц до 200 кГц. Провести 10 измерений.

Результаты измерений для построения АЧХ занести в таблицу 9.2.

9.3.6. Снять АЧХ одиночного усилительного каскада при положении переключателя SA_2 в положении «2», повторив опыты согласно § 9.3.5. Результаты измерений занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 — Результаты измерений для построения АЧХ

№ опыта	Все переключатели (SA_1, SA_2, SA_3) в положении 1				Переключатели SA_1 и SA_3 в положении 1, переключатель SA_2 в положении 2			
	f , Гц	$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	K_U	f , Гц	$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	K_U
1								
⋮								
10								

9.3.7. По результатам измерений, произведенных в § 9.3.3 — 9.3.6, рассчитать коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада:

$$K_U = \frac{U_{вх}}{U_{вых}}.$$

Результаты расчетов занести в таблицы 9.1 и 9.2.

9.4 Примерный план отчета

В отчете по лабораторной работе должно быть:

- название и цель работы;
- схема лабораторной установки;
- список лабораторного оборудования;
- результаты измерений и вычислений (таблицы 9.1 и 9.2);
- графики амплитудных и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) одиночного усилительного каскада, выполненные на миллиметровой бумаге;
- выводы по лабораторной работе, в которых должно быть отражено:
 - анализ полученных экспериментальных данных;
 - практические навыки, полученные при выполнении работы.

9.5 Основные теоретические положения

Усилителем называется устройство, предназначенное для увеличения параметров электрического сигнала (напряжения, тока, мощности).

На рисунке 9.2 изображена функциональная схема усилителя.

Усилитель имеет входную цепь, к которой подключается источник сигнала, подлежащего усилению, и выходную цепь, к которой подключается нагрузка.

Коэффициенты усиления усилителя различают по: напряжению; току и мощности.

Комплексный коэффициент усиления (комплексный коэффициент передачи) по напряжению $\underline{K}_U$ (в нижеприведенных формулах будет обозначен как $\underline{K}$) определяется как [11]:

$$\underline{K}_U = \underline{U}_{\text{вых}} / \underline{U}_{\text{вх}} = |\underline{K}| \exp(j\varphi),$$

где $\underline{U}_{\text{вых}}$ и $\underline{U}_{\text{вх}}$ — комплексы действующих значений выходного и входного напряжений соответственно; φ — фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением. Модуль комплексного коэффициент передачи $K = |\underline{K}|$ называется коэффициентом усиления, а его зависимость от частоты усиливаемого сигнала — амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

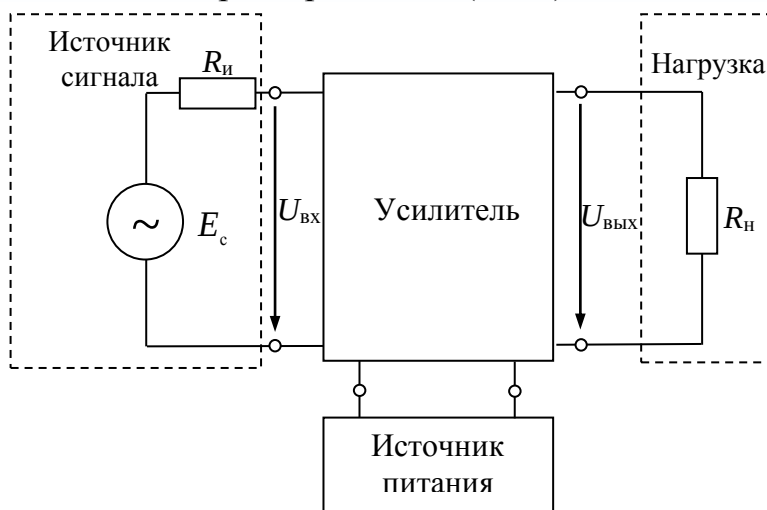


Рис. 9.2 — Функциональная схема усилителя

Коэффициент усиления, выраженный в логарифмических единицах — децибелах (дБ), определяется как:

$$K, \text{ дБ} = 20 \lg K.$$

Сквозной коэффициент усиления по напряжению, учитывающий коэффициент передачи входной цепи, определяется следующим образом:

$$\underline{K}_E = \underline{U}_{\text{вых}} / \underline{E}_c,$$

где $\underline{E}_c$ — комплекс действующего значения ЭДС источника сигнала.

Сквозной коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах, определится как:

$$K_{\Sigma}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{R_{\text{вх}} + R_{\text{и}}}{R_{\text{вх}}} \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{E_c} \right),$$

где E_c — ЭДС источника сигнала; $R_{\text{и}}$ — внутреннее сопротивление источника сигнала; $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление усилителя.

Для оценки линейности усилителя используют амплитудную характеристику, представляющую зависимость напряжения на выходе усилителя от напряжения на входе.

На рисунке 2.3 изображена амплитудная характеристика усилителя, представляющая зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$. В идеальном случае характеристика усилителя линейна и искажения отсутствуют, а напряжение на выходе усилителя пропорционально напряжению на входе. На практике усилитель вносит ис-

кажения в усиливаемый сигнал и внутренние помехи и шумы, вследствие чего форма кривой амплитудной характеристики отличается от линейной и не начинается с нуля. С амплитудной характеристикой усилителя связано такое понятие, как динамический диапазон.

Под динамическим диапазоном входного сигнала усилителя $D_{\text{вх}}$ понимают отношение действующего значения максимального входного напряжения $U_{\text{вх.мах.}}$ (при заданном уровне нелинейных искажений) к действующего значения минимального входного напряжения $U_{\text{вх.мин}}$ (при заданном отношении сигнал/шум на входе) [10]:

$$D_{\text{вх}} = U_{\text{вх.мах.}} / U_{\text{вх.мин}}$$

или в логарифмически единицах

$$D_{\text{вх}}, \text{ дБ} = 20 \lg D_{\text{вх.}}$$

Ввиду несовпадения идеальных и реальных характеристик, усилитель вносит искажения в сигнал. Под искажениями понимают отклонение формы выходного сигнала от формы входного. Для оценки искажения сигнала служат характеристики усилителя. Искажения, вносимые усилителем в усиливаемый сигнал, делятся на: частотные; фазовые; переходные и нелинейные.

Кроме перечисленных выше искажений, усилитель вносит собственные помехи, к которым относят: шумы; фон и наводки. Частотные искажения, вызванные неодинаковым усилением усилителя на разных частотах, оцениваются по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ). На рисунке 9.4 изображена нормированная АЧХ усилителя. На этом рисунке по оси ординат отложен нормированный коэффициент усиления, зависящий от частоты [11]:

$$Y = |K|/K_0,$$

где K_0 — коэффициент усиления на средней частоте.

Показателем степени частотных искажений служит неравномерность его амплитудно-частотной характеристики, а количественным показателем на какой-либо конкретной частоте спектра сигнала является коэффициент частотных искажений.

Коэффициент частотных искажений в относительных единицах определяется по выражению

$$M = 1/Y = K_0/|K|,$$

или в логарифмических единицах как

$$M, \text{ дБ} = 20 \lg M.$$

По амплитудно-частотной характеристике и допустимой величине частотных

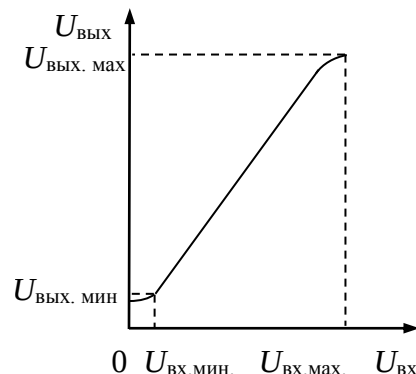


Рис. 9.3 — Амплитудная характеристика усилителя

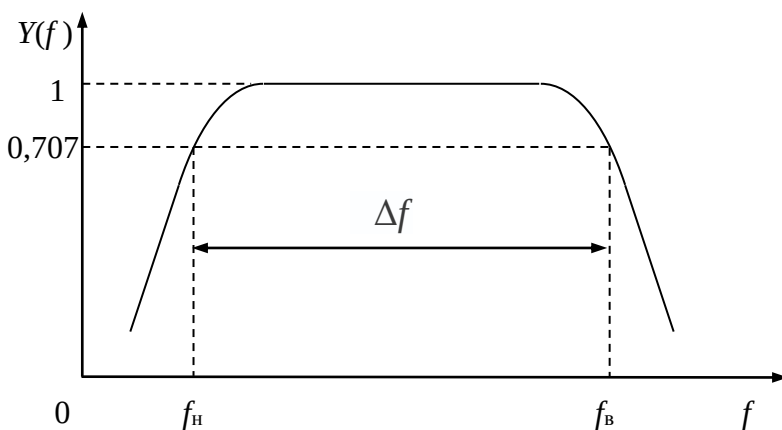


Рис. 9.4 — Нормированная АЧХ усилителя

искажений можно определить значение нижней f_n и верхней f_v граничных частот, а также полосу рабочих частот

$$\Delta f = f_v - f_n.$$

Весь частотный диапазон усилителя, разбивают на три части (нижние, средние и верхние частоты) и рассматривают отдельно поведение АЧХ в этих областях, соответствующим образом определяя эквивалентную схему для каждого из случаев.

1. В области средних частот (СЧ) значениями реактивных сопротивлений разделительных конденсаторов, ввиду их малости, можно пренебречь. Кроме того, можно пренебречь шунтирующим действием реактивного сопротивления выходной эквивалентной емкости конденсатора, включающей емкости монтажа и нагрузки.

При расчетах промышленных усилителей задаются, согласно стандартам, неравномерностью коэффициента усиления. В расчетах усилителя следует принять что, коэффициент усиления в области средних частот K_0 не зависит от частоты. В технике усилительных устройств под средней частотой f_0 понимают значения:

- 1 кГц для усилителей низкой частоты;
- 0 Гц для усилителей постоянного тока;
- $f_0 = \sqrt{f_n \cdot f_v}$ для других типов усилителей.

2. В области верхних частот (ВЧ) уже нельзя пренебречь шунтирующим действием реактивного сопротивления выходной эквивалентной емкости конденсатора. Модуль коэффициента передачи по напряжению в области верхних частот следует определить по выражению [11]:

$$|K(f)| = |K_0| / \sqrt{1 + (2\pi f \tau_v)^2}$$

или в относительных единицах

$$Y_v(f) = 1 / \sqrt{1 + (2\pi f \tau_v)^2},$$

где τ_v — постоянная времени в области ВЧ.

Общепринятым является понятие верхней (и нижней) частоты, отсчитываемой на уровне уменьшившегося в $\sqrt{2}$ раз коэффициента усиления.

Из выражения для нормированной АЧХ $Y_v(f)$ верхнюю граничную частоту АЧХ усилителя можно определить при подстановке его значения, равного $\frac{1}{\sqrt{2}}$ на граничной частоте в последнее выражение, то есть:

$$Y_{v0,707} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 1 / \sqrt{1 + (2\pi f \tau_v)^2}.$$

3. В области нижних частот (НЧ) значениями реактивных сопротивлений разделительных конденсаторов уже нельзя не пренебрегать.

Для области нижних частот выражение модуля коэффициента передачи по напряжению определится следующим образом [10]:

$$|K(f)| = |K_0| / \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f \tau_n} \right)^2}$$

или в относительных (нормированных) единицах

$$Y(f) = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f \tau_n} \right)^2},$$

где τ_n — постоянная времени в области НЧ.

После выполненного расчета усилителя необходимо построить результирующую АЧХ усилителя. Выражение АЧХ усилителя, справедливое для всей области рабочих частот, можно записать как:

$$|K(f)| = |K_0| / \sqrt{1 + \left(2\pi f \tau_b - \frac{1}{2\pi f \tau_n} \right)^2}$$

или в относительных (нормированных) единицах

$$Y(f) = 1 / \sqrt{1 + \left(2\pi f \tau_b - \frac{1}{2\pi f \tau_n} \right)^2}.$$

Воспользовавшись последними выражениями можно построить результирующую АЧХ усилителя. Рассмотрим принцип работы одиночного усилительного каскада, собранного по схеме с общим эмиттером.

На рисунке 9.5 изображена схема каскада усилителя с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером.

Рассмотрим назначение элементов схемы усилителя.

Резистор R_3 , выполняющий роль сопротивления коллекторной нагрузки, одновременно резистор служит для ограничения тока коллектора. Резистор R_4 предназначен для температурной стабилизации работы усилителя. На резисторах R_1 и R_2 собран делитель напряжения, обеспечивающий необходимое постоянное напряжение на базе транзистора. Конденсаторы C_1 и C_2 препятствуют прохождению постоянных токов усилителя к выходным цепям источника входного напряжения и входным цепям потребителя выходного напряжения.

При отсутствии входного сигнала в схеме протекают постоянные токи базы I_b , коллектора I_k и эмиттера $I_э$, обеспечивающие активный режим работы транзистора. В этом режиме на $p-n$ переходе база-эмиттер транзистора падает постоянное напряжение $U_{бэ} = I_э \cdot r_{бэ} \approx 0,6...0,7$ В, где $r_{бэ}$ — сопротивление $p-n$ перехода база-эмиттер транзистора.

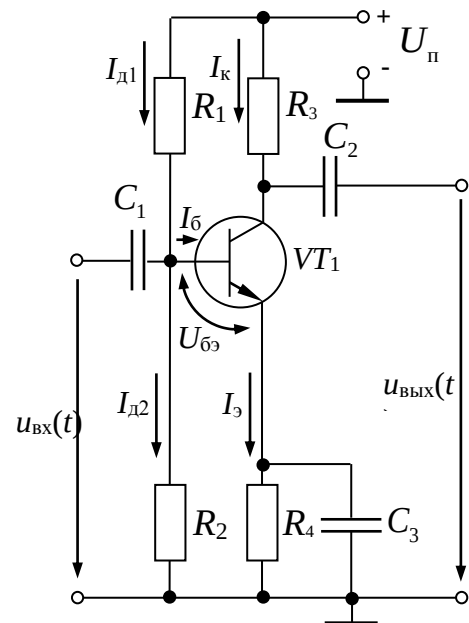


Рис. 9.5 — Схема каскада усилителя с транзистором, включенным по схеме с ОЭ

Ток коллектора I_K связан с напряжением $U_{бэ}$ следующей зависимостью:

$$I_K = I_{\text{нас}} [\exp(U_{бэ} / U_T) - 1],$$

где $I_{\text{нас}}$ – ток насыщения транзистора, U_T – тепловой потенциал, при комнатной температуре $U_T \approx 26 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

В активном режиме работы транзистора $I_K \gg I_{\text{нас}}$, поэтому последнее выражение можно записать в следующем виде:

$$I_K = I_{\text{нас}} \exp(U_{бэ} / U_T).$$

В соответствии с последним выражением напряжение между базой и эмиттером «управляет» коллекторным током.

Выразим напряжение $U_{бэ}$ следующим образом:

$$U_{бэ} = U_T \cdot \ln(I_K / I_{\text{нас}}).$$

Далее найдем сопротивление $r_{бэ}$, продифференцировав последнее выражение по I_K :

$$r_{бэ} = \frac{dU_{бэ}}{dI_K} = \frac{U_T}{I_K}.$$

Усилительные свойства транзистора характеризуются коэффициентом усиления по току в схеме с общим эмиттером $K_I = h_{21э}$. Данный коэффициент усиления достигает сотен единиц и приводится в паспортных данных транзисторов. Ток коллектора I_K в $h_{21э}$ раз больше тока базы $I_б$: $I_K = h_{21э} \cdot I_б$.

Между токами $I_б$, I_K и $I_э$ существует связь: $I_э = I_б + I_K$. Пренебрегая током базы как величиной на два порядка меньшей, чем токи коллектора и эмиттера, можно записать $I_э \approx I_K$.

Пусть ко входу усилителя подключен источник входного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$. При этом под действием напряжения входного сигнала на базе транзистора появится приращение входного напряжения $\Delta U_{\text{вх}}$. Это приращение вызовет соответствующее приращение напряжения база-эмиттер $\Delta U_{бэ}$, а также приращения токов базы $\Delta I_б$, коллектора ΔI_K и эмиттера $\Delta I_э$, причем

$$\Delta I_э = \Delta I_б + \Delta I_K \approx \Delta I_K = h_{21э} \cdot \Delta I_б.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для приращения входного напряжения можно записать:

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{бэ} + \Delta I_э \cdot R_4 = \Delta I_э \cdot (R_4 + r_{бэ}) \approx \Delta I_K \cdot (R_4 + r_{бэ}).$$

Выходное напряжение $u_{\text{вых}}(t)$ снимается с коллектора транзистора относительно точки с нулевым потенциалом. Учитывая уравнение, можно считать, что приращение выходного напряжения равно по величине и противоположно по знаку приращению напряжения на резисторе R_3 . При изменении действующего значения входного напряжения на величину $\Delta U_{\text{вх}}$ выходное напряжение $u_{\text{вых}}(t)$ получит приращение действующего значения выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}} = -\Delta I_K \cdot R_3$.

Окончательно, коэффициент усиления по напряжению рассматриваемого каскада определится следующим образом:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} \approx \frac{-\Delta I_{\text{К}} \cdot R_3}{\Delta I_{\text{К}} \cdot (R_4 + r_{\text{бэ}})} = -\frac{R_3}{(R_4 + r_{\text{бэ}})}.$$

Коэффициент усиления по мощности для рассматриваемого каскада равен

$$K_P = K_U K_I \approx \frac{R_3}{(R_4 + r_{\text{бэ}})} h_{21э}.$$

Входное сопротивление усилителя $R_{\text{ВХ}}$ получим как дифференциальное сопротивление нелинейной электрической цепи

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} \cdot (R_4 + r_{\text{бэ}})}{\Delta I_{\text{б}}} = h_{21э} \cdot (R_4 + r_{\text{бэ}}).$$

Выходное сопротивление усилителя определяется как дифференциальное сопротивление нелинейной цепи относительно выходных зажимов:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} \cdot R_3}{\Delta I_{\text{К}}} = R_3.$$

Рассматривая последние выражения можно сделать вывод, что для получения высоких значений коэффициентов усиления по напряжению и по мощности необходимо увеличивать сопротивление коллекторной нагрузки R_3 , а для повышения КПД усилителя необходимо уменьшать его выходное сопротивление, то есть уменьшать сопротивление R_3 . Для повышения коэффициента усиления каскада можно было бы исключить R_4 и эмиттер транзистора соединить непосредственно с точкой с нулевым потенциалом. Однако этого делать нельзя, поскольку напряжение база-эмиттер транзистора существенно зависит от температуры, следовательно, от температуры зависит и постоянный ток коллектора транзистора. Изменения постоянной составляющей коллекторного тока приводят к искажениям выходного сигнала. На практике, как правило, повышают КПД усилителя, а требуемое усиление сигнала получают за счет применения многокаскадных схем усилителей. Выясним назначение элементов R_4 и C_3 , приведенных на схемах рисунка 9.5. Для постоянного напряжения входной цепи усилителя при наличии резистора R_4 можно записать:

$$U_{\text{б}} = U_{\text{бэ}} + I_{\text{К}} \cdot R_4.$$

Таким образом, напряжение на базе транзистора $U_{\text{б}}$, создаваемое делителем напряжения R_1 и R_2 , зависит только от сопротивлений резисторов R_1 и R_2 , и не зависит от температуры. Пусть под действием температуры напряжение $U_{\text{бэ}}$ увеличилось. Тогда увеличится постоянный ток коллектора $I_{\text{К}}$ и возрастет падение напряжения $I_{\text{К}} \cdot R_4$ на резисторе R_4 . Однако поскольку $U_{\text{б}}$ не изменяется, то уменьшится напряжение смещения $U_{\text{бэ}}$ и соответственно ток коллектора $I_{\text{К}}$. То есть постоянная составляющая тока коллектора останется неизменной. Для того чтобы R_4 не влиял на усилительные свойства каскада, его шунтируют по переменному току конденсатором C_3 , сопротивление которого на частотах сигнала достаточно мало. В данном случае коэффициент усиления по напряжению можно определить как:

$$K_U = \frac{R_3}{R_4}.$$

9.6 Контрольные вопросы

1. Какие параметры характеризуют усилитель электрических сигналов?
2. Каков общий принцип работы усилительного каскада с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером?
3. Как влияют номиналы переходных конденсаторов на АЧХ усилителя?
4. Что определяет динамический диапазон усилителя?
5. Какими элементами схемы определяется коэффициент усиления усилительного каскада с общим эмиттером?
6. Каково назначение блокирующего конденсатора C_3 , в схеме, изображенной на рисунке 9.4?
7. Как выбирается рабочая точка на характеристиках транзистора, работающего в режиме усиления?
8. Какими элементами схемы, изображенной на рисунке 9.4, задается смещение на базе транзистора?
9. Для каких целей снимается амплитудная характеристика усилителя?
10. Как определяется сквозной коэффициент усиления по напряжению?

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: СевГУ, 2019. — 295 с.
2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. электромагнитное поле: учебник для бакалавров техн. вузов по направлениям: "Электротехника", "Электротехнологии", "Электромеханика", "Электроэнергетика", "Приборостроение" / Л.А. Бессонов. - 11-е изд. - М. : Юрайт, 2012. — 317 с.
3. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники: учебное пособие / И.А. Данилов, П. М. Иванов. — 6-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2005. — 752 с.
4. Матвеев Ю.В. Сборник расчетных работ по электромеханике: Учеб. пособие для вузов / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: Изд-во СНИЯЭиП, 2002. — 132 с.
5. Матвеев Ю.В. Сборник лабораторных работ по электротехнике: Учеб. пособие для вузов / Ю.В. Матвеев. — Севастополь: Изд-во СНИЯЭиП, 2004. — 124 с.
6. Жаворонков М. А. Электротехника и электроника: учебное пособие/ М.А. Жаворонков, А. В. Кузин. — 4-е изд., испр. — М.: Академия, 2011. — 394 с. Касаткин А. С. Электротехника: учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — 9-е изд., стереотип. — М.: Академия, 2005. — 539 с.
7. Петров С.И. Теоретические основы электротехники. Установившиеся и переходные процессы в линейных электрических цепях: учебное пособие/ С.И. Петров, А.А. Руппель; ред. В.П. Горелов. — Омск: ОИВТ, 2009. —137с. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника/ Ф.Е. Евдокимов. — М.: Высш. шк., 2004. — 367 с.
8. Подкин, Ю.Г. Электротехника и электроника: учебное пособие: в 2-х т. / Ю.Г. Подкин, Т.Г. Чикуров, Ю.В. Данилов. — М.: Академия. — Т. 1: Электротехника / Т.Г. Чикуров, Ю.В. Данилов. — 2011. — 399 с.
9. Гусев В.Г. Электроника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. — М.: Высшая школа, 1991. — 622с.
10. Вайсбурд Ф.И. Электронные приборы и усилители / Ф.И. Вайсбурд, Г.А. Панаев, Б.Н. Савельев. — М.:Радио и связь, 1987. — 472 с.
11. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства / И.Г. Мамонкин. — М.: Связь, 1977. — 360 с.
12. Красько А.С. Проектирование аналоговых электронных устройств / А.С. Красько. — Томск: Изд-во ТУСУР, 2000. — 29 с.
13. Опадчий Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Грудкин, А.И. Гуров. — М.: Горячая линия — Телеком, 2002. — 768с.
14. Усилитель электрических сигналов. Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Электроника и микросхемотехника» для студентов направления 6.050202 «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии» дневной и заочной форм обучения. / Сост. Ю.В. Матвеев, Г.А.Тихонов — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. — 56 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Образец бланка титульного листа к лабораторной работе

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

Морской институт

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №

по дисциплине “Общая электротехника и электроника”

Название работы _____

Цель работы _____

Студент _____

Группа _____

Дата выполнения _____

Проверил _____

Севастополь

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ПО ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ**

для студентов специальности

**26.05.06 — Эксплуатация судовых энергетических установок
всех форм обучения**

Матвеев Юрий Валентинович

В авторской редакции

Изд. № 170/2020. Объем 5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»