

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А.П. Степанов

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия научно-методическим
советом Юргинского технологического института (филиала)
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК621.3
ББК312я73
С79

Степанов А.П.

С79 Лабораторный практикум по дисциплине «Электротехника и электроника»: учебное пособие / А.П. Степанов; Юргинский технологический институт – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 169 с.

В учебном пособии содержатся лабораторные работы по основным разделам дисциплины «Электротехника и электроника». Для каждой лабораторной работы кратко изложен теоретический материал и даются методические указания к ее выполнению.

Учебное пособие предназначено для студентов высших технических учебных заведений по направлениям подготовки 150700 «Машиностроение», 110800 «Агроинженерия», 130400 «Горное дело», 150400 «Металлургия», 280200 «Защита окружающей среды».

УДК 621.3
ББК 312я73

Рецензенты

доктор технических наук, старший научный сотрудник,
профессор кафедры Теплогазоснабжение
Томского архитектурно-строительного университета
Т.Н. Немова

старший научный сотрудник НИИ прикладной математики
и механики Томского государственного университета,
кандидат технических наук
А.А. Колесников

© Юргинский технологический институт (филиал)
Томского политехнического университета, 2012
© Степанов А.П., 2012
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Методические указания к выполнению лабораторных работ	5
1. Организация проведения лабораторных работ	5
2. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ	5
3. Обработка результатов и оформление отчетов	7
Лабораторная работа № 1. Исследование эквивалентного генератора ..	10
Лабораторная работа № 2. Последовательное соединение приемников однофазного переменного тока.....	17
Лабораторная работа № 3. Резонанс напряжений.....	33
Лабораторная работа № 4. Однофазная цепь с параллельным соединением элементов. Резонанс токов.....	42
Лабораторная работа № 5. Соединение трехфазной цепи «Звездой».....	53
Лабораторная работа № 6. Трехфазная цепь переменного тока при соединении приемников «треугольником»	66
Лабораторная работа № 7. Релаксационные процессы в RC -цепи.....	74
Лабораторная работа № 8. Измерение электрических сопротивлений ..	84
Лабораторная работа № 9. Исследование однофазного трансформатора	91
Лабораторная работа № 10. Исследование полупроводникового диода.....	104
Лабораторная работа № 11. Исследование биполярного транзистора ..	113
Лабораторная работа № 12. Исследование триодного тиристора.....	126
Лабораторная работа № 13. Исследование полупроводниковых выпрямителей	135
Лабораторная работа № 14. Исследование параметрического стабилизатора.....	148
Лабораторная работа № 15. Инвертирующий и неинвертирующий усилители	156
Приложение А.....	166
Приложение Б	166

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия по курсу «Электротехника и электроника» являются важнейшим элементом учебного процесса в плане приобретения студентами навыков в планировании эксперимента, использования измерительных приборов и аппаратуры, в экспериментальном исследовании схем, устройств и электронных элементов, а также в усвоении и практической конкретизации лекционного материала.

В практикум входят лабораторные работы по всем разделам дисциплины «Электротехника и электроника». Для каждой лабораторной работы сформулированы цель исследований, дан перечень необходимых приборов и оборудования, определены конкретные задания и порядок выполнения работы, а также приведены контрольные вопросы и указан объем отчетных материалов. Краткое изложение теоретических сведений по исследуемому вопросу поможет студентам в подготовке к лабораторным работам и их выполнению.

Особенность лабораторного практикума в том, что работы имеют учебно-исследовательский характер. Они развивают у студентов навыки проведения экспериментальных исследований, знакомят с методами исследований процессов в электрических цепях и техникой измерения их параметров, обращения с электротехническими устройствами и электроизмерительной аппаратурой.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Каждый студент должен четко понимать цель лабораторной работы и отчетливо представлять назначение, принцип работы и основные характеристики исследуемой схемы, устройства или прибора. Поэтому перед выполнением каждой работы необходима предварительная подготовка, в процессе которой студент повторяет пройденный теоретический материал, готовит таблицы наблюдений и изучает последовательность необходимых операций.

После проверки степени готовности студента к выполнению лабораторной работы он допускается к сборке схемы, указанной в задании.

Лабораторные работы выполняются бригадами по 2–4 человека. За каждой бригадой закрепляется определенный стенд. Члены бригады должны знать тему лабораторной работы за несколько дней до ее выполнения.

После проверки собранной схемы преподавателем студенты приступают к выполнению лабораторной работы. Работа считается законченной в том случае, если результаты в виде записей, таблиц представлены преподавателю, им проверены и утверждены, после чего студенты разбирают схему и приводят рабочее место в исходное состояние.

2. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками и в некоторых случаях могут стать источниками опасности поражения электрическим током. Известно, что тело человека обладает электропроводностью и при соприкосновении с двумя незаземленными элементами установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникший вследствие этого в теле человека электрический ток может вызвать ожог кожи или нанести тяжелые поражения нервной, дыхательной и сердечной системам человека. Поэтому при выполнении лабораторных работ студенты должны помнить о возможности поражения электрическим током и соблюдать следующие правила техники безопасности.

1. К проведению лабораторных работ допускаются только студенты, знающие правила техники безопасности. Инструктаж по технике

безопасности проводит преподаватель, что фиксируется в специальном журнале по ТБ.

2. При проведении работ запрещается громко разговаривать, отвлекать работающих за рабочим местом.

3. Перед началом сборки схемы измерений необходимо убедиться в том, что выключатели находятся в положении «**Выключено**».

4. При монтаже схем используются только изолированные провода. Пользоваться оголенными проводами или с поврежденной изоляцией запрещается.

5. При сборке схемы следует обратить внимание на высокую надежность контактов всех разъемных соединений и по возможности не допускать пересечения проводов.

6. Студенту категорически запрещается включать схему без проверки ее преподавателем.

7. Напряжение к рабочему месту подается только преподавателем.

8. Устранение замеченных в рабочей цепи неисправностей, а также все пересоединения, необходимые по ходу работы, производятся только при отключенном напряжении. Повторное включение схемы после этих пересоединений допускается только после разрешения преподавателя.

9. Во время работы запрещается прикасаться к оголенным частям электрической цепи.

10. Запрещается покидать рабочее место и оставлять без наблюдения включенную лабораторную установку.

11. При возникновении неисправностей в работе лабораторного оборудования или несчастного случая лабораторную установку следует немедленно обесточить, оказать пострадавшему первую медицинскую помощь и немедленно доложить преподавателю.

12. По окончании работы напряжение у рабочего места необходимо немедленно отключить.

13. Смена перегоревших предохранителей и т.п. производится только обслуживающим персоналом лаборатории.

14. Не следует загромождать свое рабочее место на стенде вещами, не относящимися к данной работе.

15. Запрещается во время работы загромождать подходы к стендам стульями, скамейками и т.п. Доступ к стендам, включенным под напряжение, должен быть свободен.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТОВ

Каждый студент должен самостоятельно обработать данные измерений и подготовить отчет о проделанной работе.

В отчете на титульном листе указывается название учебного заведения, номер и наименование лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, выполнившего работу, а также фамилия, инициалы и должность преподавателя, проверяющего лабораторную работу. Пример оформления титульного листа показан в приложении А.

Отчет должен содержать следующие разделы.

1. Цель лабораторной работы.
2. Краткая характеристика и основные соотношения объекта исследования.
3. Электрическая схема.
4. Таблицы:
 - технические сведения об используемых приборах;
 - результаты измерений;
 - результаты проведенных расчетов.
5. Формулы, по которым определялись расчетные данные.
6. Графики (диаграммы).
7. Выводы и обоснования по проделанной работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.
9. Отчет подписывается исполнителем, указывается дата оформления отчета.

Примечание

1. Электрические схемы выполняются аккуратно с помощью карандаша и чертежного инструмента, с соблюдением принятых стандартных условных обозначений в соответствии с СТО ТПУ 2.5.01-2006.

2. Электрические схемы, графики должны иметь подписи.

3. Таблицы (диаграммы) должны иметь заголовки, поясняющие зависимости, которые они характеризуют.

4. При построении экспериментальных и расчетных кривых должно приниматься во внимание следующее.

Начало осей координат и нулевые значения параметров должны быть совмещены; численные значения параметров, отличные от нулевых, откладываются в масштабе на осях координат.

Следует обращать внимание на правильный выбор масштаба. Масштабы шкал по осям (как правило, на разных осях разные масштабы) следует выбирать из условия максимального использования всей площади графика. Для определения масштаба по оси абсцисс делят

наибольшее значение аргумента X на предполагаемую ширину графика, получают масштаб $m_X = X_{max}/b$ – единиц измерения величины в направлении оси абсцисс (b – ширина графика). Аналогично определяют масштаб по оси ординат $m_Y = Y_{max}/h$, где h – предполагаемая высота графика. Масштабы округляют до ближайших целых значений (желательно в одном из следующих диапазонов: $1 \cdot 10^n$, $2 \cdot 10^n$, $5 \cdot 10^n$, где $n = -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ и т.п.).

Масштаб на осях координат наносится короткими рисками. Числовые значения масштаба шкал осей координат пишут за пределами графика (левее от оси ординат и ниже оси абсцисс). Если кривая, изображенная на рисунке, занимает небольшое пространство, то для экономии места числовые деления на осях координат можно начинать не с нуля, а ограничивать теми значениями, в пределах которых рассматривается данная функциональная зависимость. Допускается также разрывы масштабных осей и шкал с целью уменьшения площади графика.

Численные значения параметров, полученные из опыта или в результате расчета, на оси координат наноситься не должны.

5. В процессе построения графиков значения физических величин, полученные экспериментально или в результате расчетов по экспериментальным данным, в виде точек четко наносятся в координатных осях; по этим точкам проводятся плавные усредненные зависимости (рис. 1).

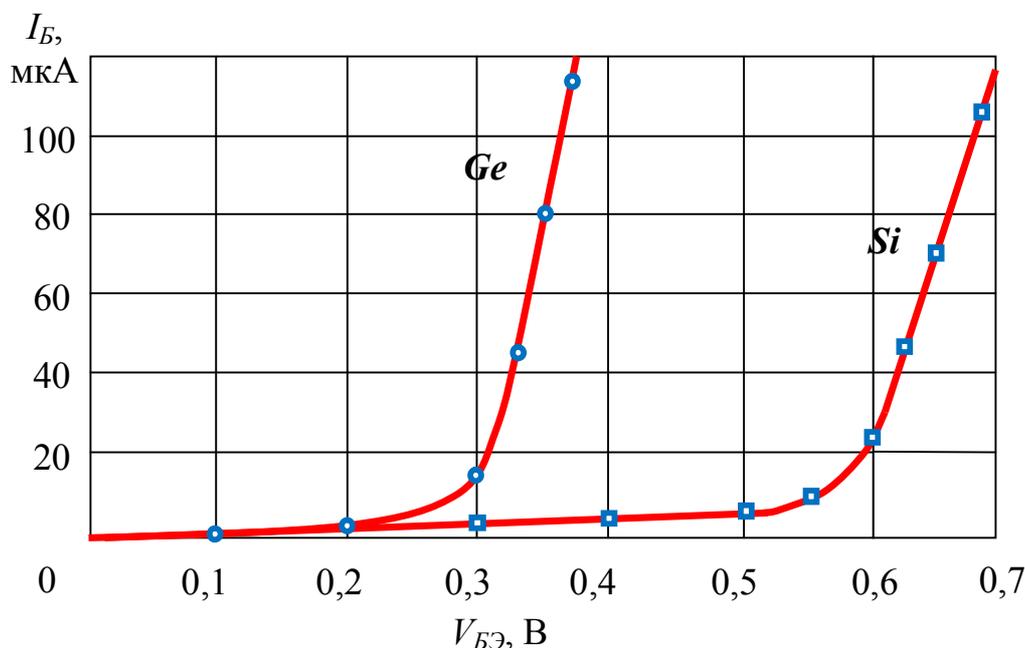


Рис. 1. Пример оформления графика

6. Если в зависимости от одного параметра, например полезной

мощности P_2 , предполагается построение графиков нескольких физических величин, например напряжения U , тока I , потребляемой мощности P_1 , коэффициента полезного действия η , то для большей наглядности изображения численные значения каждой физической величины следует откладывать в индивидуальном масштабе, указываемом на дополнительной оси ординат (рис. 2).

7. Если в одной системе координат строится несколько графиков, то экспериментальные или расчетные значения каждой физической величины рекомендуется отмечать различными значками (рис. 2).

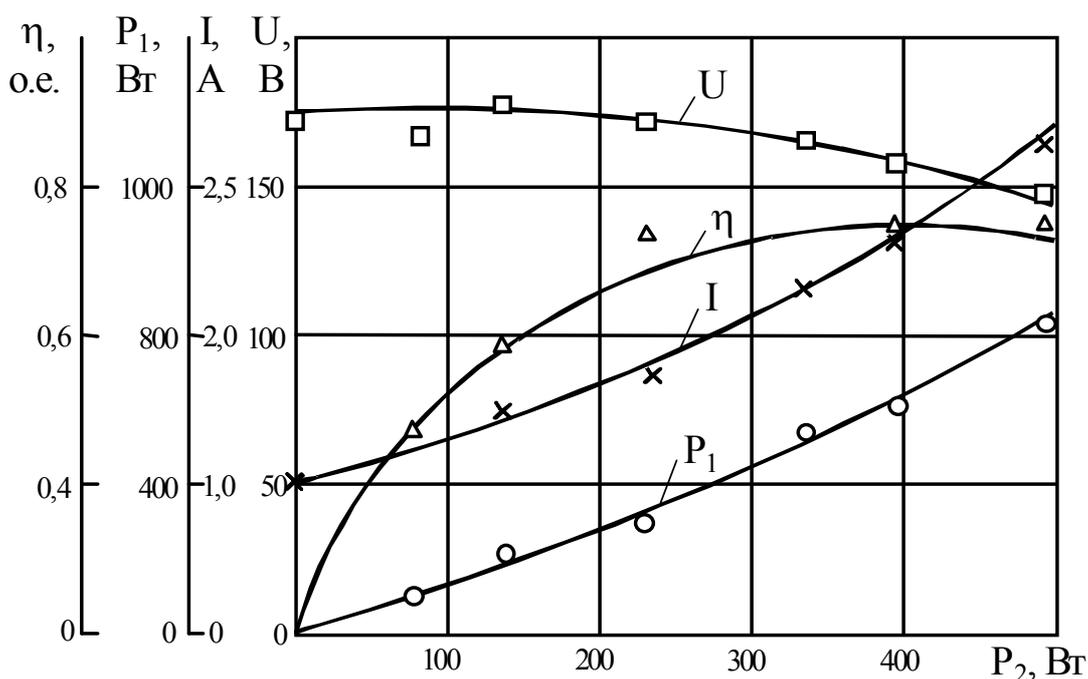


Рис. 2. Пример оформления нескольких графиков в одной системе координат

8. Векторные диаграммы строятся с соблюдением следующих требований:

- все векторы строят в определенном масштабе, масштабы выбирают в соответствии с пунктом 4;
- углы между векторами откладывают по транспортиру.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально проверить возможности замены сложной электрической цепи эквивалентным генератором (активным двухполюсником) с параметрами $E_{ЭГ}$ и $R_{ЭГ}$, для чего:

- 1) исследовать работу эквивалентного генератора в различных режимах;
- 2) научиться определять параметры эквивалентного генератора двумя методами;
- 3) зная параметры эквивалентного генератора, определить ток в исследуемой цепи.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

При работе и исследовании линейных электрических цепей часто необходимо знать режим работы какой-нибудь одной ветви с сопротивлением R_H , а не всех элементов сложной электрической цепи. В этом случае нецелесообразно производить расчет всей схемы. Исследуемую ветвь можно выделить, а всю оставшуюся часть схемы независимо от её структуры и сложности условно изобразить некоторым прямоугольником с двумя выводами (рис 1.1).

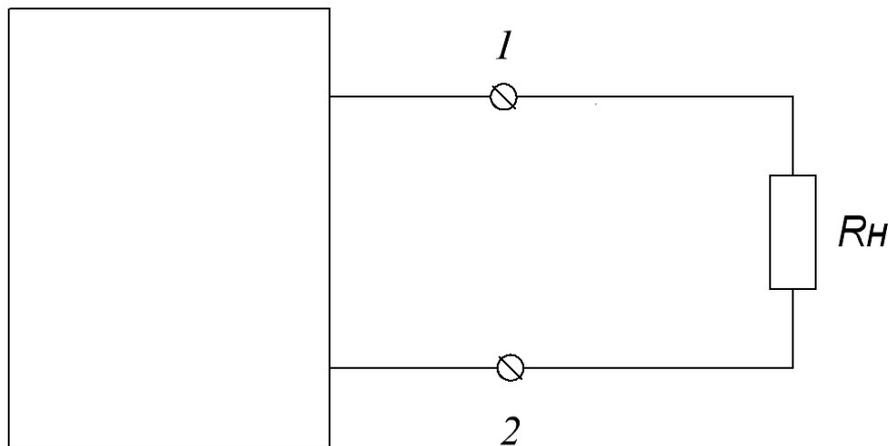


Рис. 1.1. Замещение сложной электрической схемы двухполюсником и выделенной ветвью

По отношению к выделенной ветви 1– R_H –2 вся схема, обозначенная прямоугольником, называется двухполюсником, т.к. имеет два вывода (выходных зажима). Если в двухполюснике имеются источники

электрической энергии, то его называют активным двухполюсником. Если в двухполюснике отсутствуют источники электрической энергии, то такой двухполюсник называется пассивным.

В общем случае исследуемая ветвь с нагрузкой R_H присоединяется к активному двухполюснику в точках 1 и 2. Следовательно, двухполюсник может рассматриваться относительно исследуемой ветви как источник с некоторой электродвижущей силой $E_{ЭГ}$ и некоторым эквивалентным внутренним сопротивлением $R_{ЭГ}$ (рис. 1.2). Такой условный источник энергии называется эквивалентным генератором. К зажимам генератора подключена ветвь электрической цепи с сопротивлением R_H , в которой нужно определить величину тока.

Метод замены линейной электрической цепи эквивалентным генератором (активным двухполюсником) называется методом эквивалентного генератора (активного двухполюсника).

После такой замены ток в исследуемой ветви можно определить из закона Ома для полной цепи

$$I = \frac{E_{ЭГ}}{R_{ЭГ} + R_H}, \quad (1.1)$$

где $E_{ЭГ}$ и $R_{ЭГ}$ – э.д.с. и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора.

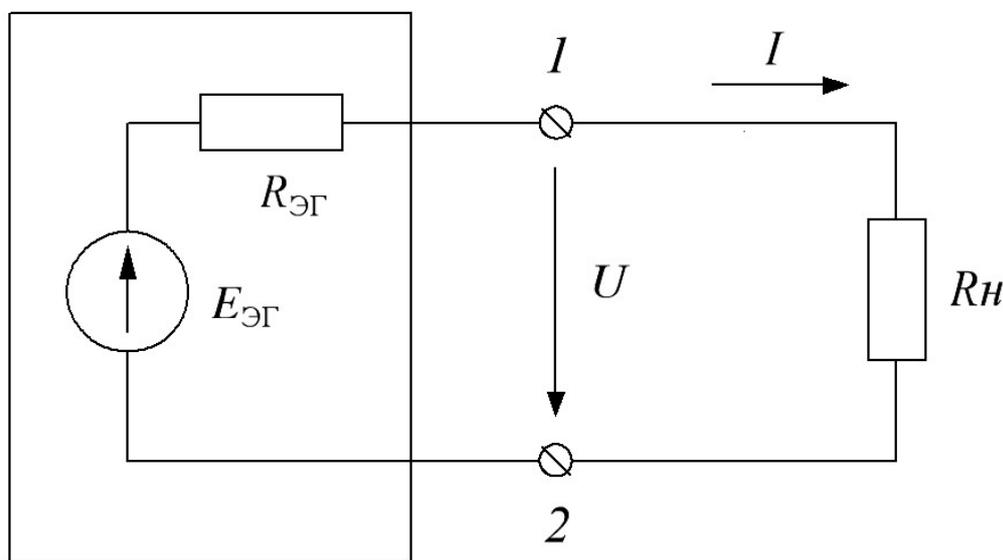


Рис. 1.2. Представление активного двухполюсника в виде эквивалентного генератора с параметрами $E_{ЭГ}$ и $R_{ЭГ}$

Первый этап анализа работы исследуемой ветви по методу эквивалентного генератора сводится к определению параметров актив-

ного двухполюсника. При известных параметрах всей заданной электрической цепи параметры эквивалентного генератора могут быть определены аналитически. Если же параметры рассматриваемой электрической цепи неизвестны, то параметры эквивалентного генератора определяются экспериментально.

В данной лабораторной работе параметры эквивалентного генератора определяются экспериментально двумя способами: методом двух нагрузок и методом холостого хода и короткого замыкания.

По методу холостого хода и короткого замыкания электродвижущая сила эквивалентного генератора определяется

$$E_{\text{ЭГ}} = U_{\text{ХХ}}, \quad (1.2)$$

где $U_{\text{ХХ}}$ – напряжение холостого хода на участке 1–2 ($R_H = \infty$, т.е. отключенная нагрузка). Это следует из того, что электродвижущая сила эквивалентного генератора равна напряжению между точками 1 и 2 при отключенной нагрузке, т.е. напряжению холостого хода (рис. 2).

Сопротивление эквивалентного генератора $R_{\text{ЭГ}}$ по методу холостого хода и короткого замыкания равно сопротивлению цепи между точками 1 и 2 в режиме короткого замыкания. Из закона Ома

$$R_{\text{ЭГ}} = \frac{U_{\text{ХХ}}}{I_{\text{КЗ}}}, \quad (1.3)$$

где $I_{\text{КЗ}}$ – ток короткого замыкания ($R_H = 0$, т.е. закороченная нагрузка).

Параметры $E_{\text{ЭГ}}$ и $R_{\text{ЭГ}}$ методом двух нагрузок определяются выражениями

$$E_{\text{ЭГ}} = \frac{U_2 \cdot I_1 - U_1 \cdot I_2}{I_1 - I_2}, \quad (1.4)$$

$$R_{\text{ЭГ}} = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}, \quad (1.5)$$

где U_1 и U_2 – показания вольтметра при первой и второй нагрузках; I_1 и I_2 – показания амперметра при тех же нагрузках.

Таким образом, выполнив измерения в режиме холостого хода и короткого замыкания, можно экспериментально определить параметры эквивалентного генератора. Однако необходимо отметить, что данный метод холостого хода и короткого замыкания можно применять не ко всем цепям, т.к. *не во всех цепях можно производить опыт короткого замыкания.*

После определения параметров генератора второй этап анализа ветви состоит в определении тока в исследуемой ветви. Ток ветви рассчитывают либо по формуле Тевенина-Гельмгольца

$$I_{T-Г} = \frac{E_{ЭГ}}{R_{ЭГ} + R_H} \quad (1.6)$$

либо по формуле Поливанова

$$I_{II} = \frac{I_{КЗ}}{1 + q_{ЭГ} \cdot R_H}, \quad (1.7)$$

где $q_{ЭГ} = 1/R_{ЭГ}$ – проводимость эквивалентного генератора.

Зная напряжение и ток для нескольких значений нагрузки, можно построить внешнюю характеристику генератора. Зависимость $U = f(I)$ называется внешней характеристикой эквивалентного генератора. Она даёт возможность графически определить ток в исследуемой ветви при заданном её сопротивлении.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема электрической цепи, которая используется в данной работе, представлена на рис. 1.3. Часть цепи, обведённая прямоугольником, содержит элементы с неизвестными параметрами и подлежит замене эквивалентным генератором.

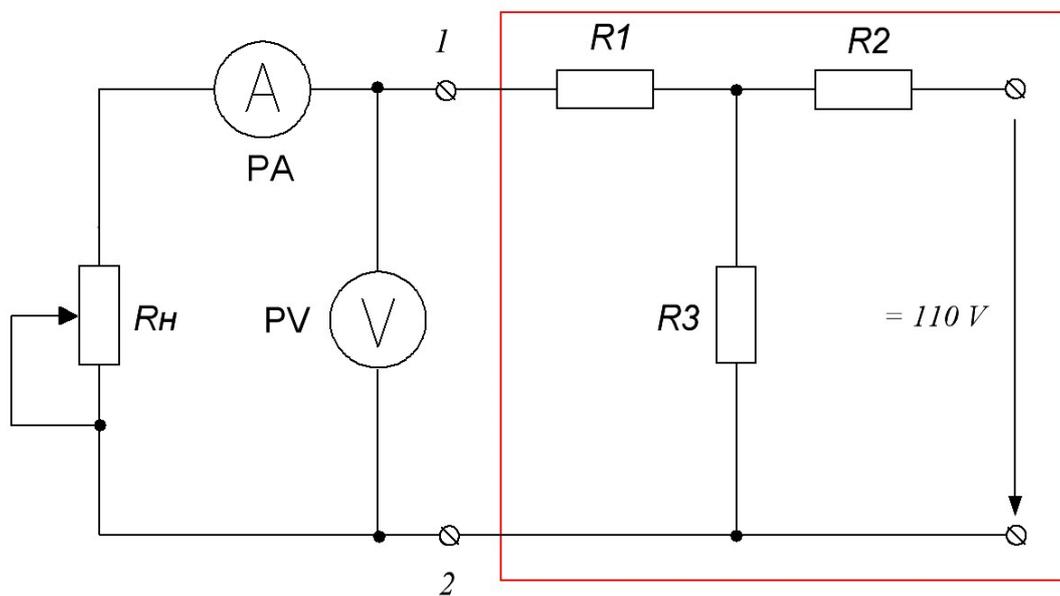


Рис. 1.3. Схема исследуемой электрической цепи

Первым этапом работы определяются параметры эквивалентного генератора методом холостого хода и короткого замыкания, а также методом двух нагрузок. Холостой ход осуществляется отключением нагрузки – сопротивления R_H . При коротком замыкании нагрузки необ-

ходимо проводником закоротить сопротивления R_H . При методе двух нагрузок показания приборов в цепи осуществляются при двух разных сопротивлениях нагрузки.

Для построения внешней характеристики эквивалентного генератора необходимо снять показания приборов для 8–9 значений сопротивления нагрузки R_H . По полученным экспериментальным данным определяются параметры генератора, а также строят графики зависимостей $P = f(I)$ и $U = f(I)$.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Подготовить отчет, изучить теоретический материал и получить допуск на выполнение лабораторной работы у преподавателя.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 1.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 1.1

Сведения об измерительных приборах

	<i>РА</i>	<i>PV</i>
Наименование прибора		
Тип и номер прибора		
Система измерительного механизма (наименов. и обозн.)		
Предел измерений (номинальное значение)		
Класс точности		
Род тока		
Цена деления прибора		
Абсолютная погрешность измерения		

4. Собрать схему электрической цепи согласно рис. 1.3 и представить для проверки преподавателю.
5. Выполнить режим холостого хода, т.е. разомкнуть ветвь с нагрузкой (при этом $R_H = \infty$). Снять показания приборов и результаты измерений записать в таблицу 2.
6. Осуществить режим короткого замыкания, т.е. закоротить нагрузку (при этом $R_H = 0$). Снять показания приборов и записать их в таблицу 1.2.

7. Для определения параметров эквивалентного генератора методом двух нагрузок измерить напряжения и токи при двух различных сопротивлениях нагрузки R_H , подобрав их величину таким образом, чтобы токи отличались друг от друга не менее чем в два раза. Результаты измерений записать в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Определение параметров генератора

Режимы	Измеренные величины		Расчетные величины		
	I	U	R_H	$E_{ЭГ}$	$R_{ЭГ}$
	А	В	Ом	В	Ом
Холостой ход					
Короткое замыкание					
Метод двух нагрузок					

8. Исследовать работу генератора при различных нагрузках (провести 7–8 измерений). При этом осуществить нагрузочный режим, при котором ток $I = 0,5 \cdot I_{кз}$ (остальные токи выбрать меньше и больше данного значения). Значение тока короткого замыкания $I_{кз}$ взять из табл. 1.2. Данные всех опытов занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Исследование генератора при различных нагрузках

№ п/п	Измеренные величины		Расчетные величины			
	I	U	R_H	P	$I_{Т-Г}$	$I_{П}$
	А	В	Ом	Вт	А	А
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Заполнить таблицу 1.3, для чего рассчитать R_H по закону Ома, мощность $P = U \cdot I$, и определить токи нагрузки в исследуемой ветви для тех же значений сопротивлений нагрузки по формулам Тевенина-Гельмгольца (1.6) и Поливанова (1.7).
2. Построить в масштабе графики зависимостей $P = f(I)$ и $U = f(I)$.
3. Определить ток по внешней характеристике эквивалентного генератора при заданном сопротивлении R_H , указанном преподавателем.
4. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями.
5. Ответить на контрольные вопросы и защитить выполненную лабораторную работу.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Для каких целей сложную линейную электрическую цепь представляют в виде эквивалентного генератора?
2. Что называется двухполюсником?
3. Что такое активный и пассивный двухполюсник?
4. Какими параметрами характеризуется эквивалентный генератор?
5. Какими методами можно определить параметры эквивалентного генератора?
6. В чём состоит расчет по методу эквивалентного генератора?
7. Какая зависимость называется внешней характеристикой генератора?
8. Как осуществить в работе опыт короткого замыкания и холостого хода и что при этом покажут амперметр и вольтметр?
9. Определить по графику $P = f(I)$, при каком значении тока мощность будет максимальной.
10. Записать выражение для определения тока в ветви заданной электрической цепи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением активных и реактивных приемников:

- 1) исследовать работу цепи переменного тока при различных типах нагрузки и разных режимах работы;
- 2) научиться определять параметры электрической цепи переменного тока;
- 3) построить векторные диаграммы при последовательном соединении активных и реактивных элементов цепи переменного тока, а также треугольники сопротивлений и мощностей.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цепь переменного тока с активным сопротивлением R

Простейшей цепью переменного тока является цепь, имеющая только сопротивление R . Сопротивление в цепи переменного тока и в цепи постоянного тока ведет себя по-разному.

Переменный ток хуже проходит через сопротивление, чем постоянный. Это объясняется следующими причинами:

- 1) поверхностный эффект;
- 2) вихревые токи;
- 3) переманчивание ферромагнитных материалов;
- 4) изменение поляризации диэлектриков.

Все эти явления связаны с выделением тепла, и, значит, переменный электрический ток затрачивает дополнительную энергию. Постоянный ток ни одного из этих явлений не вызывает, поэтому не требует дополнительных затрат энергии.

Сопротивление постоянному току называют *омическим*. Сопротивление переменному току называют *активным*. На активном сопротивлении, так же как и на омическом, происходит выделение тепла, пропорциональное выделенной электрической энергии. Разница между омическим и активным сопротивлением тем больше, чем больше частота переменного тока. Нормированное сопротивление резистора соответствует постоянному току.

Активными сопротивлениями в цепях переменного тока являются

нагревательные и осветительные приборы, а так же, как активные сопротивления, проявляют себя все устройства, на которых выделяется полезная мощность в любом виде.

Если через активное сопротивление R протекает переменный синусоидальный ток, то на нем действует переменное синусоидальное напряжение. Ток и напряжение имеют одинаковую частоту и совпадают по фазе, поэтому на активном сопротивлении нет сдвига фаз между напряжением и током: $\varphi_R = 0$.

Цепь переменного тока с индуктивностью L и емкостью C

Индуктивность и емкость проявляют себя в электрических цепях переменного тока как сопротивления.

Катушка индуктивности оказывает переменному току сопротивление, которое называют реактивным сопротивлением индуктивности или индуктивным сопротивлением – X_L . При наличии в цепи одного индуктивного сопротивления сдвиг фаз между напряжением и током $\varphi_L = +90^\circ$. При этом

$$X_L = \omega L = 2\pi fL. \quad (2.1)$$

Формула $X_L = \omega L$ показывает, что сопротивление индуктивности переменному току зависит от частоты. Это означает, что индуктивность по-разному пропускает ток низкой и ток высокой частоты.

Индуктивность не пропускает переменный ток высокой частоты (хуже пропускает). Чем больше частота, тем труднее проходит переменный ток. Катушка индуктивности используется для ограничения протекания переменного тока.

Конденсатор в электрической цепи переменного тока оказывает сопротивление переменному току, которое называется реактивным сопротивлением емкости, или проще емкостным сопротивлением X_C

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (2.2)$$

Сдвиг фаз в цепи с емкостью $\varphi_C = -90^\circ$.

Формула $X_C = 1/\omega C$ показывает, что сопротивление емкости переменному току зависит от частоты ω . Это означает, что емкость по-разному пропускает ток низкой и высокой частоты.

Емкость пропускает переменный ток тем лучше, чем выше частота. Емкость вообще не пропускает постоянный ток, и это ее важнейшее свойство. Одно из применений конденсатора состоит в том, что его ставят в те ветви схем, где запрещено протекание постоянного тока.

Электрические цепи переменного тока

Реальные электрические цепи переменного тока содержат сопротивление R , индуктивность L и емкость C .

Особенностью цепей переменного тока является наличие в них сдвига фаз φ между напряжением и током. Это связано с наличием в электрической цепи реактивных сопротивлений X_L и X_C , что во многом осложняет расчет этих цепей обычными алгебраическими методами. В связи с этим для анализа цепей переменного тока широко используют графические методы с изображением напряжения и тока векторами, т.е. отрезками прямых, имеющих не только величину, но и направление. Такого рода графики называются векторными диаграммами, а сам расчет – методом векторных диаграмм.

Последовательное соединение R – L

Электрическую цепь, состоящую из нескольких последовательно соединенных элементов, называют неразветвленной электрической цепью, или просто последовательной электрической цепью (рис. 2.1).

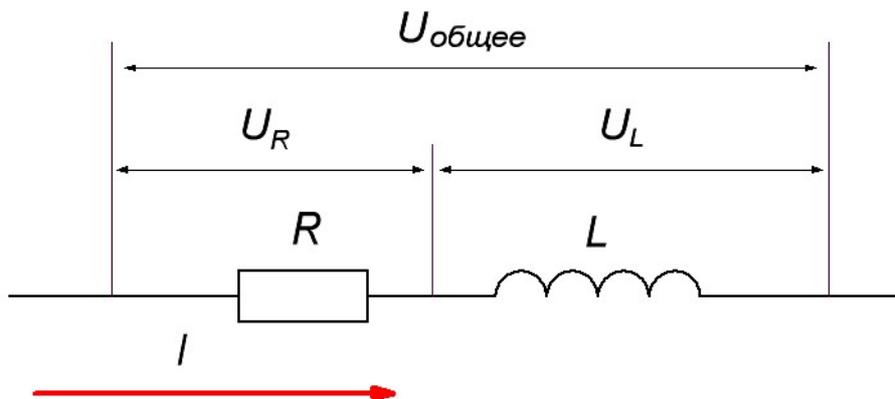


Рис. 2.1. Последовательная R – L цепь переменного тока

Особенностью такой цепи является то, что через все элементы цепи независимо от их количества и характера сопротивлений протекает одинаковый общий ток. Общее напряжение питающей цепи равно не просто сумме напряжений на каждом сопротивлении, оно равно векторной сумме, т.е. вектор общего напряжения равен сумме векторов напряжений на каждом участке цепи. При этом вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по направлению с вектором тока, а векторы напряжения на реактивных сопротивлениях образуют с вектором тока угол сдвига фазы φ между током и напряжением. Для расчетов напряжений надо построить векторную диаграмму напряжений.

Треугольник напряжений для расчета R–L цепи

Векторная диаграмма напряжений представляет собой векторный треугольник напряжений.

Для последовательного соединения полное напряжение цепи складывается из напряжений на элементах цепи. Значит, вектор суммарного напряжения U равен сумме напряжений на элементах цепи: вектору напряжения на сопротивлении U_R и вектору напряжения на катушке индуктивности U_L .

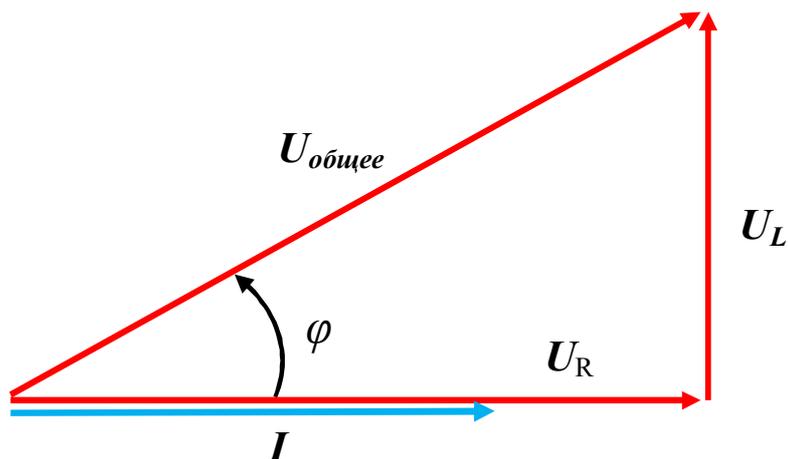


Рис. 2.2. Векторная диаграмма R–L цепи

Векторная диаграмма строится, как показано на рис. 2.2.

1. Вектор тока I изобразим как горизонтальный вектор слева направо.

2. Откладываем вектор напряжения на активном сопротивлении U_R . Этот вектор направлен горизонтально, т.к. сдвиг фаз на активном сопротивлении равен нулю: $\varphi_R = 0$.

3. Строим вектор напряжения на катушке индуктивности U_L . Его надо откладывать под углом 90° , т.к. напряжение на катушке опережает ток на 90° : $\varphi_L = +90^\circ$.

4. Построим вектор полного напряжения U на этих элементах цепи. Это вектор суммы, а он строится из начала первого вектора к концу второго.

Получился прямоугольный треугольник. Любую сторону этого треугольника можно найти по теореме Пифагора. Острый угол этого треугольника – это сдвиг фаз φ в этой цепи между током и общим напряжением.

Треугольник сопротивлений

Ток при последовательном соединении является общим для всех

сопротивлений цепи.

Треугольник напряжений позволяет построить треугольник сопротивлений. Для этого каждую сторону треугольника напряжений надо разделить на ток.

Полученный треугольник будет подобен треугольнику напряжений. Этот треугольник получается не векторный, а его стороны соответствуют сопротивлениям цепи.

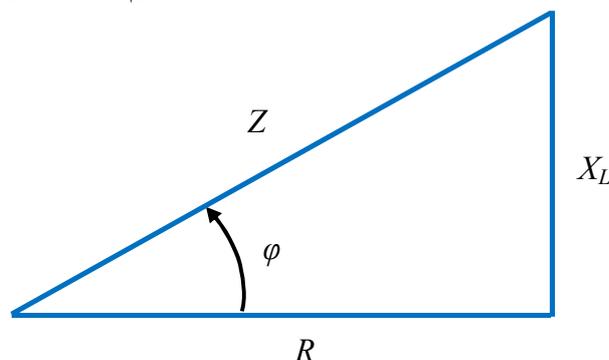


Рис. 2.3. Треугольник сопротивлений R–L цепи

На рис. 2.3 показано построение треугольника сопротивлений для цепи, имеющей активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X_L .

По теореме Пифагора из треугольника сопротивлений находим

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (2.3)$$

Из любого треугольника можно определить сдвиг фаз φ между напряжением и током. Действительно, по правилам тригонометрии тангенс угла прямоугольного треугольника равен частному от деления катета, противолежащего углу, на другой катет, т.е. в данном случае частному X_L/R , а это соотношение, как известно, определяет собой $\operatorname{tg}\varphi$. Зная тангенс угла, мы можем определить угол сдвига фаз φ .

Треугольник мощностей

Если каждую сторону треугольника напряжений умножить на один и тот же ток, то получится подобный треугольник, стороны которого пропорциональны мощности (рис. 2.4).

Это значит, что расчет мощностей для переменного тока производится также геометрически, потому что необходимо учитывать сдвиг фаз между напряжением и током.

Из треугольника мощностей следует, что в цепях переменного тока различают три вида мощности: активную, реактивную и полную.

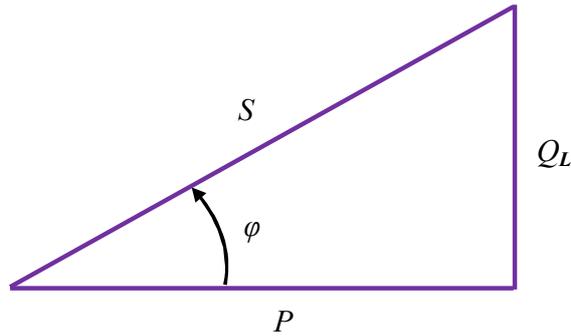


Рис. 2.4. Треугольник мощностей $R-L$ цепи

Активная мощность P равна произведению напряжения на активную составляющую тока:

$$P = U_R \cdot I = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_a. \quad (2.4)$$

Активная мощность расходуется на выполнение приемником полезной работы или выделяется в виде тепла на сопротивлении R .

Реактивная мощность Q равна произведению напряжения на реактивную составляющую тока:

$$Q = U_L \cdot I = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I_p. \quad (2.5)$$

Реактивная мощность выделяется на индуктивности и полезной работы не создает.

Полная мощность S определяется как геометрическая сумма активной и реактивной мощностей и равна

$$S = U \cdot I. \quad (2.6)$$

Полная мощность – это та мощность, которую источник вынужден отдавать цепи. Источник отдает полную мощность, которая больше полезной мощности из-за того, что цепь обладает индуктивностью.

Последовательное соединение $R-C$

Конденсаторы часто включают последовательно с сопротивлениями, но если даже специального сопротивления нет, любой конденсатор обладает определенной величиной активного сопротивления, которую необходимо учитывать (рис. 2.5).

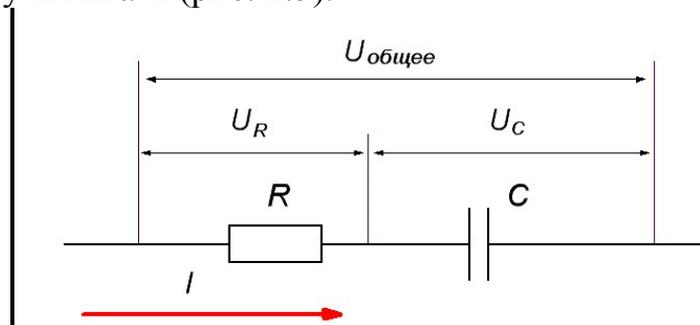


Рис. 2.5. Последовательная $R-C$ цепь переменного тока

Векторная диаграмма напряжений представляет собой прямоугольный треугольник, который позволяет определить все составляющие по теореме Пифагора.

Соотношение сопротивлений в такой цепи соответствует треугольнику сопротивлений. Для цепи, состоящей из активного сопротивления и емкости полное сопротивление равно

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} . \quad (2.7)$$

Соотношение мощностей такой цепи соответствует треугольнику мощностей. Все треугольники подобные, значит, угол φ (сдвиг фаз) является общим для всех треугольников.

Активное сопротивление R , включенное в цепь с катушкой или конденсатором, уменьшает угол сдвига фаз.

Экспериментальное определение параметров цепи

Измерение активной, реактивной, полной мощностей и $\cos\varphi$, а также параметров цепи, например R и L , можно произвести с помощью ваттметра, амперметра и вольтметра, включенных в цепь по схеме, изображенной на рис. 2.6.

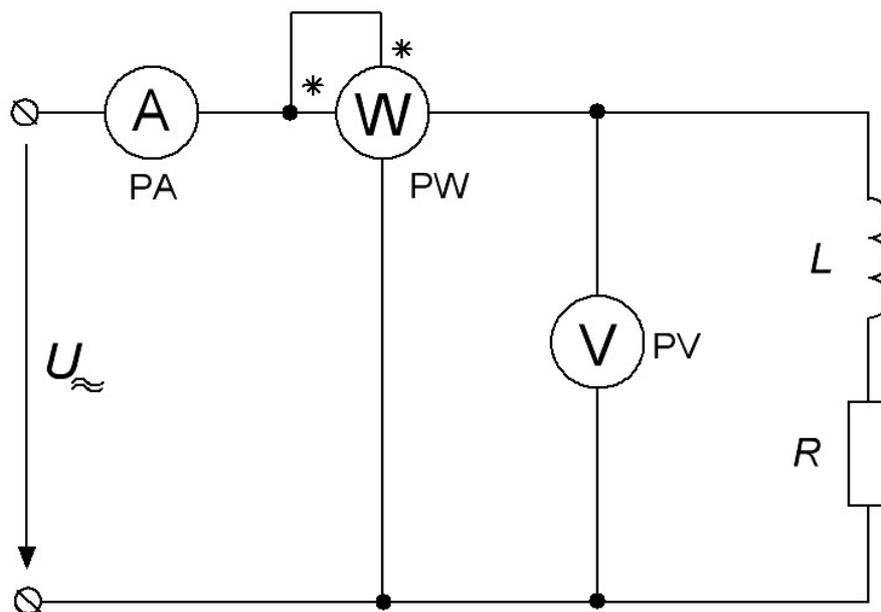


Рис. 2.6. Схема измерения основных параметров последовательной цепи переменного тока

Для цепи переменного тока закон Ома для действующих значений тока и напряжения имеет вид

$$I = \frac{U}{Z} . \quad (2.8)$$

По показаниям амперметра и вольтметра из закона Ома определяется полное сопротивление Z . По показаниям амперметра и ваттметра находится активное сопротивление цепи $R = P/I^2$. Затем можно определить реактивное сопротивление цепи

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} . \quad (2.9)$$

В случае активно–индуктивной нагрузки $X = X_L$, а в случае активно–ёмкостной цепи $X = X_C$. Зная частоту тока f , можно вычислить угловую частоту $\omega = 2\pi f$ и определить по формулам (3) или (4) индуктивность L и ёмкость C .

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования в данной лабораторной работе является однофазные последовательные R – L и R – C электрические цепи. С помощью измерительных приборов амперметра, вольтметров и ваттметра измеряются ток в цепи, напряжения в цепи и на каждом элементе, активная мощность.

В данной работе используется реальная катушка индуктивности (дроссель с регулируемым воздушным зазором), которая представлена на рисунке 2.7 активным сопротивлением R_L и идеальной катушкой индуктивности L с индуктивным сопротивлением $X_L = \omega \cdot L$.

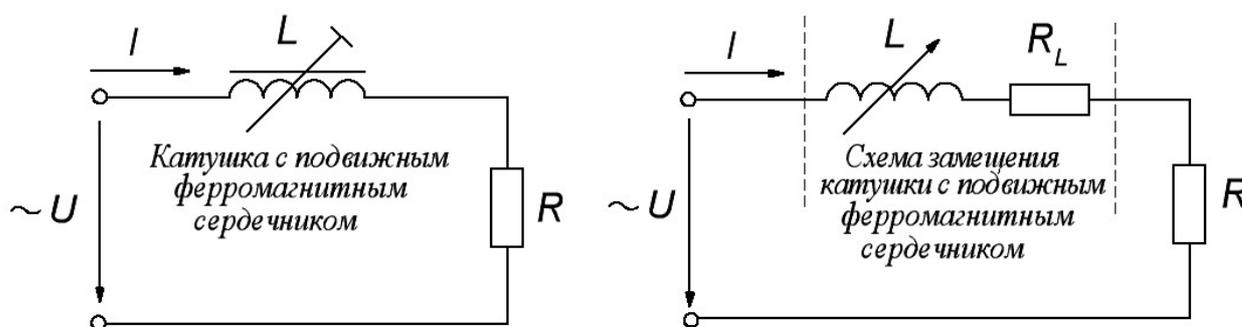


Рис. 2.7. Схема замещения дросселя с регулируемым воздушным зазором

Изменение напряжений на дросселе достигается изменением воздушного зазора в сердечнике.

По измеренным величинам необходимо рассчитать параметры элементов цепи и всей цепи переменного тока, построить векторные диаграммы и треугольники сопротивлений и мощностей.

3.2. СХЕМА ИССЛЕДУЕМОЙ R-L ЦЕПИ

На рис. 2.8 представлена электрическая схема соединения R-L с измерительными приборами.

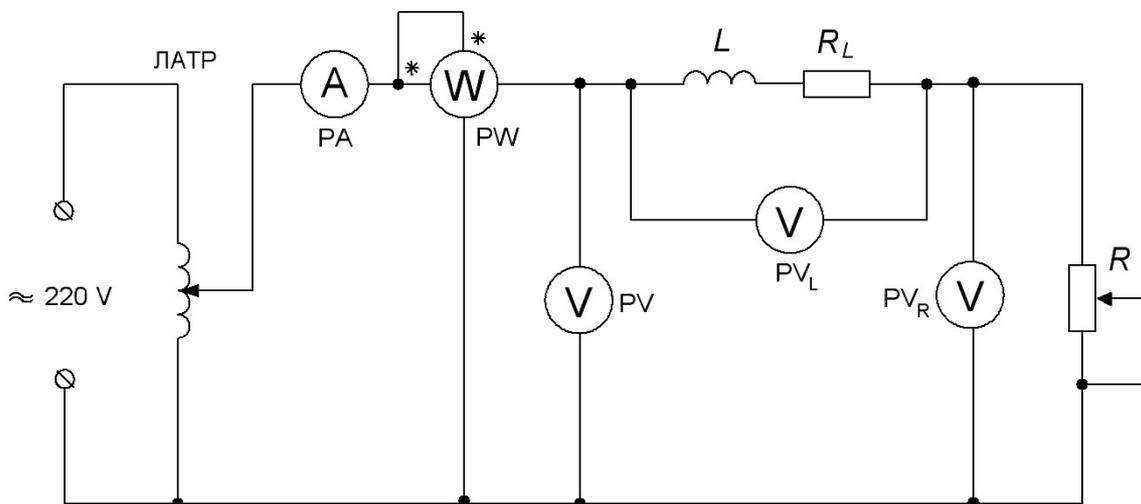


Рис. 2.8. Схема последовательной R-L цепи

Для напряжений, представленных в виде векторов, второй закон Кирхгофа имеет вид

$$U = U_L + U_R = I \cdot Z, \quad (2.10)$$

где U – приложенное напряжение сети;
 Z – полное сопротивление цепи.

Падение напряжения на катушке индуктивности

$$U_L = I \cdot Z_L. \quad (2.11)$$

Падение напряжения на активном сопротивлении

$$U_R = I \cdot R. \quad (2.12)$$

Вектор напряжения на реостате U_R совпадает по фазе с вектором тока, а вектор напряжения на катушке индуктивности U_L опережает ток на угол ϕ_L .

По измеренным, действующим значениям тока I , мощности P , напряжений на отдельных участках U , U_R , U_L можно рассчитать параметры всей цепи и ее отдельных элементов следующим образом:

- определяем значение полного сопротивления всей цепи Z исходя из показаний приборов

$$Z = \frac{U}{I}; \quad (2.13)$$

- активное сопротивление всей цепи R_0 найдем из формулы для мощности

$$P = I^2 R_0, \quad (2.14)$$

получим

$$R_0 = \frac{P}{I^2}; \quad (2.15)$$

- активное сопротивление R определяется по показаниям амперметра I и вольтметра U_R

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad (2.16)$$

- активное сопротивление всей цепи R_0 состоит из активного сопротивления катушки индуктивности R_L и активного сопротивления R

$$R_0 = R_L + R, \quad (2.17)$$

отсюда

$$R_L = R_0 - R; \quad (2.18)$$

- полное сопротивление катушки индуктивности Z_L

$$Z_L = \frac{U_L}{I}; \quad (2.19)$$

- из формулы для полного сопротивления Z_L

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (2.20)$$

определяется реактивное сопротивление X_L

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \quad (2.21)$$

- индуктивность катушки L найдем из определения реактивного сопротивления индуктивности

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L, \quad (2.22)$$

отсюда

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{\sqrt{Z_L^2 - R_L^2}}{2\pi f}, \quad (2.23)$$

где $f = 50$ Гц;

- коэффициент мощности всей цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad (2.24)$$

где угол φ показывает сдвиг фаз приложенного напряжения U к току I в цепи;

- сдвиг фаз на катушке индуктивности

$$\cos \varphi_L = \frac{R_L}{Z_L}. \quad (2.25)$$

Построение векторной диаграммы $R-L$ цепи (рис. 2.9) проводят в следующей последовательности:

1) в выбранном масштабе строится горизонтально вектор тока I , который является общим для всех элементов цепи.

2) после этого необходимо построить в выбранном масштабе вектора напряжений U_R и U_L под заданными углами сдвига фаз $\varphi_R = 0$ и φ_L , определенной по формуле 2.1.

3) вектор приложенного к цепи напряжения U находится как геометрическая сумма этих векторов напряжений.

4) опуская перпендикуляр от конца вектора U_L на горизонтальную ось тока, графически можно найти составляющие напряжения U_L ; U_{RL} – падение напряжения, приходящееся на активное сопротивление катушки индуктивности R_L ; U_{XL} – падение напряжения, приходящееся на реактивное сопротивление X_L катушки индуктивности.

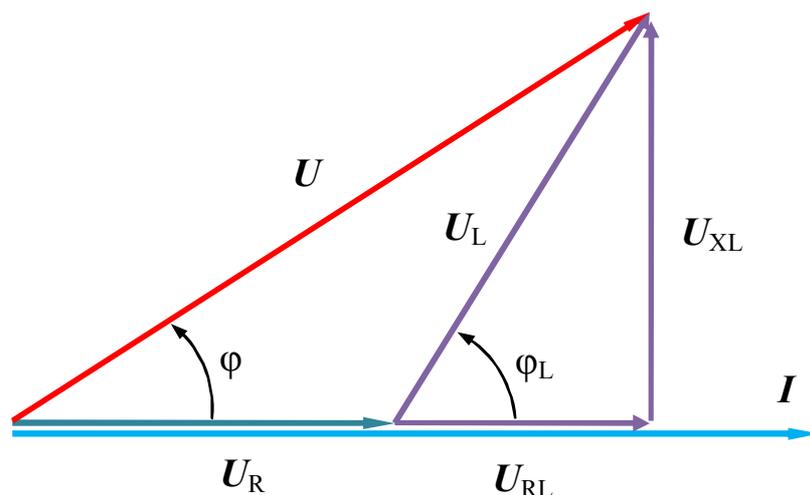


Рис. 2.9. Векторная диаграмма $R-L$ цепи

3.3. ИССЛЕДУЕМАЯ R-C ЦЕПЬ

Схема электрической цепи представлена на рис. 2.10. Общая методика расчета в случае реального конденсатора аналогична методике расчета цепи $R-L$.

Рассмотрим случай идеального конденсатора, т.е. конденсатор как идеальный реактивный элемент. В этом случае напряжение на емкости отстает от тока по фазе на 90^0 .

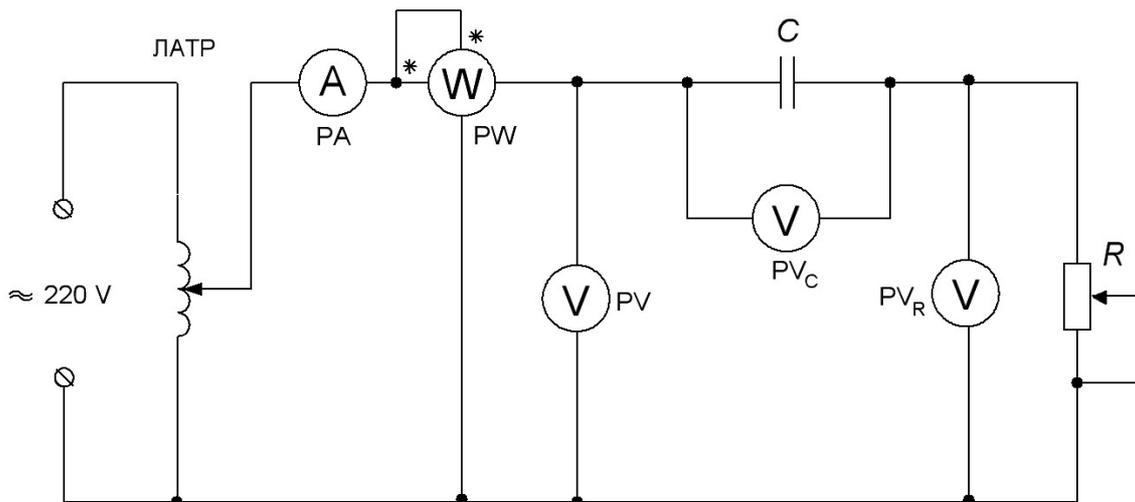


Рис. 2.10. Схема последовательной R–C цепи

По показаниям приборов можно рассчитать параметры цепи и ее отдельных элементов:

- полное сопротивление цепи

$$Z = \frac{U}{I}; \quad (2.26)$$

- активное сопротивление цепи

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad (2.27)$$

- реактивное сопротивление емкости

$$X_C = \frac{U_C}{I_C} = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad (2.28)$$

- емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi f X_C}, \quad (2.29)$$

где $f = 50$ Гц;

- коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{UI}. \quad (2.31)$$

Построение векторной диаграммы (рис. 2.11) следует начинать с вектора тока I . Затем в масштабе строятся векторы напряжений U_R и U_C с учетом сдвига фаз $\varphi_R = 0$ и $\varphi_C = -90^\circ$. Вектор приложенного к цепи напряжения U находится как геометрическая сумма векторов U_R и U_C .

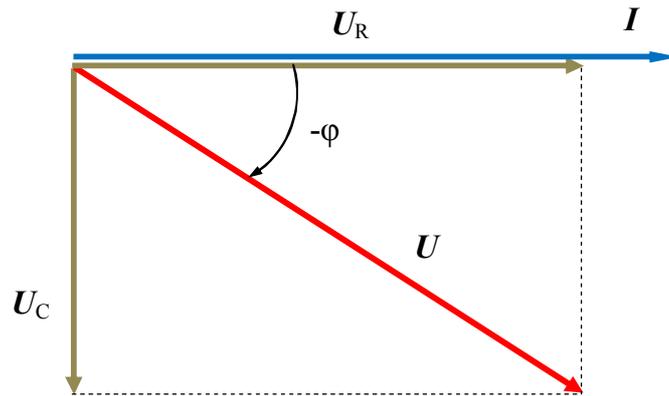


Рис. 2.11. Векторная диаграмма R–C цепи

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 2.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 2.1

Сведения об измерительных приборах

	PA	PV	PV_L	PV_C	PV_R	PW
Наименование прибора						
Тип прибора						
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)						
Предел измерения						
Класс точности						
Род тока						
Цена деления						
Абсолютная погрешность измерения						

4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ R-L ЦЕПИ

1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 2.8. Установить ручку регулятора входного напряжения ЛАТР в нулевое положение (т.е. повернуть по часовой стрелке до упора). **Собранную схему предъявить для проверки преподавателю.**

2. После проверки схемы преподавателем включением тумблера SA1 подать напряжение на ЛАТР. Плавно вращая ручку регулятора ЛАТР против часовой стрелки, подать напряжение на собранную электрическую цепь $\approx 100 \div 150$ В.

Измерение провести для двух случаев:

а) $U_L > U_R$;

б) $U_L < U_R$.

(Изменение напряжений достигается изменением сопротивления R_L и индуктивности L дросселя в результате изменения воздушного зазора в сердечнике).

3. Измерить значения напряжений, тока и мощности и записать в таблицу 2.2.

4. По окончании измерений ручку регулятора ЛАТР повернуть до упора по часовой стрелке и отключить тумблер SA1.

4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ R-C ЦЕПИ

1. Собрать схему по рис. 2.10. Установить ручку регулятора входного напряжения ЛАТР в нулевое положение (т.е. повернуть по часовой стрелке до упора). **Собранную схему предъявить для проверки преподавателю.**

2. После проверки схемы преподавателем включением тумблера SA1 подать напряжение на ЛАТР. Плавно вращая ручку регулятора ЛАТР против часовой стрелки, подать напряжение на собранную электрическую цепь $\approx 100 \div 150$ В. Измерения провести для двух случаев:

а) $U_C > U_R$;

б) $U_C < U_R$.

Указанные соотношения достигаются изменением активного сопротивления R .

3. Измеренные значения напряжений, тока и мощности записать в таблицу 2.2.

4. По окончании измерений ручку регулятора ЛАТР повернуть до упора по часовой стрелке и отключить тумблер SA1.

5. Результаты измерений необходимо предъявить преподавателю и по его указанию разобрать электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

Таблица 2.2

Измеренные величины

Характер цепи		$P,$ Вт	$I_I,$ А	$U_I,$ В	$U_L,$ В	$U_R,$ В	$U_C,$ В
R-L	$U_R > U_L$						
	$U_R < U_L$						
R-C	$U_R > U_C$						
	$U_R < U_C$						

4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По измеренным действующим значениям тока I , мощности P и напряжений на отдельных участках U_R , U_L , U_C рассчитать параметры R-L цепи по формулам (2.13–2.25) и параметры R-C цепи по формулам (2.26–2.31) и записать в таблицы 2.3 и 2.4. При числовых расчетах придерживаться следующего порядка: искомую величину выражают формулой, затем подставляют известные значения величин, записывают результат расчета (числовое значение искомой величины) и единицы измерения, промежуточные расчеты можно опускать.

Таблица 2.3

Вычисленные параметры R-L цепи

Характер цепи		$Z,$ Ом	$R_I,$ Ом	$R,$ Ом	$Z_L,$ Ом	$R_L,$ Ом	$X_L,$ Ом	$L,$ Гн	φ	φ_L
R-L	$U_R > U_L$									
	$U_R < U_L$									

Таблица 2.4

Вычисленные параметры R-C цепи

Характер цепи		$Z,$ Ом	$R,$ Ом	$X_C,$ Ом	$C,$ Ф	$\cos\varphi$	φ
R-C	$U_R > U_C$						
	$U_R < U_C$						

2. Построить в масштабе векторные диаграммы для всех измерений, а также треугольники сопротивлений и мощностей для $R-L$ и $R-C$ цепи.
3. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями.
4. Ответить на контрольные вопросы и защитить выполненную лабораторную работу.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое последовательная электрическая цепь?
2. Какие виды сопротивлений существуют в цепях переменного тока?
3. Что такое сдвиг фаз?
4. Чему равны индуктивное и емкостное сопротивления, и в каких единицах их измеряют?
5. Что такое коэффициент мощности?
6. Что такое полное сопротивление цепи, и чему оно равно в случае цепи $R-L$, $R-C$.
7. Записать закон Ома для действующих значений однофазной цепи переменного тока.
8. Что такое векторная диаграмма, как она строится для последовательной однофазной цепи переменного тока?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с последовательным соединением катушки индуктивности и емкости. Для этого необходимо:

1. Исследовать влияния величины индуктивности катушки на электрические параметры цепи однофазного синусоидального напряжения, содержащей последовательно соединенные катушки индуктивности и конденсатор.

2. Опытным путем определить условия возникновения в данной цепи резонанса напряжения.

3. Построить векторные диаграммы и резонансные кривые при последовательном соединении катушки и конденсатора.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Резонансом в электрических цепях называется режим работы электрической цепи переменного тока, содержащей индуктивный и емкостный элементы, при котором разность фаз φ между напряжением и током равна нулю ($\varphi = 0$).

Рассмотрим последовательное соединение элементов R , L и C (рис.1). Такую цепь иногда называют последовательным колебательным контуром.

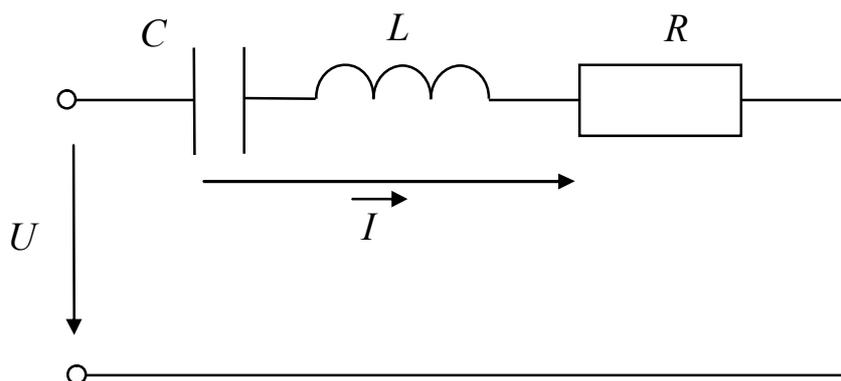


Рис. 3.1. Последовательный колебательный контур

Закон Ома для такой неразветвленной цепи имеет вид

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (3.1)$$

Знаменатель данного выражения есть значение полного сопротивления Z , которое зависит от частоты.

При определенных условиях реактивная составляющая полного сопротивления $X = X_L - X_C$ становится равной нулю и полное сопротивление Z становится минимальным

$$Z_{рез.} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = Z_{min} = R. \quad (3.2)$$

Ток в цепи возрастает до максимального значения

$$I_{рез.} = \frac{U}{R} = I_{max}, \quad (3.3)$$

причем напряжение и ток совпадает по фазе ($\varphi = 0$).

Это явление в цепи с последовательным соединением RLC элементов получило название резонанса напряжений.

Условие, при котором возникает резонанс напряжений, записывается в виде

$$X_L = X_C, \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (3.4)$$

где $\omega = \omega_0$ – резонансная угловая частота.

Резонансная частота ω_0 определяется из условия

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (3.5)$$

Тогда

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \text{ или } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.6)$$

Отсюда

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.7)$$

Эта формула получила название формулой Томпсона.

Если сопротивления катушки и конденсатора становятся равными при резонансе напряжений (3.4), то получается, что они полностью компенсируют друг друга. Следовательно, будут равны и падения напряжений на катушке и емкости

$$U_L = U_C. \quad (3.8)$$

Напряжение на активном сопротивлении $U_R = IR = U$, т.е. напряжение на активном сопротивлении равно полному напряжению, приложенному к цепи.

Векторная диаграмма такого случая приведена на рис. 3.2.

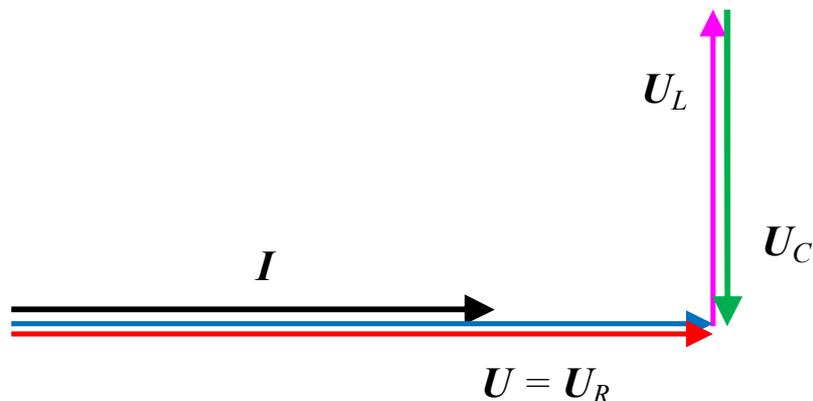


Рис. 3.2. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Энергетический процесс при резонансе напряжений можно рассматривать как наложение двух процессов: необратимого процесса преобразования потребляемой от источника энергии в тепло, выделяемое в активном сопротивлении цепи, и обратимого процесса, представляющего собой колебания энергии внутри цепи: между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора. Первый процесс характеризуется величиной активной мощности $P = R \cdot I^2$, а второй – величиной реактивной мощности $Q_L = X_L \cdot I^2 = X_C \cdot I^2 = Q_C$. Колебаний энергии между источником питания и участком цепи, включающим катушку и конденсатор, не происходит, и поэтому реактивная мощность всей цепи равна $Q = X \cdot I^2 = 0$.

2.2. СВОЙСТВА ЦЕПИ ПРИ РЕЗОНАНСЕ НАПРЯЖЕНИЙ

1. Общее сопротивление становится равным активному сопротивлению, а значит, становится наименьшим.
2. Ток становится наибольшим и совпадает по фазе с напряжением
3. Угол сдвига фаз становится равным нулю и, значит, цепь приобретает чисто активный характер.
4. Напряжение на колебательном контуре, то есть на реактивных элементах L и C , становится максимальным и может многократно превышать напряжение на активном сопротивлении.

Вывод: для получения максимального напряжения на колебательном контуре его необходимо ввести в состояние резонанса.

Колебательные контуры применяются в технике связи для выбора необходимой частоты передачи и приёма сигнала. Например, радиоприёмник принимает ту радиостанцию, частота которой соответствует резонансной частоте входного колебательного контура приёмника.

Из условий возникновения резонанса (3.4) следует, что практически резонанс напряжений можно получить изменением:

- 1) если меняется ёмкость и становится равной

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}; \quad (3.9)$$

- 2) если меняется индуктивность и становится равной

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad (3.10)$$

- 3) если одновременно меняются L и C

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}; \quad (3.11)$$

- 4) если меняется частота сети (частота вынужденных колебаний)

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.12)$$

2.3. ДОБРОТНОСТЬ КОНТУРА

Во сколько раз напряжение на катушке и конденсаторе может превышать напряжение на активном сопротивлении при резонансе? Для оценки контура при резонансе вводится специальное понятие – добротность контура. Кроме того, добротность контура – параметр, показывающий, как долго в контуре могут сохраняться собственные колебания.

Отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению на входе в режиме резонанса называется добротностью контура

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}. \quad (3.13)$$

Чем меньше активное сопротивление, тем меньше потери, тем больше добротность контура.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_L I}{RI} = \frac{U_L}{U}; \quad (3.14)$$

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{X_C I}{RI} = \frac{U_C}{U}. \quad (3.15)$$

При $X_L \gg R$ напряжения на индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе напряжений могут значительно превысить напряжение

источника, что опасно для изоляции катушки и конденсатора. В промышленных сетях резонанс напряжений является аварийным режимом, так как увеличение напряжения может привести к пробое цепи.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуется цепь с последовательным соединением постоянного конденсатора и переменной индуктивности. Изменение индуктивности в катушке осуществляется в результате изменения воздушного зазора в подвижном ферромагнитном сердечнике.

На рис. 3.3. изображена LC -цепь и схема замещения этой цепи.

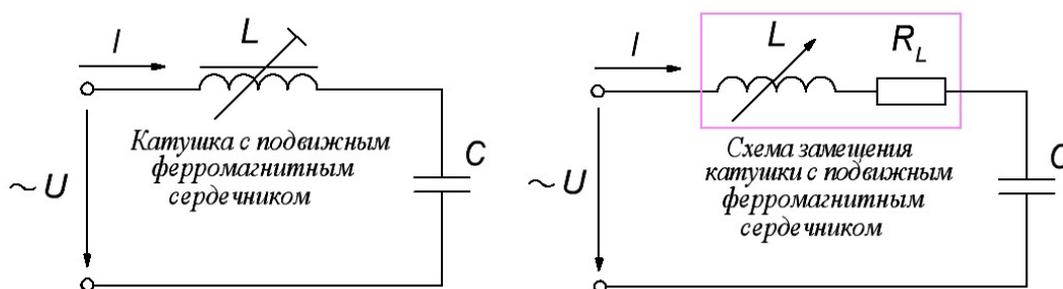


Рис. 3.3. Схема цепи с конденсатором и катушки с подвижным сердечником

Ток в такой цепи отстает по фазе от напряжения при $X_L > X_C$ и опережает по фазе напряжение при $X_L < X_C$. При равенстве индуктивного X_L и емкостного сопротивлений X_C в цепи возникает резонанс напряжений.

Изменяя индуктивность катушки в LC -цепи необходимо снять показания измерительных приборов. По данным измерений рассчитать цепь и построить диаграмму, а также резонансные кривые.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 3.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.
4. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 3.4).

5. Установить ручку регулятора входного напряжения ЛАТР в нулевое положение (т.е. повернуть по часовой стрелке до упора). Собранныю схему предъявить для проверки преподавателю.

Таблица 3.1

Сведения об измерительных приборах

	PA	PV	PV_L	PV_C	PV_R	PW
Наименование прибора						
Тип прибора						
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)						
Предел измерения						
Класс точности						
Род тока						
Цена деления						
Абсолютная погрешность измерения						

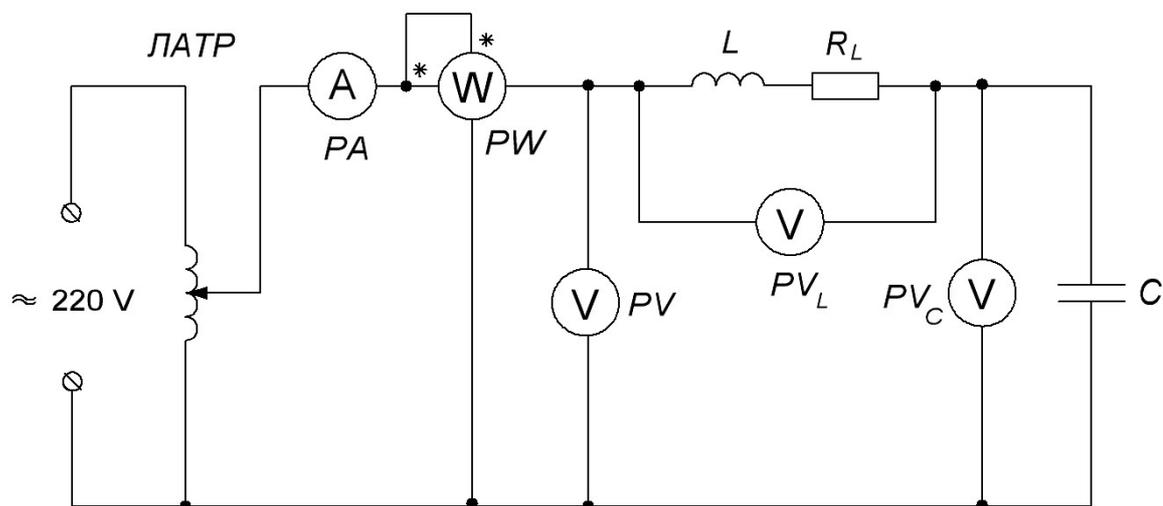


Рис.3.4. Исследуемая LC-цепь

6. Установить максимально возможную индуктивность в цепи, для чего убрать воздушный зазор в сердечнике катушки.

7. Включением тумблера $SA1$ подать напряжение на ЛАТР. Плавно вращая ручку регулятора ЛАТР, подать напряжение на собранную электрическую цепь $\approx 20 \div 30$ В.

8. Постепенно выдвигая сердечник дросселя, определить максимальное значение тока I_{max} , после чего установить сердечник в исходное состояние. При изменении индуктивности следить за показаниями амперметра $PA1$, не допуская увеличения тока I_1 более 1 А.

9. Медленно выдвигая сердечник, снять показания приборов для трех точек до резонанса, резонанс и четырех точек после резонанса. Интервал между точками $\Delta I \approx (I_{max} - 1)/3$.

10. Измерить значения напряжений, тока и мощности и записать в таблицу 3.2.

11. Проверить значение коэффициента мощности в цепи в точке резонанса

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_1 \cdot I_1}. \quad (3.16)$$

Это значение должно быть близко к единице. Если получена величина, существенно отличающаяся от 1, то это означает, что работа или расчет $\cos \varphi$ выполнены неправильно.

12. По окончании измерений ручку регулятора ЛАТР повернуть до упора по часовой стрелке и отключить тумблер $SA1$.

Таблица 3.2

Измеренные величины

№ п/п	Характер цепи	P , Вт	I_1 , А	U_1 , В	U_L , В	U_C , В
1	$U_L > U_C$					
2						
3						
4	$U_L = U_C$					
5	$U_L < U_C$					
6						
7						

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислить величины и записать в таблицу 3.3:

- полное сопротивление цепи

$$Z = \frac{U_1}{I_1}; \quad (3.17)$$

- полное сопротивление катушки индуктивности

$$Z_L = \frac{U_L}{I_1}; \quad (3.18)$$

- активное сопротивление катушки, учитывающее потери энергии в обмотке и стальном сердечнике катушки

$$R_L = \frac{P}{I_1^2}; \quad (3.19)$$

- индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \quad (3.20)$$

- индуктивность катушки

$$L = \frac{X_L}{\omega}, \quad (3.21)$$

где $\omega = 2\pi f$ и частота $f = 50$ Гц;

- активная составляющая напряжения на катушке

$$U_{R_L} = R_L \cdot I; \quad (3.22)$$

- индуктивная составляющая напряжения на катушке

$$U_L = X_L \cdot I; \quad (3.23)$$

- емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{U_C}{I}; \quad (3.24)$$

- емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}; \quad (3.25)$$

- коэффициента мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_1 \cdot I_1}. \quad (3.26)$$

2. Построить в общей системе координат зависимости I_1 , U_L , U_C , $\cos \varphi$, Z как функции L .

3. Используя данные опыта и расчета, построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и тока для трех случаев

$$X_L > X_C, X_L = X_C \text{ и } X_L < X_C. \quad (3.27)$$

4. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями.

5. Проанализировать кривые I_1 , U_L , U_C , $\cos \varphi$, Z как функции от L и написать выводы по работе. Выводы должны отражать основную суть физических процессов в цепи переменного тока с последовательным соединением разных по характеру элементов; содержать анализ вида кри-

вых ($I_1, U_L, U_C, \cos\varphi, Z$) = $f(L)$ и оценку значений указанных величин при резонансе напряжений.

6. Ответить на контрольные вопросы и защитить выполненную лабораторную работу.

Таблица 3.3

Вычисленные величины

№ п/п	Z, Ом	Z _L , Ом	R _L , Ом	X _L , Ом	L, мГн	U _{RL} , В	U _L , В	X _C , Ом	C, мкф	cosφ
1										
2										
3										
4										
5										

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.

2. В какой цепи и при каком условии наступает резонанс напряжений?

3. Объясните энергетические процессы, протекающие в электрической цепи при резонансе напряжений.

4. Объясните, почему при резонансе напряжений ток в цепи максимален? Почему сдвиг фаз φ равен нулю?

5. Как изменится резонансная частота в цепи с последовательным соединением r, L, C , если емкость увеличить в 4 раза?

6. На каком участке цепи (рис. 3.1) напряжение при резонансе равно напряжению источника питания?

7. Оцените величину коэффициента мощности при резонансе напряжений по сравнению с коэффициентом мощности до резонанса.

8. Каким электроизмерительным прибором можно определить состояние резонанса в неразветвленной цепи, если настройка в резонанс ведется при неизменном действующем значении входного напряжения?

9. К каким аварийным последствиям может привести резонанс напряжений в электрических цепях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОДНОФАЗНАЯ ЦЕПЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать работу электрической цепи однофазного синусоидального тока с параллельным соединением элементов:

- 1) исследование влияния величины индуктивности катушки на электрические параметры цепи однофазного синусоидального напряжения с параллельным соединением элементов;
- 2) опытное определение условий возникновения в данной цепи резонанса токов;
- 3) построить векторные диаграммы и резонансные кривые при последовательном соединении катушки и конденсатора;
- 4) научиться вычислять параметры цепи и строить векторные диаграммы цепи с параллельным соединением элементов.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На рис. 4.1 представлена электрическая цепь однофазного синусоидального напряжения с параллельным соединением двух приемников, один из которых на схеме замещен последовательным соединением резистора и емкостного элемента, а второй – последовательным соединением резистора и индуктивного элемента.

Токи в приемниках определяются по закону Ома

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}, I_2 = \frac{U}{Z_2}, \quad (4.1)$$

где U – действующее значение напряжения источника электрической энергии;

I_1, I_2 – токи в параллельных ветвях цепи;

Z_1, Z_2 – полные сопротивления ветвей.

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_C^2}, Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_L^2}, \quad (4.2)$$

где R_1, X_C – активное и емкостное сопротивление первой ветви;

R_2, X_L – активное и индуктивное сопротивление второй ветви.

Вектор тока источника электрической энергии равен сумме векторов токов приемников

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2. \quad (4.3)$$

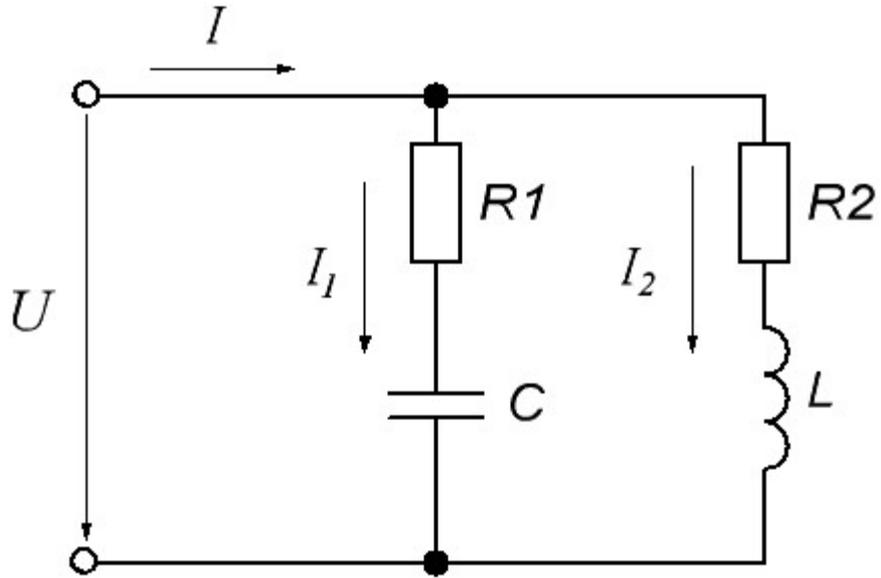


Рис. 4.1. Параллельная цепь переменного тока

При исследовании процессов в цепях с параллельным соединением приемников вектор тока в каждой ветви условно представляют в виде суммы векторов активной и реактивной составляющих тока. Вектор активной составляющей тока I_a совпадает по направлению с вектором напряжения U , а вектор реактивной составляющей I_p перпендикулярен этому вектору (рис. 4.2).

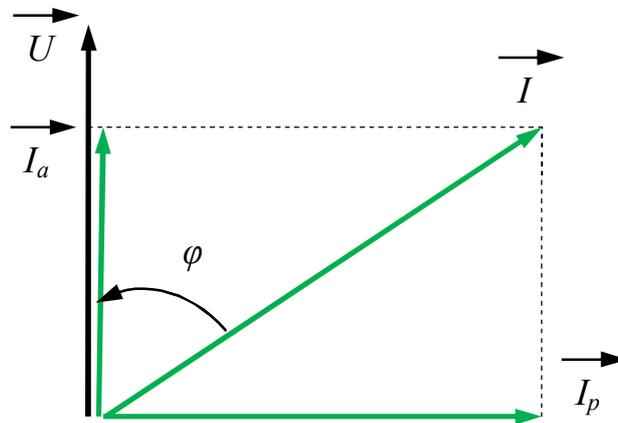


Рис. 4.2. Разложение тока на активную и реактивную составляющие

Из треугольника токов (рис. 4.2) величины активной и реактивной составляющих тока определяются

$$I_a = I \cos \varphi ; I_p = I \sin \varphi , \quad (4.4)$$

где φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

На рис. 4.3 представлена векторная диаграмма напряжений и токов для параллельной цепи переменного тока, приведенной на рис. 4.1.

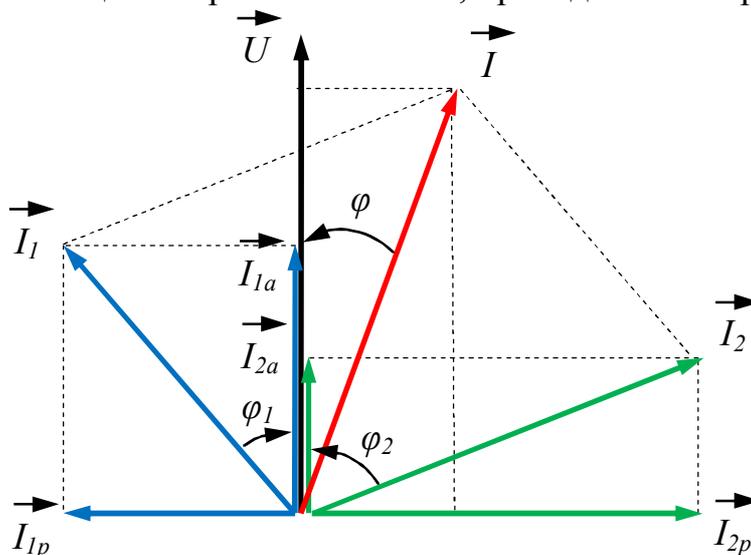


Рис. 4.3. Векторная диаграмма напряжений и токов параллельной цепи переменного тока

Величины активной и реактивной составляющих токов приемника

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1; \quad (4.5)$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \quad (4.6)$$

где φ_1 и φ_2 – углы сдвига фаз между вектором напряжения U и векторами токов I_1 и I_2 .

Представление токов активными и реактивными составляющими позволяет путем их сложения найти активную I_a и реактивную I_p составляющую тока источника и по ним определить ток источника I

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{1a} + \vec{I}_{2a}; \quad \vec{I}_p = \vec{I}_{1p} + \vec{I}_{2p}; \quad \vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_p. \quad (4.7)$$

Из векторной диаграммы рис. 4.3 следует

$$I_a = I_{1a} + I_{2a}; \quad I_p = I_{2p} - I_{1p}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (4.8)$$

Косинус угла сдвига фаз между вектором тока источника I и вектором напряжения источника U определяется из выражения

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}. \quad (4.9)$$

Иногда при расчетах параллельных цепей переменного тока используют понятия проводимости. Активная, реактивная и полная проводимости связаны с активными и реактивными сопротивлениями этих же ветвей равенствами

$$g = \frac{R}{Z^2}; b = \frac{X}{Z^2}; Y = \frac{1}{Z}. \quad (4.10)$$

Полная проводимость всей ветви определяется выражением

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (4.11)$$

где $g = \sum_{K=1}^N g_K$, $b_L = \sum_{K=1}^N b_{LK}$, $b_C = \sum_{K=1}^N b_{CK}$ – активная, индуктивная и ем-

костная проводимости всей электрической цепи, равные сумме всех активных, индуктивных и емкостных проводимостей отдельных параллельных ветвей;

$b_L - b_C = b$ – реактивная проводимость всей электрической цепи.

Угол сдвига фаз между общим током цепи и напряжением источника питания

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}. \quad (4.12)$$

Активные и реактивные проводимости связаны с полной проводимостью выражениями

$$g = Y \cdot \cos \varphi; b = Y \cdot \sin \varphi. \quad (4.13)$$

Величина общего тока, потребляемого участком цепи с параллельным соединением активных, индуктивных и емкостных сопротивлений, определяется выражением

$$I = U \cdot Y, \quad (4.14)$$

где U – напряжение на зажимах цепи;

Y – полная проводимость всей цепи.

2.2. РЕЗОНАНС ТОКОВ

В электрических цепях с параллельным соединением приемников, содержащих индуктивные и емкостные элементы, может, при определенных условиях, возникать явление резонанса токов. Резонансом токов называется режим, при котором ток источника электрической энергии совпадает по фазе с напряжением источника, т.е. $\varphi = 0$.

Применительно к электрической цепи, изображенной на рис. 4.1:

$$Q = Q_L - Q_C = S \sin \varphi = 0; I_p = I_{2p} - I_{1p} = I \sin \varphi = 0. \quad (4.15)$$

Следовательно, условием резонанса токов является равенство нулю реактивной мощности цепи и реактивной составляющей тока источника электрической энергии.

Из условия резонанса токов следует, что

$$Q_L = Q_C, I_{1p} = I_{2p}. \quad (4.16)$$

При резонансе токов коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} = 1. \quad (4.17)$$

Ток в ветви с источником электрической энергии содержит только активную составляющую, является минимальным по величине и может оказаться значительно меньше токов в каждом из параллельно включенных приемников

$$I = I_{1a} + I_{2a} = I_a = I_{min}. \quad (4.18)$$

2.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ И РЕАЛЬНОЙ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Рассмотрим электрическую цепь параллельно соединенных идеальной емкости и реальной катушки индуктивности. В большинстве случаев такие допущения делаются на практике (рис. 4.4).

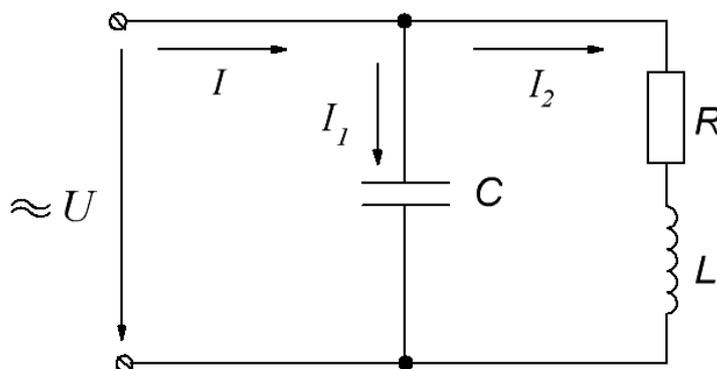


Рис. 4.4. Параллельная цепь однофазного переменного тока

Рассмотрим три возможных случая.

1. При $b_L > b_C$ нагрузка имеет индуктивный характер. Вектор общего тока I отстает по фазе от вектора напряжения U на угол φ (рис. 4.5).

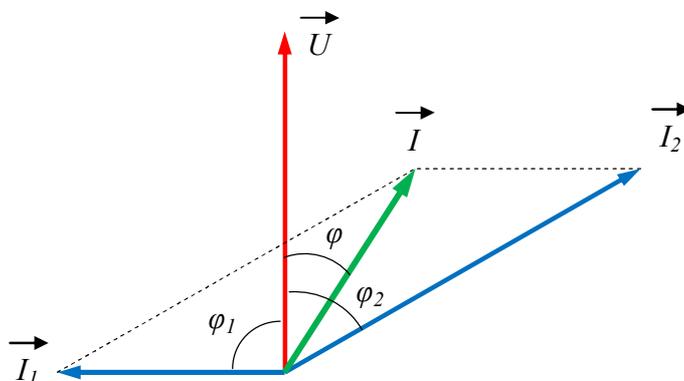


Рис. 4.5. Векторная диаграмма при $b_L > b_C$

Ток через конденсатор $I_1 = b_C \cdot U$. Ток через индуктивность $I_2 = b_L \cdot U$.

При этом ток через конденсатор по величине меньше тока через катушку индуктивности

$$I_1 < I_2. \quad (4.19)$$

2. При $b_L < b_C$ цепь имеет емкостной характер. Вектор общего тока I опережает по фазе вектор напряжения U источника на угол φ (рис. 4.3).

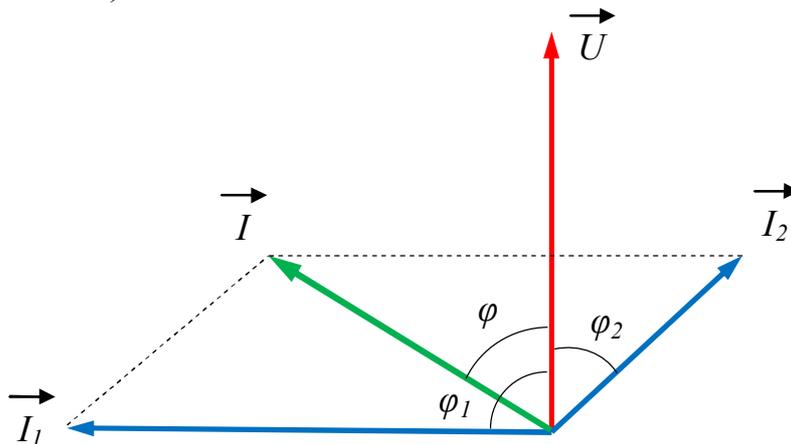


Рис. 4.6. Векторная диаграмма при $b_L < b_C$

Ток через конденсатор по величине больше тока через катушку индуктивности

$$I_1 > I_2. \quad (4.20)$$

3. Если $b_L = b_C$, в цепи наступает резонанс токов, при котором сдвиг фаз между общим напряжением и общим током оказывается равным нулю (рис. 4.7).

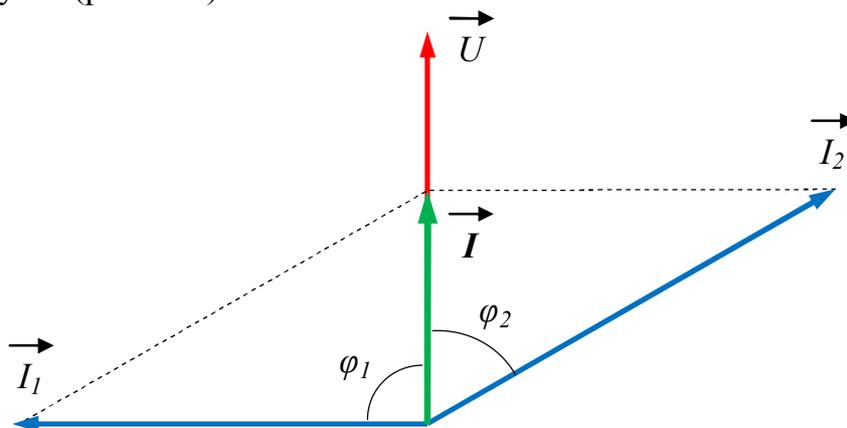


Рис. 4.7. Векторная диаграмма при $b_L = b_C$

Общее сопротивление цепи при резонансе резко увеличивается, а общий ток I уменьшается и становится минимальным

$$I = U \cdot Y = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = U \cdot g. \quad (4.21)$$

Таким образом, полное сопротивление цепи оказывается чисто активным и очень высоким (g – малая величина, определяемая омическим сопротивлением проводов катушки: $Y = g$).

Энергетический процесс при резонансе можно рассматривать как наложение двух процессов: необратимого преобразования потребляемой от источника энергии в тепло, выделяемое в активном сопротивлении, и процесса, представляющего собой колебание энергии внутри цепи – между магнитным полем катушки индуктивности и электрическим полем конденсатора. Первый процесс характеризуется величиной активной мощности P , а второй – величиной реактивной мощности $Q_L = Q_C$. Колебания между источником и цепью не происходит: $Q = Q_L - Q_C = 0$.

Если активная проводимость катушки меньше ее индуктивной проводимости, то токи через катушку и конденсатор могут значительно превышать общий ток I . Превышение токов I_1 и I_2 над общим током характеризует параметр цепи, который называется коэффициентом добротности

$$q = \frac{b_L}{g} = \frac{b_C}{g} = \frac{I_1}{I} \approx \frac{I_2}{I}. \quad (4.22)$$

Резонансные явления очень широко применяются в электротехнике и в радиотехнических устройствах. Электрические фильтры различных электротехнических устройств являются также резонансными цепями.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуется цепь с параллельным соединением постоянного конденсатора и переменной индуктивности. Изменение индуктивности в катушке осуществляется в результате изменения воздушного зазора в подвижном ферромагнитном сердечнике.

Изменяя индуктивность катушки в LC -цепи, необходимо снять показания измерительных приборов для трех случаев:

- а) цепь имеет индуктивный характер ($I_L > I_C$);
- б) резонанс ($I_L = I_C$);
- в) цепь имеет емкостной характер ($I_L < I_C$).

По данным измерений рассчитать цепь и построить векторные диа-

граммы.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 4.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 4.1

Сведения об измерительных приборах

	<i>PA1</i>	<i>PA2</i>	<i>PA3</i>	<i>PV</i>	<i>PW</i>
Наименование прибора					
Тип и номер прибора					
Измерительный механизм					
Предел измерений					
Класс точности					
Род тока					
Цена деления прибора					
Абсолютная погрешность измерения					

4. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 4.8. В качестве амперметров *PA2* и *PA3* использовать стрелочные измерительные приборы типа АСТ, ваттметр АСТД.

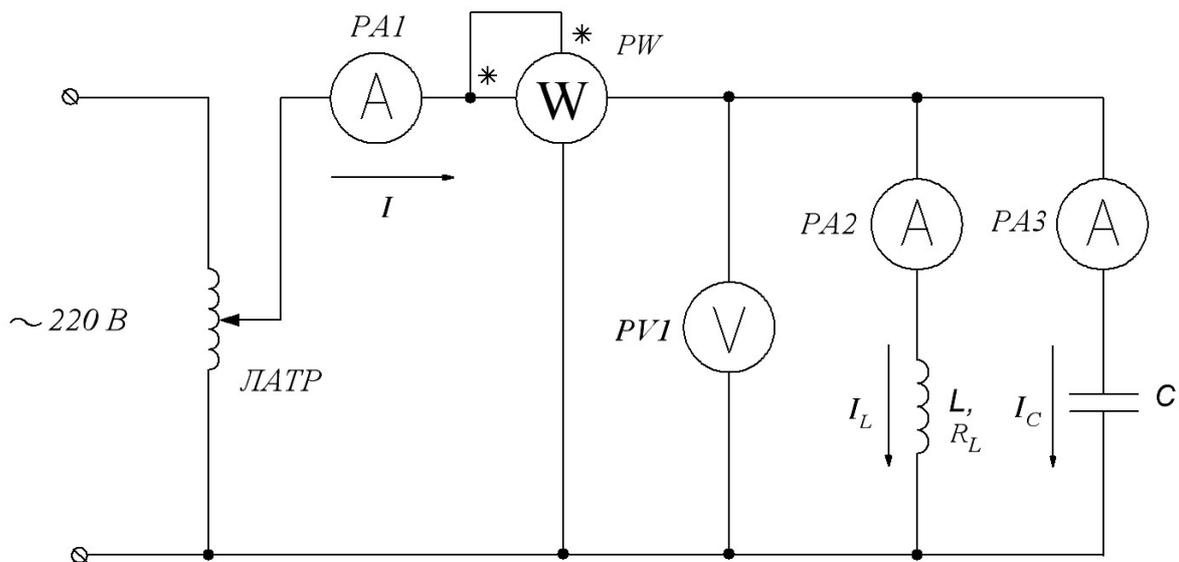


Рис. 4.8. Исследуемая LC-цепь

5. Подать напряжение с ЛАТР на электрическую схему, измерить все токи, напряжение и мощность. Измерения проводятся отдельно для трех случаев:

- а) цепь имеет индуктивный характер ($I_L > I_C$);
- а) резонанс ($I_L = I_C$);
- а) цепь имеет емкостной характер ($I_L < I_C$).

Экспериментальные данные занести в таблицу 2.

Примечание. Изменение соотношения b_L и b_C (токов I_L и I_C) производится с помощью регулировки воздушного зазора катушки индуктивности.

Варьируя индуктивностью, необходимо следить за показаниями всех контрольно-измерительных приборов, не допуская их «зашкаливания». В случае перегрузки переходите на более грубый предел измерения или уменьшайте с помощью ЛАТР входное напряжение.

Таблица 4.2

Параметры исследуемой LC-цепи

Характер цепи	Измерено					Вычислено								
	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$I_L, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$Y, \text{См}$	$g, \text{См}$	$b, \text{См}$	$\cos\varphi$	φ	$b_L, \text{См}$	$L, \text{Гн}$	$b_C, \text{См}$	$C, \text{Ф}$
$b_L > b_C$														

$b_L = b_C$														
$b_L < b_C$														

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

- Используя полученные экспериментальные данные, рассчитать параметры цепи и занести полученные результаты в таблицу 4.2.

Формулы для расчета:

- проводимости

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U}; \quad (4.23)$$

$$P = UI \cos \varphi; \quad g = Y \cos \varphi; \quad b = Y \sin \varphi; \quad (4.24)$$

- общий сдвиг фаз в цепи

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g} = \arctg \frac{b}{g}; \quad (4.25)$$

- емкостная реактивная проводимость

$$b_C = \frac{1}{X_C} = \frac{I_C}{U}; \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}; \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad (4.26)$$

- полное сопротивление катушки индуктивности

$$Z_L = \frac{U}{I_L}; \quad (4.27)$$

- активное сопротивление катушки, учитывающее потери энергии в обмотке и стальном сердечнике катушки

$$R_L = \frac{P}{I_L^2}; \quad (4.28)$$

- индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \quad (4.29)$$

- индуктивность катушки

$$L = \frac{X_L}{\omega}, \quad (4.30)$$

где $\omega = 2\pi f$ и частота $f = 50$ Гц;

- индуктивная реактивная проводимость

$$b_L = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{X_L I_L^2}{U^2}. \quad (4.31)$$

2. Для всех трех случаев из табл. 4.2 построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Векторные диаграммы построить по аналогии с рис. 4.3, для этого воспользоваться формулами

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1; \quad (4.32)$$

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2, \quad (4.33)$$

учитывая, что $\varphi_2 = -90^\circ$ (идеальный конденсатор), сдвиг фаз на катушке индуктивности (первой ветви)

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_L}{Z_L}. \quad (4.34)$$

$$I_a = I_{1a} + I_{2a}; \quad I_p = I_{2p} - I_{1p}; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (4.35)$$

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое параллельная цепь?
2. Что такое активная и реактивная составляющие тока?
3. Что такое полная, активная и реактивная проводимости?
4. Как выглядит векторная диаграмма для цепи с индуктивной, емкостной нагрузкой и при резонансе токов?
5. Назовите условие резонанса в электрических цепях.
6. Каковы признаки явления резонанса в параллельной цепи?
7. Что такое добротность контура и способы ее измерения?
8. Что определяет добротность конденсатора и катушки индуктивности?
9. Как получить резонанс параллельного колебательного контура на заданной частоте $f_{\text{рез}}$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ «ЗВЕЗДОЙ»

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой», определение соотношений между линейными и фазными напряжениями при различных режимах работы, построение векторных диаграмм. Выяснение роли нулевого провода в четырехпроводной системе трехфазного тока.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Трехфазная электрическая цепь – это совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга и создаваемые общим источником электрической энергии.

Фаза – отдельная электрическая цепь, входящая в состав трехфазной цепи, в которой может протекать один из токов трехфазной систе-

мы. Фазными называют отдельные элементы этой цепи, например, фазные обмотки трехфазного источника и др. Общепринятое обозначение фаз трехфазной цепи приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Обозначение фаз в трехфазных электрических цепях

Фаза	Источник		Приемник	
	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>A</i>	<i>A</i>	<i>X</i>	<i>a</i>	<i>x</i>
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Y</i>	<i>b</i>	<i>y</i>
<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Z</i>	<i>c</i>	<i>z</i>

Источник электрической энергии и потребитель соединяются при помощи линейных проводов.

Линейные провода – провода, соединяющие начала одноименных фаз источника и приемника.

В трехфазной электрической цепи различают фазные и линейные токи и напряжения.

Фазное напряжение U_{Φ} – напряжение между началом и концом фазы источника энергии или приемника.

Фазный ток I_{Φ} – ток в фазе трехфазной цепи.

Линейный ток $I_{\text{Л}}$ – ток в линейных проводах.

Линейное напряжение $U_{\text{Л}}$ – напряжение между линейными проводами или между началами разных фаз.

Если три фазы потребителя имеют одинаковые сопротивления $Z_a = Z_b = Z_c$ и сдвиг фаз φ в фазах одинаковый, то такой приемник (потребитель) называют симметричным (равномерным). Если не соблюдается хотя бы одно из условий равенства, то такой приемник называют несимметричным (неравномерным). В качестве примера симметричной нагрузки можно назвать трехфазные трансформаторы, трехфазные асинхронные двигатели и др. Несимметричной нагрузкой является осветительная сеть.

Основными способами соединения фаз генератора и приемника являются соединения звездой и треугольником. В данной лабораторной работе исследуется трехфазная цепь соединения звездой.

2.2. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ

Соединение, при котором все концы фаз приемника или источника соединены в один узел, а к началам фаз присоединяются линейные провода, называют соединением звездой. Узел, в котором соединяются концы фаз, называют нулевой или нейтральной точкой.

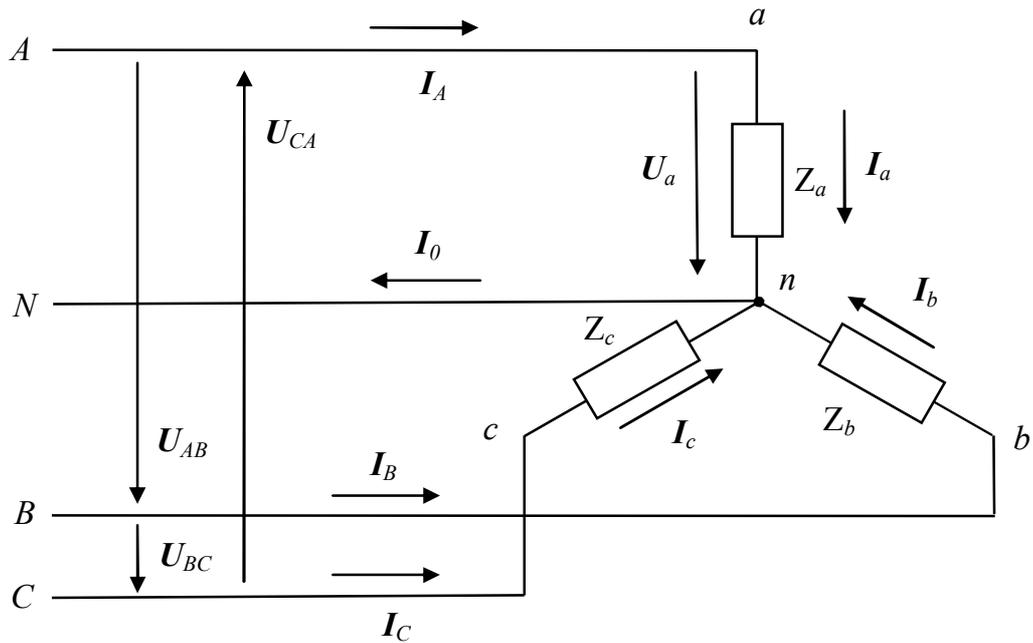


Рис. 5.1. Схема трехфазной цепи при соединении потребителя звездой

На рисунке 5.1 показано соединение звездой фаз приемника:

- $A-a, B-b, C-c$ – линейные провода;
- точка N – нулевая (нейтральная) точка генератора, соответственно точка n – нулевая (нейтральная) точка приемника, потребителя;
- $N-n$ – нулевой или нейтральный провод;
- I_0 – ток в нейтральном проводе (называют нулевым или нейтральным током);
- U_a, U_b, U_c – фазные напряжения приемника (на рисунке 1 показано только одно фазное напряжение – U_a);
- I_a, I_b, I_c – фазные токи потребителя;
- U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения;
- I_A, I_B, I_C – линейные токи;
- Z_a, Z_b, Z_c – сопротивления фаз нагрузки.

Как видно из рис. 5.1, если потребители соединены в звезду с нулевым проводом, то фазный ток равен линейному току

$$I_{\Phi} = I_L. \quad (5.1)$$

Тогда ток в нулевом проводе

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (5.2)$$

Линейные напряжения равны разности фазных напряжений

$$U_{AB} = U_a - U_b, \quad (5.3)$$

$$U_{BC} = U_b - U_c, \quad (5.4)$$

$$U_{CA} = U_c - U_a. \quad (5.5)$$

Сложив левые и правые части равенств 5.3–5.5, получим:

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0. \quad (5.6)$$

Соотношения (5.3–5.5) связывают фазные и линейные напряжения при соединении трехфазных приемников звездой и используются для определения значений этих напряжений. Они справедливы для любых видов нагрузки.

2.3. СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

В случае симметричной нагрузки токи в фазах равны и определяются по закону Ома

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a}; I_b = \frac{U_b}{Z_b}; I_c = \frac{U_c}{Z_c}. \quad (5.7)$$

Углы сдвига фаз также будут равны и определяются для каждой фазы

$$\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a}; \varphi_b = \arctg \frac{X_b}{R_b}; \varphi_c = \arctg \frac{X_c}{R_c}. \quad (5.8)$$

Векторная диаграмма для случая симметричной нагрузки строится следующим образом (рис. 5.2).

1. Выбираем масштаб напряжения $M_U = \dots$ В/см и тока $M_I = \dots$ А/см.
2. Откладываем в масштабе вектора фазных напряжений U_a, U_b, U_c под углом 120° друг относительно друга.
3. Строим векторы фазных токов I_a, I_b, I_c , которые повернуты относительно векторов соответствующих напряжений U_a, U_b, U_c на углы сдвига фаз $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ (на рис. 5.2 показан случай активно-индуктивной нагрузки).
4. Строим векторы линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Векторы линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} определяются по формулам (5.3–5.5) и равны разности соответственных фазных напряжений. Из рис. 5.2 видно, что звезда линейных напряжений опережает звезду фазных напряжений на угол 30° .

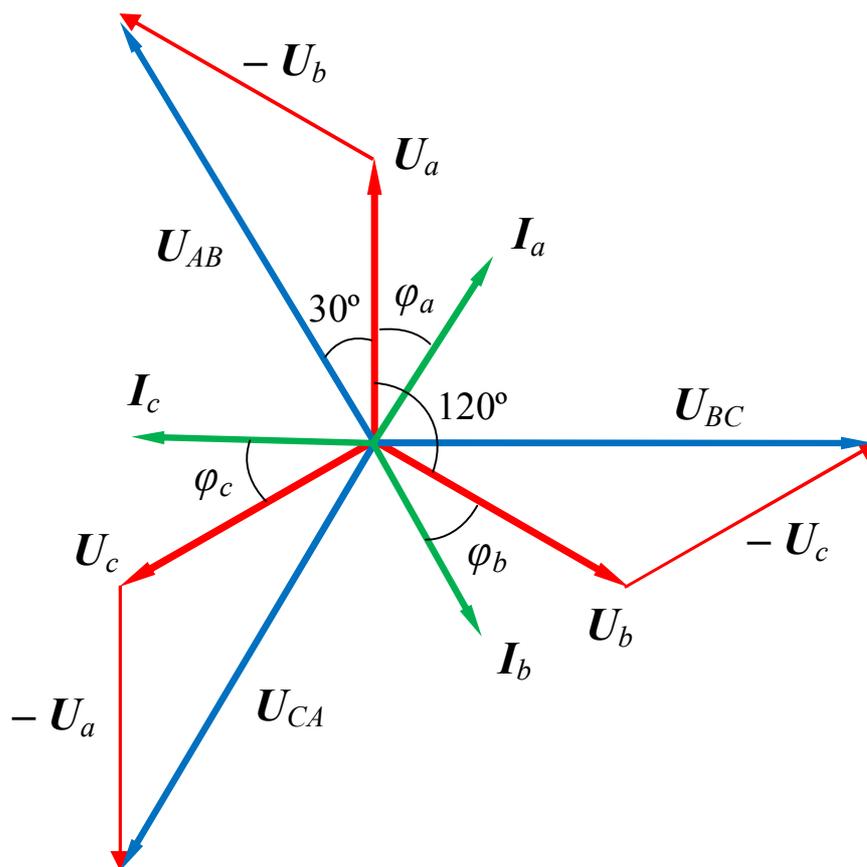


Рис. 5.2. Полярная векторная диаграмма для режима симметричной нагрузки при соединении потребителей в звезду

Если произвести вычитание векторов фазных напряжений U_a , U_b , U_c по способу параллелограмма, то векторная диаграмма симметричной трехфазной системы будет выглядеть как равнобедренный треугольник (рис. 5.3) и называется топографической векторной диаграммой.

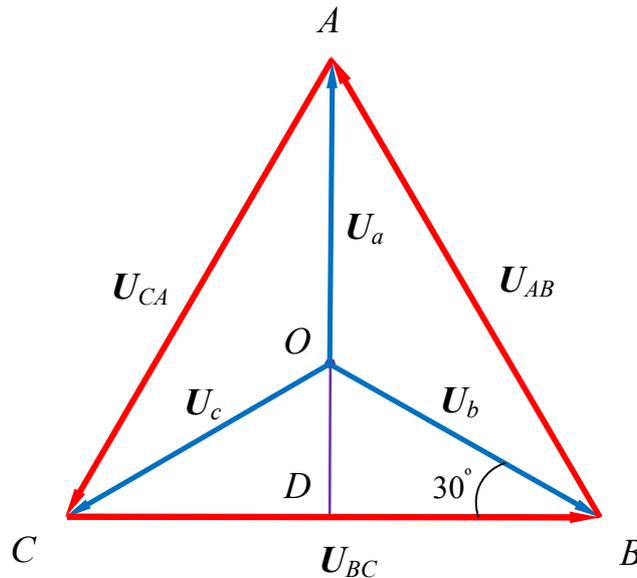


Рис. 5.3. Топографическая векторная диаграмма для симметричной нагрузки при соединении потребителей звездой

Из топографической векторной диаграммы можно получить соотношение между фазными и линейными напряжениями при соединении «звездой» в случае симметричной нагрузки. Для этого восстановим перпендикуляр из середины вектора линейного напряжения U_{BC} , в результате получим прямоугольный треугольник OBD , из которого следует следующее соотношение:

$$1/2 BD = OB \cdot \cos 30^\circ,$$

т.е.

$$\frac{1}{2} U_L = U_\phi \cdot \cos 30^\circ = U_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Отсюда

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi. \quad (5.9)$$

Запишем первый закон Кирхгофа для нулевого узла потребителя n

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (5.10)$$

В случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе будет равен нулю (это можно доказать сложив геометрически вектора фазных токов I_a, I_b, I_c)

$$I_0 = I_A + I_B + I_C = 0. \quad (5.11)$$

Если ток в нулевом проводе равен нулю, следовательно, нулевой провод можно не ставить. Поэтому в случае симметричной нагрузки иногда применяется трехпроводное соединение звездой, т.е. соединение потребителей звездой без нулевого провода.

2.4. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Если три фазы потребителя имеют разные сопротивления Z_a, Z_b, Z_c , то фазные токи также будут неравны: $I_A \neq I_B \neq I_C$. Токи могут быть неравными как по величине, так и по направлению. Ток в нулевом проводе в этом случае будет отличен от нуля и определяется по векторной диаграмме (рис. 5.4) или аналитическим путем.

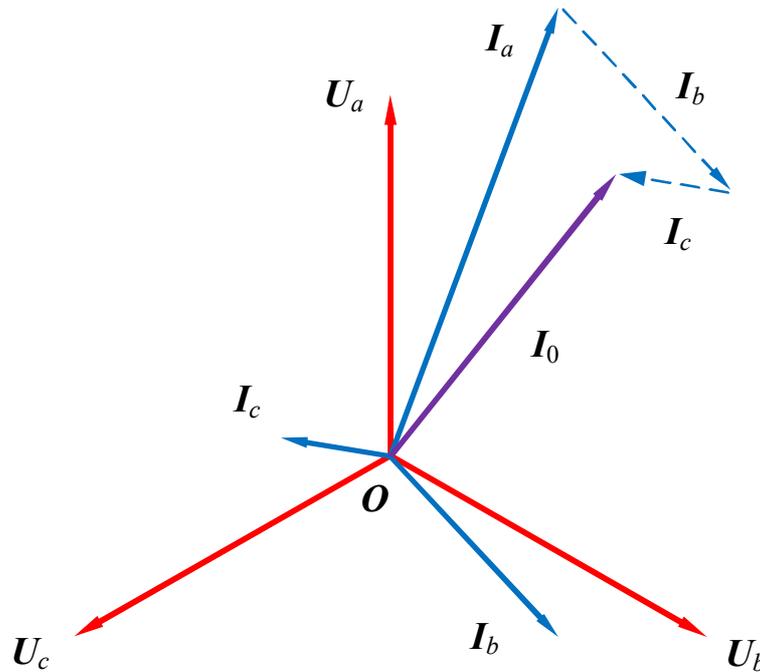


Рис. 5.4. Графический метод определения тока в нулевом проводе при несимметричной нагрузке

Из рис. 5.4 видно, что ток в нулевом проводе I_0 не равен нулю. Значит, возникает падение напряжения между нулевыми точками генератора и приемника U_{Nn} . Это напряжение называется нулевым напряжением. Нулевое напряжение позволяет сохранить равенство фазных напряжений U_a, U_b, U_c в условиях неравенства фазных токов.

Нейтральный провод предотвращает возможность возникновения явления «перекоса фаз». Это такое явление, когда в одних фазах напряжение будет повышено, а в других – понижено. Это видно по векторной диаграмме напряжений при несимметричной нагрузке (рис. 5.5).

На этой диаграмме пунктирными линиями обозначены векторы фазных напряжений при симметричной нагрузке. При несимметричной нагрузке нулевая точка при отсутствии нулевого провода смещается в точку O_1 . Напряжение между точками O и O_1 и является нулевым напряжением между нулевыми точками генератора и приемника U_{Nn} . Из диаграммы видно, что фазные напряжения U_a, U_b, U_c изменились

и неодинаковы как по величине, так и по фазе. Это явление и называется перекосом фаз.

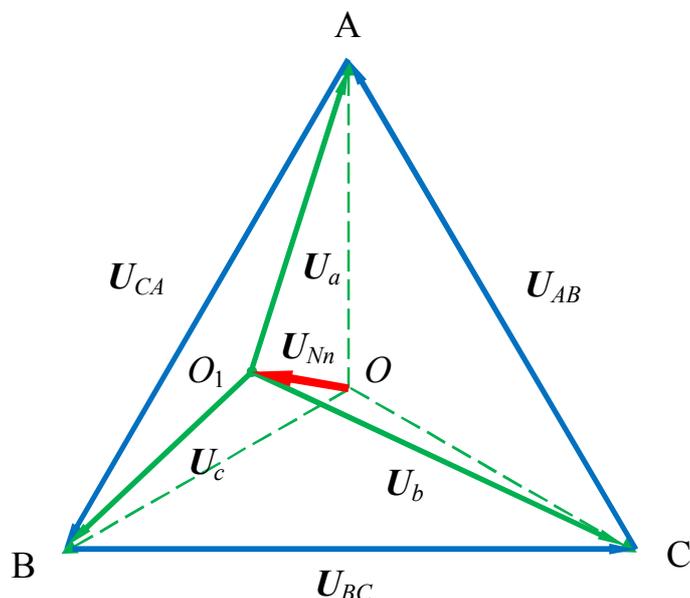


Рис. 5.5. Векторная диаграмма напряжений при несимметричной нагрузке

Перекос фаз является нежелательным явлением, так как приводит к неодинаковой работе фазных потребителей трехфазной системы. Например, в случае осветительной сети это может привести к тому, что одни лампы дадут незначительную освещенность, а другие могут перегореть из-за повышенного напряжения в фазе.

Для обеспечения симметричной системы напряжений во всех фазах и независимой работе отдельных приемников в случае несимметричной нагрузки используется схема звезда с нулевым проводом (рис. 5.1). По технике безопасности на нулевой провод запрещается ставить выключатель, предохранитель. Эта мера применяется для устранения возможности разрыва нулевого провода и, следовательно, возникновения перекоса фаз.

2.5. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ФАЗЫ ПРИЕМНИКА

Короткое замыкание фазы приемника является частным случаем неравномерной нагрузки фаз генератора. При наличии нулевого провода короткое замыкание любой фазы **приводит к аварийной ситуации**, так как ток в этой фазе резко увеличивается.

Короткое замыкание одной из фаз приемника при отсутствии нулевого провода **не приводит к аварийной ситуации**, так как линейные

напряжения сети прикладываются в этом случае к двум другим фазам приемника.

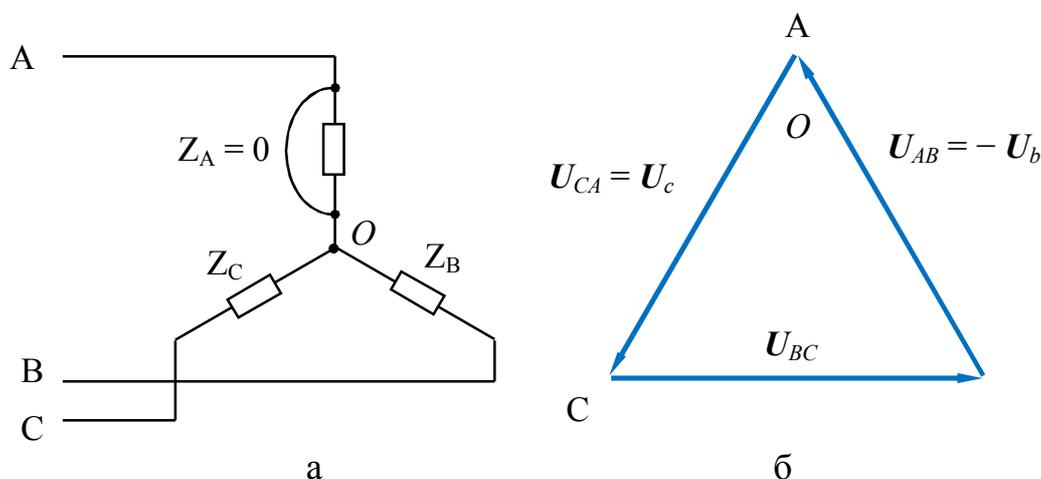


Рис. 5.6. Схема (а) и топографическая диаграмма при коротком замыкании в фазе А (б)

При коротком замыкании одной из фаз, например фазы А, потенциал точки А становится равным потенциалу точки О, тогда напряжение фазы А будет равно нулю, т.е. $U_a = 0$. Следовательно, ток фазы А также будет равен нулю: $I_A = 0$ (рис. 5.6, а). Нулевая точка О потребителя при этом смещается в точку А. Видно, что напряжения двух других фаз становятся равным линейным напряжениям $U_b = -U_{AB}$, $U_c = U_{CA}$, т.е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз. Нулевое напряжение становится равным фазному напряжению генератора $U_O = E_A$.

2.6. ОБРЫВ ЛИНЕЙНОГО ПРОВОДА

При обрыве линейного провода также нужно различать два случая. При обрыве одного линейного провода в трехфазной трехпроводной цепи (т.е. без нулевого провода), например провода А (рис. 5.7, а), цепь превращается в однофазную с последовательным соединением приемников и подключенной к одному линейному напряжению, т.е. $U_{BC} = U_b - U_c$. При этом напряжения на фазах В и С распределяются пропорционально их сопротивлениям Z_b и Z_c . Например, если $Z_b = Z_c$, то $U_b = U_c = 0,5 U_{BC}$ (рис. 5.7, б). Нулевая точка О смещается вниз и делит вектор U_{BC} на две равные части.

Если произойдет обрыв одного линейного провода (перегорание предохранителя в фазе, отключение фазы от сети и т.д.) в трехфазной цепи с нулевым проводом, то это приведет к исчезновению тока и напряжения в этой фазе. Напряжения на неповрежденных фазах не изменятся $U_b = U_c = U_\phi$. Так, например, при обрыве фазы А ток в этой фа-

же становится равным нулю ($I_A = 0$). Ток в нулевом проводе будет равен $I_0 = (I_B + I_C)$.

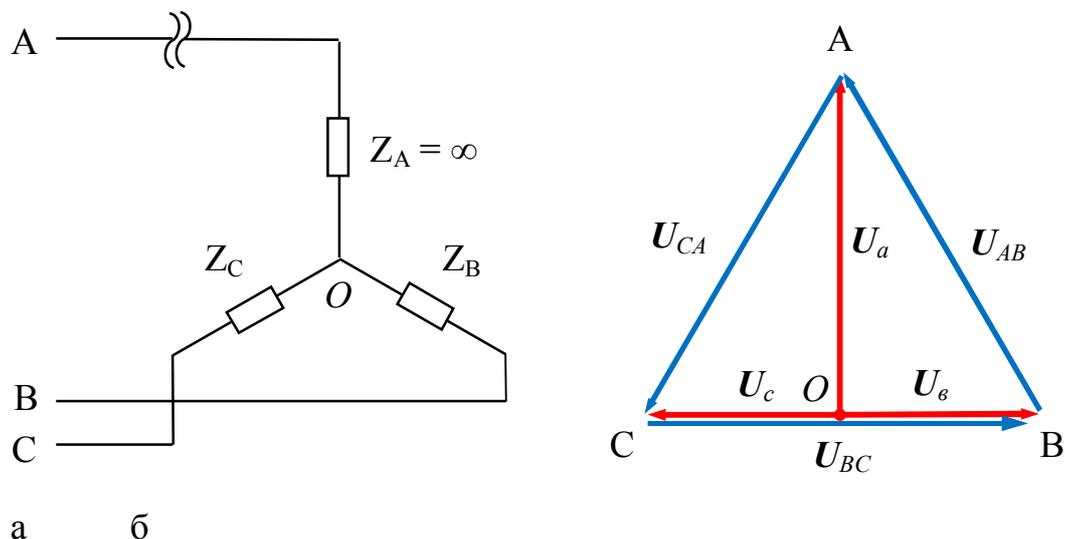


Рис. 5.7. Схема (а) и топографическая векторная диаграмма при обрыве линейного провода А (б)

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе исследуется работа трехфазной цепи переменного тока соединением «треугольник» при различных видах нагрузки. Изменяя характер нагрузки в фазе А, осуществить разные режимы работы трехфазной цепи. По результатам измерений построить векторные диаграммы для всех режимов работы трехфазной цепи.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Подготовить отчет, изучить теоретическую часть и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 5.2 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.
4. Собрать схему электрической цепи, показанной на рис. 5.8, и **представить** для проверки преподавателю.
5. Подать напряжение на схему и включением ключей $SA1$, $SA2$, $SA3$, расположенных на передней панели лабораторного стенда, создать режимы нагрузки трехфазной цепи согласно таблице 5.3.

6. Измерить фазные токи по амперметрам $PA1$, $PA2$, $PA3$ и PA_{ab} , PA_{bc} , PA_{ca} . Показания приборов каждого режима записать в таблицу 5.4.

7. Измерить с помощью мультиметра и записать в таблицу 5.4 фазные U_a , U_b , U_c и линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

Таблица 5.2

Сведения об измерительных приборах

	$PA1$	$PA2$	$PA3$	PA_{ab}	PA_{bc}	PA_{ca}	PV
Наименование прибора							
Тип и номер прибора							
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)							
Предел измерений (номинальное значение)							
Класс точности							
Род тока							
Цена деления прибора							
Абсолютная погрешность измерения							

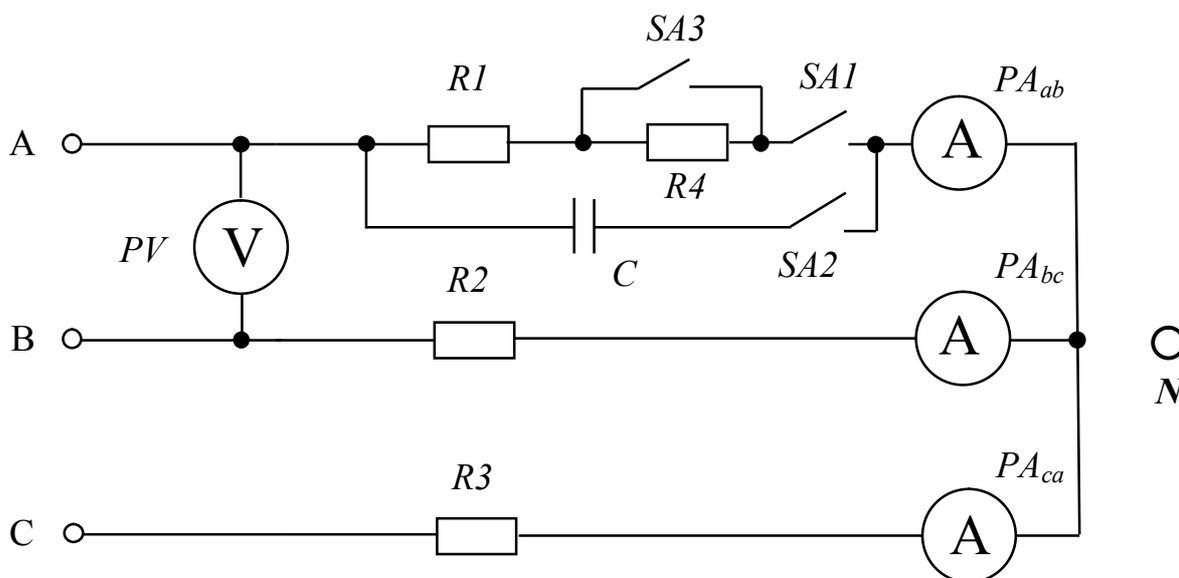


Рис. 5.8. Схема исследуемой электрической цепи

Таблица 5.3

*Положение переключателей
при разных режимах работы трехфазной цепи*

№ п/п	Тип нагрузки	SA1	SA2	SA3
1	Симметричная активная нагрузка	Вкл	Выкл	Вкл
2	Нагрузка в фазе «А» увеличена	Вкл	Выкл	Выкл
3	В фазе «А» включен идеальный конденсатор	Выкл	Вкл	Выкл
4	Нагрузка в фазе «А» выключена (обрыв линейного провода)	Выкл	Выкл	Выкл
5	В фазе «А» короткое замыкание. При этом соединить проводником начало и конец фазы «А». <i>Примечание: При опыте короткого замыкания категорически запрещается присоединять нулевой провод</i>	Вкл	Выкл	Вкл

Таблица 5.4

Измеренные и расчетные величины соединения звездой

№ п/п	Нагрузка	Нейтральный провод	Измеренные величины						Расчетные величины		
			$I_a,$ А	$I_b,$ А	$I_c,$ А	$I_N,$ А	$U_a,$ В	$U_b,$ В	$U_c,$ В	$\frac{U_{AB}}{U_a}$	$\frac{U_{BC}}{U_b}$
1	Симметричная активная нагрузка	откл.									
2		вкл.									
3	Нагрузка в фазе «А» увеличена	откл.									
4		вкл.									
5	В фазе «А» включен конденсатор	откл.									
6		вкл.									
7	Нагрузка в фазе «А» отключена	откл.									
8		вкл.									
9	В фазе «А» короткое замыкание	откл.									

Линейное напряжение (измеряется с помощью мультиметра)
 $U_{AB} = \dots \text{ В}; U_{BC} = \dots \text{ В}; U_{CA} = \dots \text{ В}$

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитать для всех режимов работы цепи отношения линейных и фазных токов и записать данные в таблицу 5.4. Убедиться, что для симметричной нагрузке $U_l = \sqrt{3} U_\phi$ при включенном и отключенном нулевом проводе, а для несимметричной нагрузки только при включенном нулевом проводе, т.е. с включением нулевого провода во всех режимах фазные напряжения становятся одинаковыми.

2. Для каждого режима работы построить в масштабе векторные диаграммы.

3. Ответить на контрольные вопросы.

4. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями и предоставить для защиты преподавателю.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Нарисовать электрическую схему соединения трех однофазных приемников «звездой», обозначить все токи и напряжения.
2. Какое соединение однофазных приемников электрической энергии называют звездой?
3. Чем отличается симметричная нагрузка от несимметричной?
4. Какие два вида напряжений и токов различают в трехфазных цепях? Дать их определение.
5. Какие существуют соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «звездой»?
6. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «звездой» в случае симметричной нагрузки?
7. Докажите, что в трехфазной цепи при соединении потребителей «звездой» сумма линейных напряжений всегда равна нулю.
8. Какова роль нулевого провода в четырехпроводной трехфазной цепи?
9. Как определить силу тока в нулевом проводе, если известна сила тока в каждой из фаз?
10. Объяснить построение векторных диаграмм при различных видах нагрузки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки «треугольником», определение соотношений между линейными и фазными токами при различных режимах работы, построение векторных диаграмм.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Трехфазный генератор обеспечивает симметричное напряжение со сдвигом фаз 120^0 . Обмотки такого генератора обычно соединяются «звездой». Приемники электроэнергии могут быть соединены как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник». Рассмотрим схему включения приемников «треугольником» (рис. 6.1).

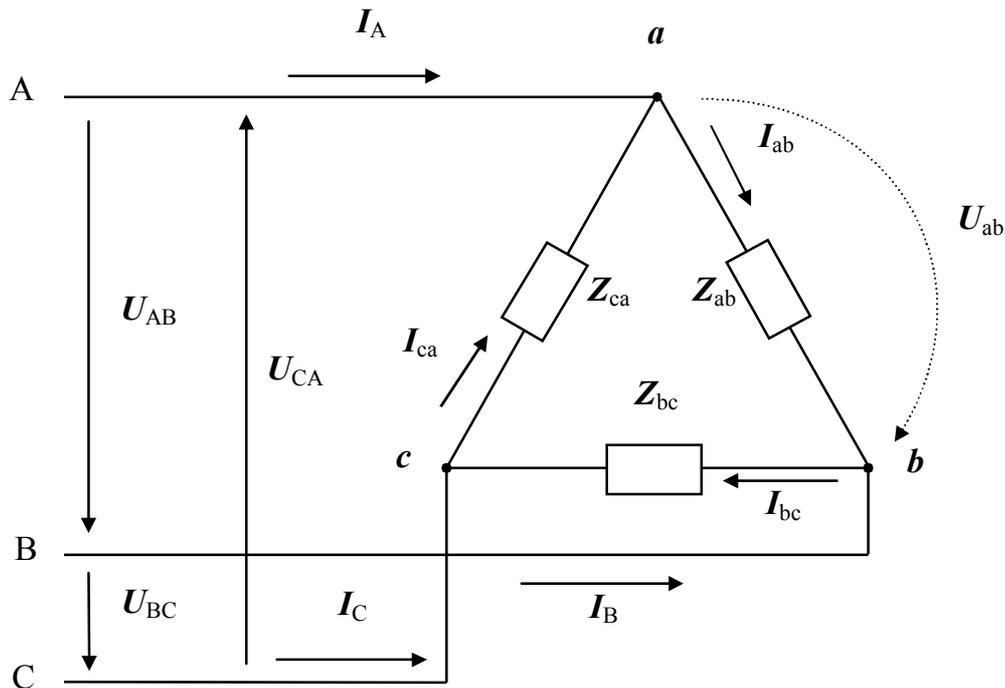


Рис. 6.1. Соединение трехфазного генератора с нагрузкой

Соединение трёхфазной цепи переменного тока, при котором конец первой фазы соединяется с началом второй, конец второй фазы с началом третьей и конец третьей фазы с началом первой, образуя замкнутый треугольник, к вершинам которого подсоединяются линейные провода, называется соединением типа «треугольник».

В трехфазных электрических цепях различают линейные, фазные напряжения и токи (рис. 6.1).

Провода, соединяющие генератор с потребителем, называются линейными. Токи, протекающие в них, обозначаются I_A, I_B, I_C и называются линейными.

Линейные напряжения $U_{Л}$ (напряжения между линейными проводами) принято обозначать U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Они образуют симметричную систему векторов, при этом сумма линейных напряжений в режиме холостого хода равна нулю.

Из схемы, представленной на рис. 6.1, видно, что при соединении «треугольником» фазные напряжения U_{ϕ} (напряжения между началом и концом фаз) равны линейным напряжениям

$$U_{\phi} = U_{Л}. \quad (6.1)$$

При подключении нагрузки появляются токи в фазах нагрузки I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , которые называются фазными. Они могут быть найдены из следующих соотношений:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}, I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}, I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (6.2)$$

Условные положительные направления линейных и фазных напряжений, линейных и фазных токов показаны на рисунке 6.1 стрелками.

В соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов в узле равна нулю. Поэтому, записав для узлов a, b, c первый закон Кирхгофа (рис. 6.1), можно установить связь между линейными и фазными токами:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad (6.3)$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad (6.4)$$

$$I_C = I_{ac} - I_{bc}. \quad (6.5)$$

Сложив эти равенства, получим:

$$I_A + I_B + I_C = 0. \quad (6.6)$$

Выражения 6.3–6.6 используются при расчетах трехфазной цепи соединением «треугольником», а также для построения векторных диаграмм.

В случае, если нагрузка во всех фазах одинаковая

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}, \quad (6.7)$$

то трехфазная система называется симметричной. Токи в фазах будут равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° относительно друг друга.

Векторная топографическая диаграмма симметричной трехфазной системы будет выглядеть как равнобедренный треугольник (рис. 6.2). Из неё можно получить соотношение между фазными и линейными токами при соединении «треугольником» в случае симмет-

и *ac* окажутся соединенными последовательно и на них будет подаваться линейное напряжение U_{BC} . Таким образом, на каждой из этих фаз будет действовать напряжение, равное половине линейного (если нагрузки в фазах равны). Напряжение фазы *bc* и режим её работы останутся без изменений.

Активная мощность трехфазного тока равна сумме мощностей всех трех фаз, а именно

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (6.11)$$

При равномерной нагрузке фаз активная мощность трехфазной системы становится равной

$$P = 3P_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi \cos\varphi, \quad (6.12)$$

где P_Φ – активная мощность одной фазы, Вт;

U_Φ – фазное напряжение, В;

I_Φ – ток фазный, А;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

Пользуясь соотношением (6.9), можно выразить в формуле (6.12) произведение $U_\Phi \cdot I_\Phi$ через линейные значения напряжения и тока

$$U_\Phi I_\Phi = \frac{1}{\sqrt{3}} U_L I_L. \quad (6.13)$$

Отсюда формула 6.11 может быть переписана в следующем виде:

$$P = 3 \frac{1}{\sqrt{3}} U_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi. \quad (6.14)$$

В таком преобразованном виде формула широко применяется для определения активной мощности, развиваемой трехфазным током при равномерной нагрузке фаз.

Соответственно реактивная мощность трехфазной системы определяется суммой

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (6.15)$$

где Q_A , Q_B , Q_C – реактивные мощности в фазах

$$Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin\varphi. \quad (6.16)$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (6.17)$$

При равномерной (симметричной) нагрузке фаз эти формулы можно выразить через линейные токи и напряжения:

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi; \quad (6.18)$$

$$S = \sqrt{3} U_L I_L. \quad (6.19)$$

Измеряется активная мощность в Вт, реактивная – в ВАР, полная мощность – в ВА.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе исследуется работа трехфазной цепи переменного тока соединением «треугольник» при различных видах нагрузки. Изменяя характер нагрузки в фазе А, осуществить разные режимы работы трехфазной цепи. По результатам измерений построить векторные диаграммы для всех режимов работы трехфазной цепи.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Подготовить отчет, изучить теоретическую часть и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 6.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 6.1

Сведения об измерительных приборах

	$PA1$	$PA2$	$PA3$	PA_{ab}	PA_{bc}	PA_{ca}	PV
Наименование прибора							
Тип прибора							
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)							
Предел измерений							
Класс точности							
Род тока							
Цена деления							
Абсолютная погрешность измерения							

4. Собрать схему электрической цепи, показанной на рис. 6.3, и представить для проверки преподавателю.

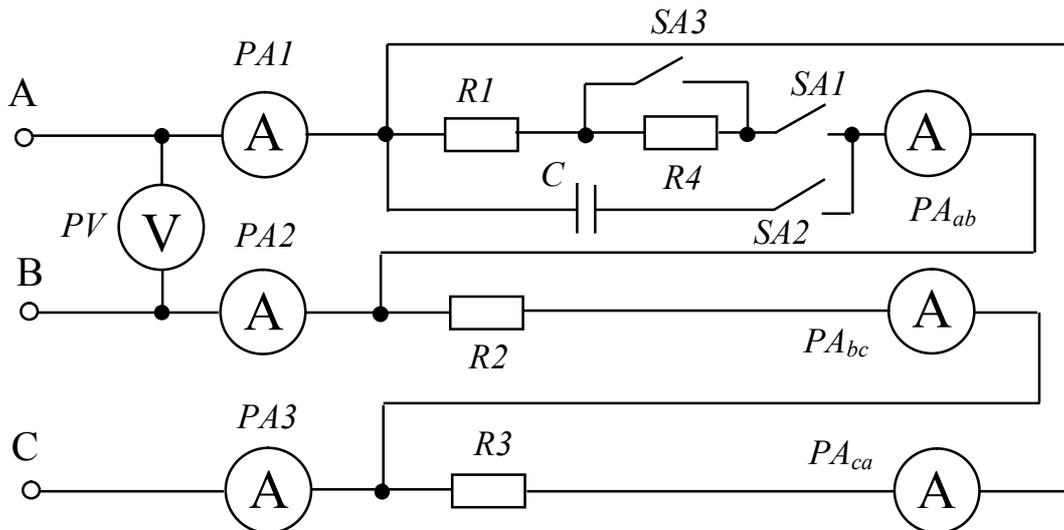


Рис. 6.3. Схема исследуемой электрической цепи

5. Включением ключей $SA1$, $SA2$, $SA3$, расположенных на передней панели лабораторного стенда, создать режимы нагрузки трехфазной цепи согласно таблице 6.2.

Таблица 6.2

Положение переключателей при разных режимах работы трехфазной цепи по схеме «треугольником»

№ п/п	Тип нагрузки	$SA1$	$SA2$	$SA3$
1	Симметричная активная нагрузка	Вкл	Выкл	Вкл
2	Увеличенная нагрузка в фазе А	Вкл	Выкл	Выкл
3	Выключенная нагрузка в фазе А	Выкл	Выкл	Выкл
4	Обрыв линейного провода в фазе А (убрать линейный провод в фазе А)	Вкл	Выкл	Вкл
5	В фазе А включен идеальный конденсатор (несимметричная емкостная нагрузка)	Выкл	Вкл	Выкл

6. Измерить линейные токи с помощью амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ и фазные токи по амперметрам PA_{ab} , PA_{bc} , PA_{ca} . Показания приборов каждого режима записать в таблицу 6.2.

7. Снять показания вольтметра PV и записать в таблицу 6.3 линейное напряжение $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = \dots$

Таблица 6.3

Измеренные величины

№ п/п	Характер нагрузки	Измерения						Вычисления		
		Линейные токи			Фазные токи			$\frac{I_A}{I_{ab}}$	$\frac{I_B}{I_{bc}}$	$\frac{I_C}{I_{ca}}$
		$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А			
1	Симметричная активная нагрузка									
2	Увеличенная нагрузка в фазе А									
3	Выключенная нагрузка в фазе А									
4	Обрыв линейного провода в фазе А									
5	Емкостная нагрузка в фазе А									
$U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}= \dots$ В										

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитать для всех режимов работы цепи отношения линейных и фазных токов и записать данные в таблицу. Убедиться, что при симметричной нагрузке $I_L = \sqrt{3} I_\phi$ и геометрическая сумма линейных токов равна нулю.

2. Для каждого режима работы построить в масштабе векторные диаграммы.

Векторная диаграмма строится следующим образом:

- а) выбираем масштаб напряжения $M_U = \dots$ В/см и тока $M_I = \dots$ А/см;
- б) откладываем в масштабе вектора фазных напряжений U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} под углом 120° друг относительно друга;
- в) строим векторы фазных токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , которые повернуты относительно векторов соответствующих напряжений U_a, U_b, U_c на углы сдвига фаз $\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$ (при этом необходимо учитывать, что сдвиг фаз на активном сопротивлении $\varphi_R = 0^\circ$, на индуктивности $\varphi_L = +90^\circ$, на емкости $\varphi_C = -90^\circ$).

Соединив концы фазных векторов, получим вектора линейных токов I_A, I_B, I_C в выбранном масштабе (это следует из формул 6.3–6.5).

Пример для случая симметричной активной нагрузки показан на рис. 6.4. Остальные строятся аналогично.

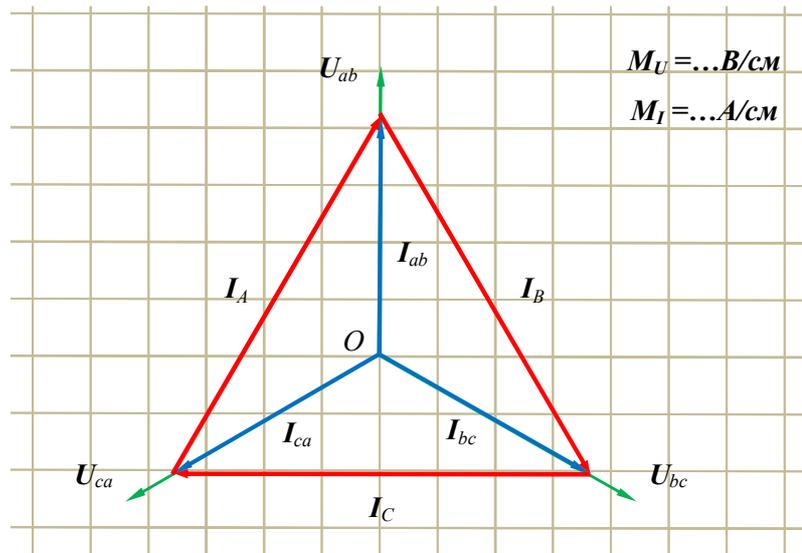


Рис. 6.4. Векторная диаграмма для случая симметричной активной нагрузки

3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями и предоставить для защиты преподавателю.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Нарисовать электрическую схему соединения трех однофазных приемников «треугольником».
2. Какая нагрузка в трехфазной цепи называется симметричной и какая несимметричной?
3. Какие два вида напряжений и токов различают в трехфазных цепях? Дать их определение.
4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников «треугольником» (нагрузка симметричная и несимметричная)?
5. Докажите, что в трехфазной цепи при соединении потребителей «треугольником» сумма линейных токов всегда равна нулю.
6. Почему при соединении «треугольником» нельзя осуществлять режим короткого замыкания в фазе приемника?
7. Каковы преимущества и недостатки соединения нагрузки «треугольником»?
8. Объяснить построение векторных диаграмм при различных видах нагрузки.
9. Чему равны активная, реактивная и полная мощности трехфазной системы? В каких единицах они измеряются?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В RC-ЦЕПИ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально исследовать влияние параметров RC-цепи на характер переходного процесса:

- 1) исследовать работу RC-цепи при различных типах нагрузки и разных режимах работы;
- 2) научиться применять электронный осциллограф для исследования и измерения быстропротекающих несинусоидальных напряжений и токов;
- 3) научиться экспериментально определять постоянную времени переходного процесса.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Релаксационные процессы в RC-цепи

Электромагнитные процессы, возникающие в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, называют переходными.

Переходные процессы происходят не только при включении или отключении источника питания, но и при аварийных ситуациях, когда возникает обрыв или короткое замыкание части электрической цепи. В ряде электротехнических устройств переходные процессы являются основными процессами их работы, например в генераторах электрических колебаний, системы зажигания в автомобилях и др.

Под релаксационным процессом в RC-цепях понимается процесс установления стационарного заряда конденсатора при подаче на него напряжения.

Для анализа процесса заряда конденсатора, рассмотрим электрическую цепь, показанную на рис. 7.1.

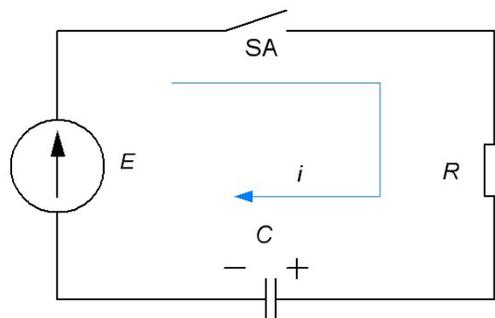


Рис. 7.1. RC-цепь

При замыкании ключа SA конденсатор начнет заряжаться током i . По второму закону Кирхгофа имеем

$$E = U_R + U_C = iR + U_C. \quad (7.1)$$

Согласно классической теории решения дифференциальных уравнений переходное напряжение на конденсаторе может быть представлено в виде двух составляющих – установившейся и свободной

$$U_{C\text{ пер}} = U_{C\text{ уст}} + U_{C\text{ св.}} \quad (7.2)$$

Установившееся напряжение следует найти при $t \rightarrow \infty$, когда напряжение на конденсаторе перестает изменяться, т.е. $dU_C/dt = 0$. Тогда согласно (7.1) имеем

$$U_{C\text{ уст}} = E. \quad (7.3)$$

Выражение для свободной составляющей $U_{C\text{ св}}$ определяется решением однородного дифференциального уравнения, полученного из формулы (7.1) при равенстве левой части нулю. Учтем также, что $i = C \cdot dU_C/dt$, тогда

$$RC \frac{dU_{C\text{ св}}}{dt} + U_{C\text{ св}} = 0. \quad (7.4)$$

Отсюда получим

$$\frac{dU_{C\text{ св}}}{U_{C\text{ св}}} = -\frac{dt}{RC}. \quad (7.5)$$

Решение уравнения (7.5) для свободной составляющей напряжения на конденсаторе имеет вид

$$U_{C\text{ св}} = Ae^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.6)$$

Величину $\tau = RC$ называют постоянной времени заряда RC -цепи, т.к. она имеет размерность времени и характеризует длительность протекания переходного процесса.

С учетом найденных выражений $U_{C\text{ уст}}$ и $U_{C\text{ св}}$ переходное напряжение на конденсаторе определяется выражением

$$U_{C\text{ пер}} = E + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.7)$$

Для определения постоянной интегрирования воспользуемся законом коммутации: до подключения конденсатора напряжение на нем было равно нулю и не может измениться скачком в момент коммутации, т.е. $U_C(0) = U_C(0_+) = 0$.

Для момента времени $t = 0$ уравнение (7.7) имеет вид

$$0 = E + A, \text{ т.е. } A = -E. \quad (7.8)$$

Следовательно, выражение (6.7) примет вид

$$U_{C\text{ пер}} = E - E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (7.9)$$

Это выражение и есть общее решение дифференциального уравнения (7.1). Ток в цепи во время переходного процесса

$$i_{\text{Спер}} = C \frac{dU_{\text{Спер}}}{dt} = C \frac{d[E(1 - e^{-t/\tau})]}{dt} = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.10)$$

Графики изменения напряжения и тока при зарядке конденсатора показаны на рис. 7.2.

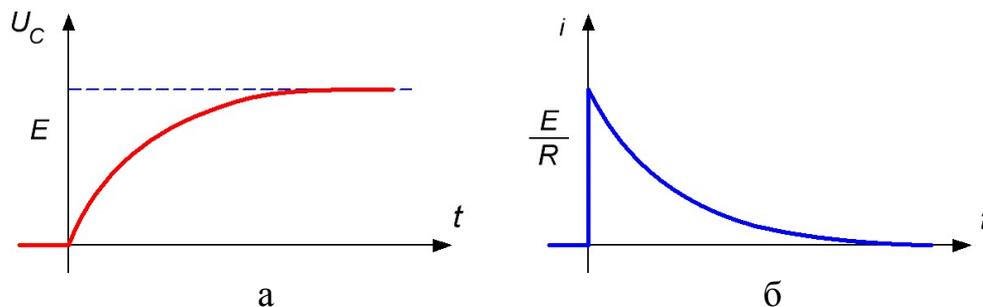


Рис. 7.2. Графики переходного процесса:
а – напряжения на конденсаторе; б – тока

Для анализа процесса разряда конденсатора рассмотрим цепь, приведенную на рис. 7.3. Конденсатор C предварительно заряжен зарядом q .

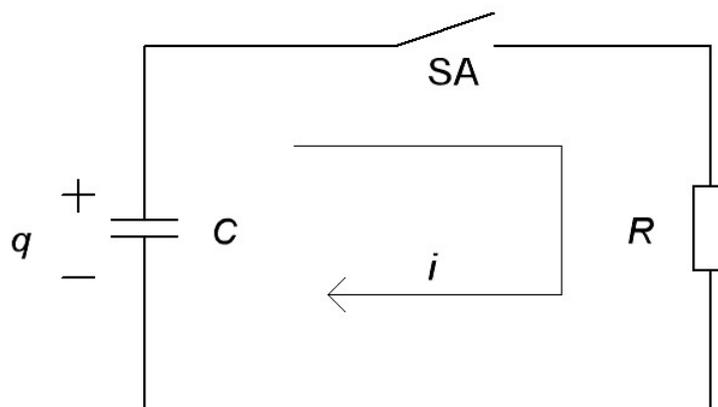


Рис. 7.3. Схема разряда конденсатора

После замыкания ключа SA конденсатора начнет разряжаться током i , протекающим через резистор R . По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений имеем

$$U_C + U_R = U_C + iR = 0. \quad (7.11)$$

Используя известное соотношение, связывающее ток и напряжение на конденсаторе $i = CdU_C/dt$, уравнение (6.11) можно представить в виде

$$U_C + RC \frac{dU_C}{dt} = 0. \quad (7.12)$$

Из этого уравнения получим

$$\frac{dU_c}{U_c} = -\frac{dt}{RC}. \quad (7.13)$$

Получили дифференциальное уравнение для показательной функции. Его решение имеет вид

$$U_c = Ae^{-\frac{t}{RC}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7.14)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени RC -цепи при разряде конденсатора.

Постоянная интегрирования A может быть найдена из начальных условий. Пусть до момента коммутации при $t = 0$ конденсатор был заряжен до напряжения E . На основании закона коммутации напряжение на конденсаторе не может измениться скачком, т.е. $U_c(0_-) = U_c(0_+) = E$. Для момента времени $t = 0$ выражение (6.14) имеет вид $A = E$. Следовательно, решением дифференциального уравнения (7.12) является выражение

$$U_c = Ee^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (7.15)$$

Ток в цепи при переходном процессе

$$i = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{d(Ee^{-t/RC})}{dt} = -CE \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.16)$$

Графики изменения напряжения и тока при разряде конденсатора показаны на рис. 7.4.

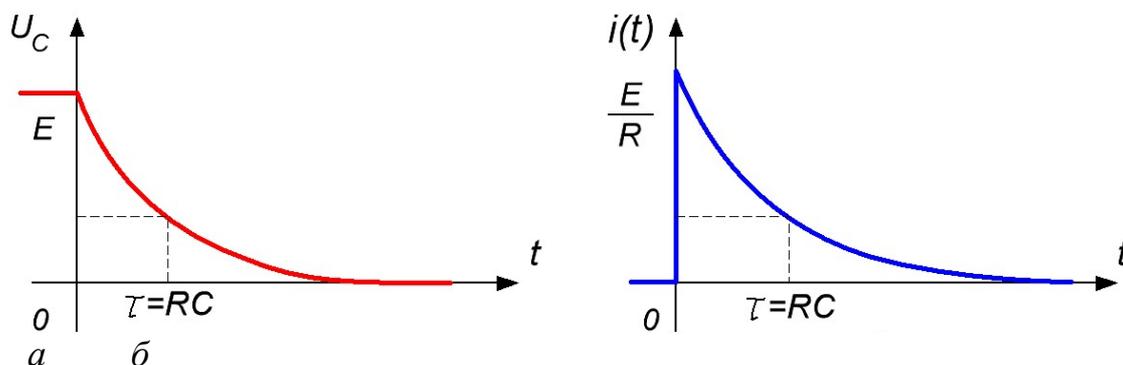


Рис. 7.4. Графики изменения напряжения и тока при разряде конденсатора

Из графиков видно, что за время $t = \tau$ величина напряжения или тока изменяется в e раз.

При разряде конденсатора запасенная в нем энергия электрического поля преобразуется в теплоту, выделяющуюся на резисторе R .

Дифференцирующие и интегрирующие цепи

Используя процессы заряда и разряда конденсатора через резистор, можно получить дифференцирующие и интегрирующие цепи, которые нашли широкое применение в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Рассмотрим работу электрической цепи, изображенной на рис. 7.5.

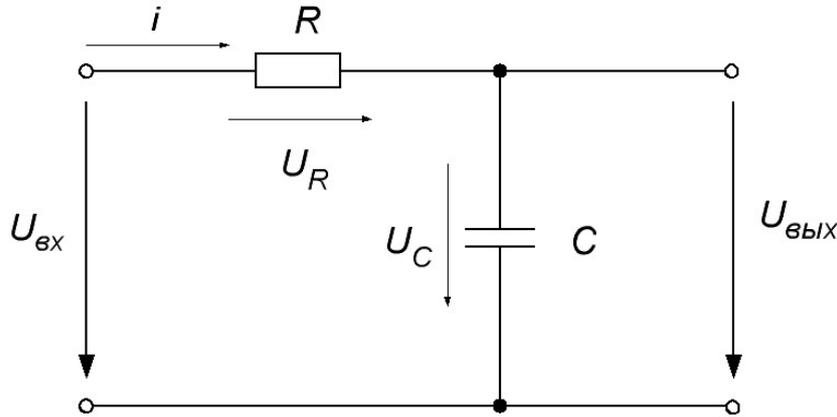


Рис. 7.5. Интегрирующая RC-цепь

При подаче напряжения $U_{вх}$ на такую цепь по второму закону Кирхгофа можно записать

$$U_{вх} = U_R + U_C = iR + U_C. \quad (7.17)$$

Форма временных зависимостей напряжения определяется постоянной времени цепи τ . Рассмотрим случай $\tau \gg T$, где T – время переключения цепи.

Поскольку в этом случае время заряда конденсатора значительно больше времени переключения, то за время переключения напряжение на конденсаторе существенно не изменится и его можно приближенно считать равным нулю. Напряжение на сопротивлении, как следует из формулы (7.17), примерно равно $U_{вх}$ и $U_R = R \cdot I \gg U_C$. Тогда можем записать $U_{вх} = i \cdot R$, откуда

$$i = \frac{U_{вх}}{R}. \quad (7.18)$$

Из выражения $i = CdU_C/dt$, получим

$$U_C = U_{вых} = \frac{1}{C} \int i dt + A'. \quad (7.19)$$

Подставим в формулу (7.19) значение тока из (7.18), получим

$$U_{вых} = \frac{1}{C} \int \frac{U_{вх}}{R} dt = \frac{1}{RC} \int U_{вх} dt = \frac{1}{\tau} \int U_{вх} dt. \quad (7.20)$$

Будем считать, что постоянная составляющая напряжения на входе отсутствует, поэтому постоянная интегрирования $A' = 0$.

Таким образом, для времен $T \ll \tau = RC$ выходное напряжение представляет интеграл от входного напряжения. Поэтому цепь, показанная на рис. 7.5, называют *интегрирующей*.

Рассмотрим процессы, происходящие в цепи, изображенной на рис. 7.6.

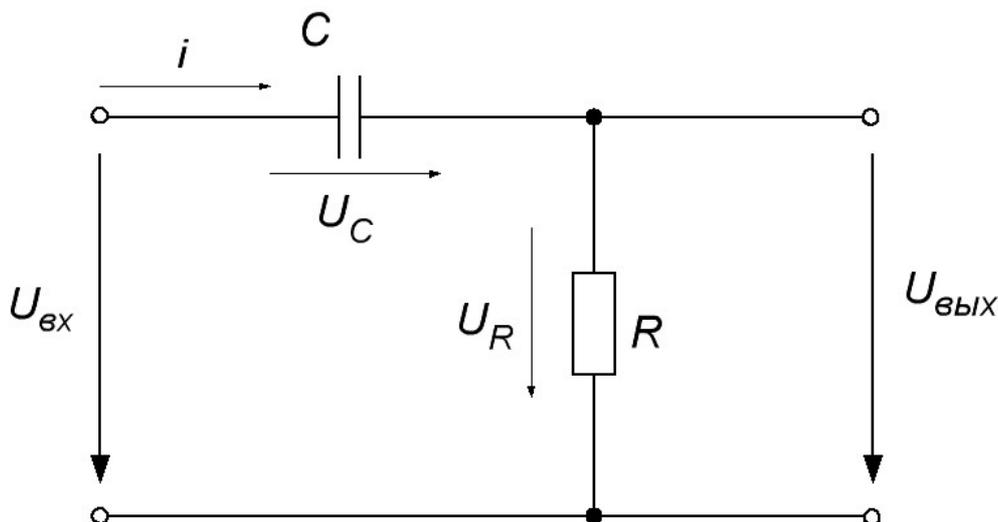


Рис. 7.6. Дифференцирующая RC-цепь

По второму закону Кирхгофа

$$U_{вх} = U_R + U_C = iR + U_C. \quad (7.21)$$

Для больших времен переходного процесса, когда конденсатор успевает заряжаться до напряжений, близких $U_{вх}$, считаем, что $U_C \gg i \cdot R$. Тогда из уравнения (7.17) следует, что

$$U_{вх} = U_C. \quad (7.22)$$

Отсюда находим ток в цепи

$$i = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (7.23)$$

Так как выходное напряжение $U_{вых} = i \cdot R$, то окончательно имеем

$$U_{вых} = RC \frac{dU_{вх}}{dt} = \tau \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (7.24)$$

Пропорционально производной от входного напряжения при условии, что длительность переходных процессов много больше постоянной времени τ . Такая цепь называется *дифференцирующей*.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования в данной лабораторной работе является интегрирующая и дифференцирующая цепи. Необходимо снять осциллограммы этих цепей. По полученным осциллограммам определить постоянную времени цепи.

3.2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки для исследования переходных процессов приведена на рис. 7.7.

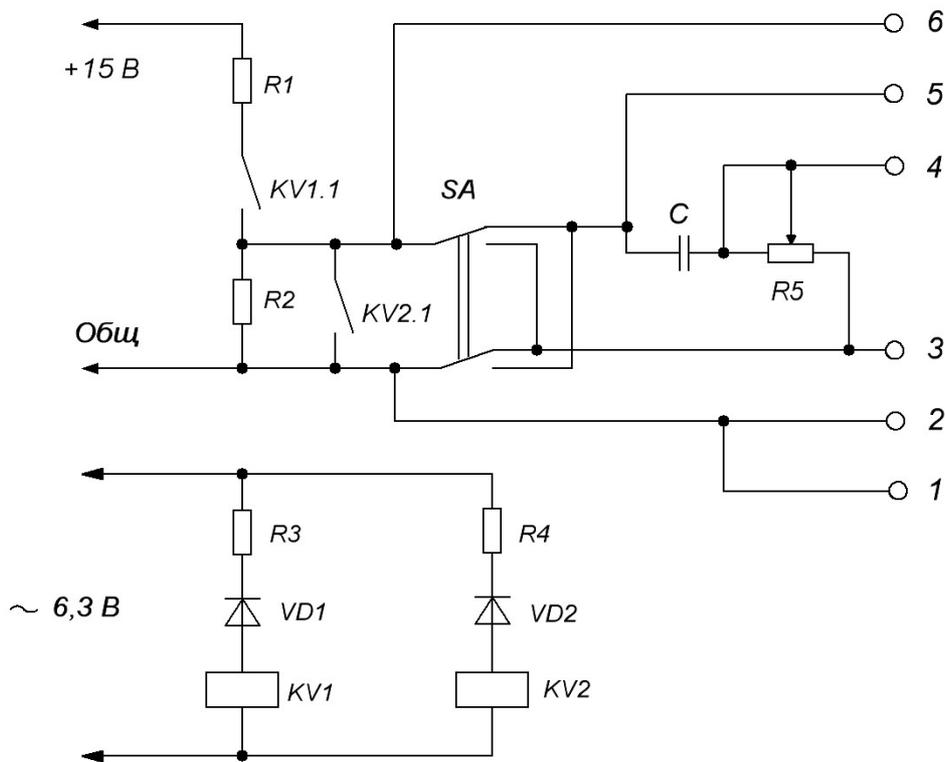


Рис. 7.7. Электрическая схема для проведения исследований

Коммутация цепей заряда-разряда конденсатора C осуществляется с помощью электромагнитных герконовых реле $KV1$ и $KV2$. Напряжение управления, подаваемое на обмотки электромагнитного реле выпрямляется с помощью диодов $VD1$ и $VD2$. Положительная полуволна открывает диод $VD2$, срабатывает реле $KV2$ и замыкается контакт $KV2.1$. Отрицательная полуволна открывает диод $VD1$, срабатывает реле $KV1$ и замыкаются контакты $KV1.1$. Таким образом, контакты $KV1.1$ и $KV2.1$ замыкаются и размыкаются с частотой 50 Гц, но всегда находятся в

противоположном состоянии. Если $KV1.1$ замкнут, то $KV2.1$ разомкнут и наоборот. Переключатель SA предназначен для получения дифференцирующей (верхнее положение) или интегрирующей (нижнее положение) цепей.

Если переключатель SA находится в верхнем положении, то при замкнутом состоянии контактов $KV1.1$ по цепи

$$+15\text{ В} \rightarrow R1 \rightarrow KV1.1 \rightarrow SA \rightarrow C \rightarrow R5 \rightarrow \text{Общ.}$$

протекает ток и конденсатор C заряжается. При замыкании $KV2.1$ конденсатор разряжается по цепи $C \rightarrow R5 \rightarrow KV2.1$. Постоянная времени цепи разряда $\tau = C \cdot R5$. При переключении SA в нижнее положение цепи заряда сохраняются, но исследуемая цепь из дифференцирующей превращается в интегрирующую. Эпюры напряжений на резисторе $R5$ и конденсаторе C можно наблюдать, подключив осциллограф к контактам 1–6.

3.3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием, исследуемой схемой установки

3.3.1. ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩАЯ ЦЕПЬ

1. Переключатель SA установите в верхнее положение.
2. Включите установку и осциллограф.
3. Общий вход осциллографа подключите к контактам 1 или 2, а потенциальный вход осциллографа к контакту 4.
4. Изменяя чувствительность осциллографа и частоту развертки, а также синхронизацию, установите на экране осциллографа стабильную картинку, соответствующую рис. 7.8.

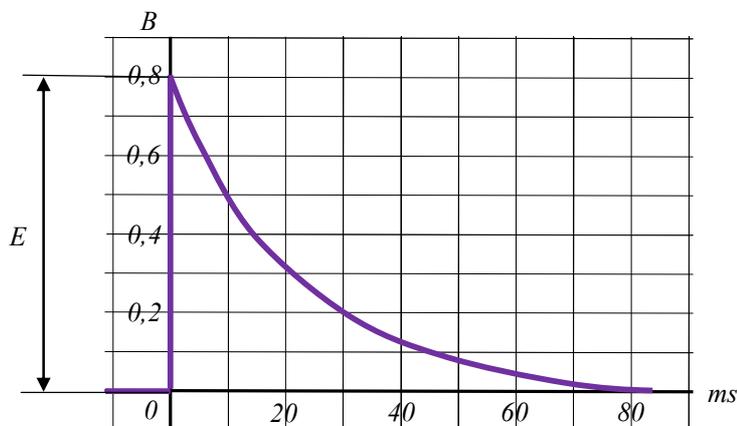


Рис. 7.8. Осциллограмма дифференцирующей цепи

5. Используя калиброванную развертку осциллографа для 8–10 значений времени t по осциллограмме измерить напряжение на конденсаторе U_C и записать в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

*Измеренные напряжения на конденсаторе
для дифференцирующей цепи*

Параметр	Измеренные значения								
t , сек									
U_C , В									
	Расчетные значения								
U_C/E									
$\ln \frac{U_C}{E}$									

6. Зарисовать осциллограмму наблюдаемого напряжения, проставив по осям Y и X значения напряжения и времени (аналогично рис. 7.8).

3.3.2. ИНТЕГРИРУЮЩАЯ ЦЕПЬ

1. Переключатель SA установите в нижнее положение.
2. Общий вход осциллографа подключите к контактам 1 или 2, а потенциальный вход осциллографа к контакту 4.
3. Изменяя чувствительность осциллографа и частоту развертки, а также синхронизацию, установите на экране осциллографа стабильную картинку, соответствующую рис. 7.9.

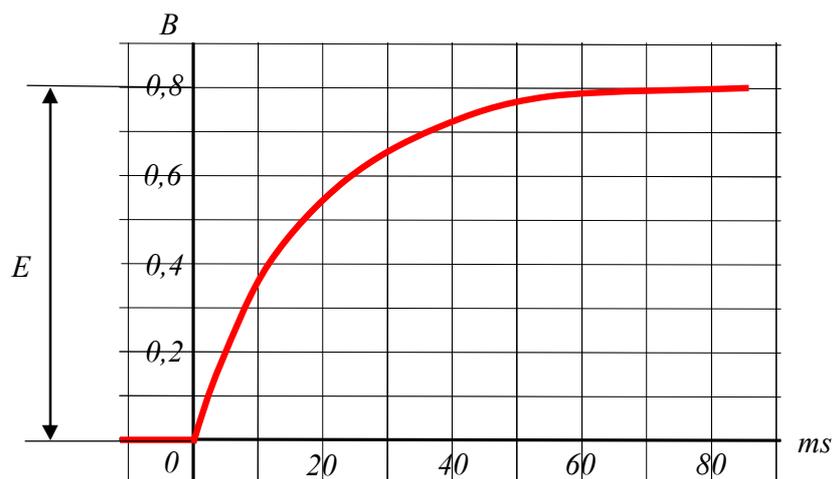


Рис. 7.9. Осциллограмма интегрирующей цепи

4. Используя калиброванную развертку осциллографа для 8–10 значений времени t , по осциллограмме измерить напряжение на конденсаторе U_C и записать в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

*Измеренные напряжения на конденсаторе
для интегрирующей цепи*

Параметр	Измеренные значения								
t , сек									
U_C , В									
	Расчетные значения								
$\frac{U_C}{E}$									
$\ln \frac{U_C}{E}$									

5. Зарисовать осциллограмму наблюдаемого напряжения, представив по осям Y и X значения напряжения и времени (аналогично рис. 7.8).

3.3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По вычисленным значениям таблиц 7.1 и 7.2 построить графики зависимости для дифференцирующей и интегрирующей цепей

$$\ln \frac{U_C}{E} = f(t). \quad (7.25)$$

2. По тангенсу углу наклона построенной зависимости в п. 1, определить постоянную времени τ для каждой цепи.
3. Из формулы для постоянной времени $\tau = RC$ определить сопротивление R_5 . Значение емкости конденсатора C указано на его корпусе.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое переходной процесс?
2. Какие цепи и процессы изучаются в данной работе?
3. В чем измеряются R , C , τ ?
4. Дать определение дифференцирующей и интегрирующей цепи. Чем они отличаются?
5. Как работает исследуемая схема установки?
6. Каким образом по осциллограмме переходного процесса можно определить постоянную времени?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение принципов и способов измерения малых, средних и больших электрических сопротивлений.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В повседневной производственной практике часто приходится измерять сопротивления отдельных элементов электрической цепи, сопротивления заземления, сопротивления изоляции электрических установок, машин и аппаратов.

С точки зрения методики все электрические сопротивления делятся на три группы:

- а) малые сопротивления ($r \leq 1 \text{ Ом}$);
- б) средние сопротивления ($1 \leq r \leq 10^5 \text{ Ом}$);
- в) большие сопротивления ($r \geq 10^5 \text{ Ом}$).

Малыми электрическими сопротивлениями обладают, например, обмотки якорей электрических машин постоянного тока, последовательные обмотки электроизмерительных приборов, шунты и т.д.

Средними и большими электрическими сопротивлениями обладают параллельные обмотки возбуждения электрических машин постоянного тока, параллельные обмотки электроизмерительных приборов и т.д.

Существуют различные методы измерения электрических сопротивлений. В данной работе предлагается произвести измерения электрических сопротивлений различными способами:

- 1) омметром;
- 2) одинарным мостом постоянного тока;
- 3) на постоянном токе – методом амперметра и вольтметра.

Измерение электрических сопротивлений омметром

Для прямого измерения сопротивления применяют омметры – магнитоэлектрические приборы, шкалы которых проградуированы в единицах сопротивления. Омметр состоит из источника питания постоянного тока (батареи), регулировочного резистора $R_{рег}$ и миллиамперметра (рис. 8.1).

Прибор работает по принципу измерения тока при постоянной ЭДС. Перед измерением зажимы R_x замыкаются накоротко, и регулировочным резистором $R_{рег}$ выставляется ноль на шкале прибора. Затем подключается измеряемое сопротивление и снимается отсчет. Омметры

имеют большую погрешность (класс точности 2,5) и неравномерную (обратную) шкалу.

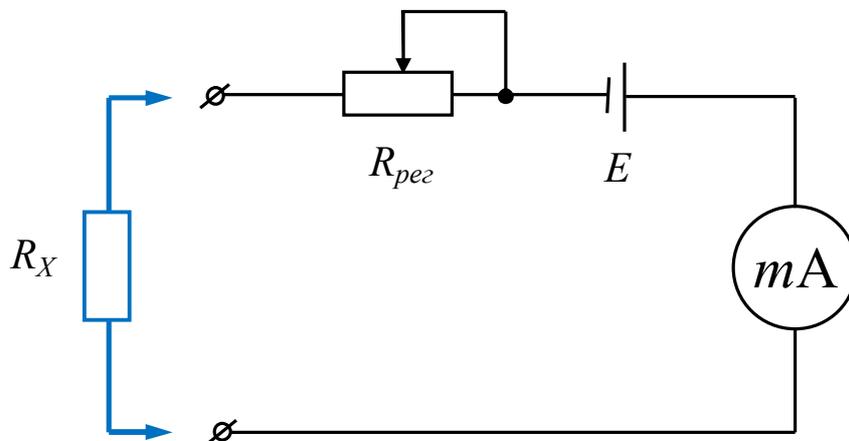


Рис. 8.1. Схема омметра

Более точными способами измерения сопротивлений является мостовая схема измерения сопротивлений и метод амперметра и вольтметра.

Измерение электрических сопротивлений одинарным измерительным мостом

Наиболее точным методом измерения сопротивлений является измерение с помощью равновесного моста. Мост постоянного тока в простейшем случае состоит из четырех резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , образующих две параллельные ветви, подключенные к источнику питания. Принципиальная электрическая схема одинарного измерительного моста показана на рис. 8.2.

В замкнутом четырехугольнике, образованном резисторами, различают плечи моста (сами резисторы) и диагонали, в которые включены индикатор нуля и источник питания.

Путем подбора сопротивлений в плечах моста можно обеспечить равновесие моста, т.е. такое распределение потенциалов, чтобы ток в диагонали моста, где включен индикатор нуля отсутствовал. В этом случае потенциалы точек В и D будут одинаковыми, поэтому

$$U_{AB} = U_{AD}, \text{ или } R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_3, \quad (8.1)$$

$$U_{BC} = U_{DC}, \text{ или } R_2 \cdot I_2 = R_4 \cdot I_4. \quad (8.2)$$

Разделив одно равенство на другое, получим:

$$\frac{R_1 \cdot I_1}{R_2 \cdot I_2} = \frac{R_3 \cdot I_3}{R_4 \cdot I_4}. \quad (8.3)$$

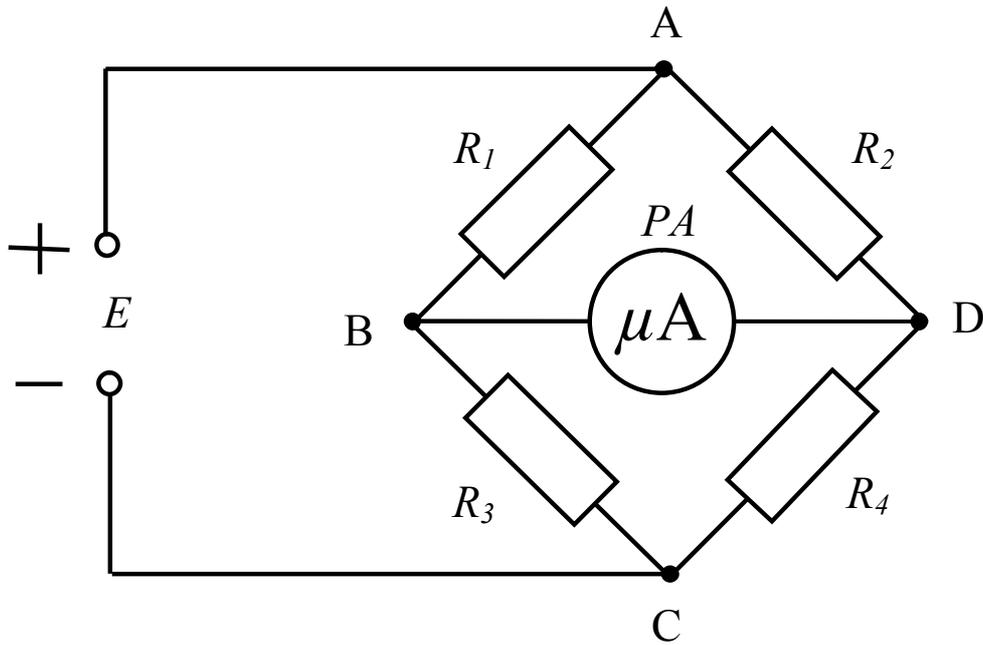


Рис. 8.2. Электрическая схема моста постоянного тока

Так как при равновесии моста ток через гальванометр не проходит, то $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$ (согласно первому закону Кирхгофа для узлов B и D). Тогда предыдущее уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ или } R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (8.4)$$

Это уравнение и определяет равновесие одинарного моста. Мосты, в которых выполняется это условие, называются уравновешенными.

Если одно из сопротивлений плеч неизвестно, например R_1 , то, уравневав мост, можно найти это сопротивление из общего условия равновесия моста

$$R_x = R_1 = \frac{R_2}{R_4} \cdot R_3. \quad (8.5)$$

На этом принципе основано измерение сопротивлений одинарным мостом постоянного тока. Практически уравновешивание моста достигается изменением величины сопротивления R_3 и изменением отношения плеч R_2/R_4 .

Измерение электрических сопротивлений на постоянном токе методом амперметра и вольтметра.

Метод амперметра и вольтметра основан на применении закона Ома к участку цепи

$$r_X = \frac{U_X}{I_X}. \quad (8.6)$$

Измерив ток I_X , проходящий через сопротивление, и напряжение U_X на нем, можно определить значение сопротивления r_X . Измерение сопротивления можно производить по двум схемам, изображенным на рисунках 8.3 и 8.4.

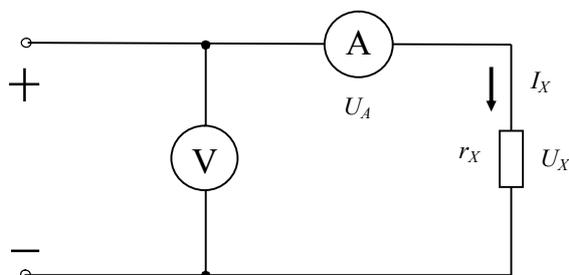


Рис. 8.3. Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра

Рассмотрим каждую схему в отдельности. При измерении сопротивления по схеме (рис. 8.3) амперметр показывает правильное значение проходящего по сопротивлению тока, а вольтметр показывает сумму падений напряжений на измеряемом сопротивлении U_X и падение напряжение U_A на амперметре, т.е.

$$U = U_X + U_A. \quad (8.7)$$

Поэтому измеренное значение сопротивления будет равно

$$r'_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U - U_A}{I_X} = \frac{U - r_A \cdot I_X}{I_X} = \frac{U}{I_X} - r_A, \quad (8.8)$$

где U – показания вольтметра; I_X – показания амперметра; r_A – сопротивление амперметра.

Таким образом, первой схемой (рис. 8.3) целесообразно пользоваться тогда, когда измеряемое сопротивление r_X много больше сопротивления амперметра r_A : $r_X \gg r_A$.

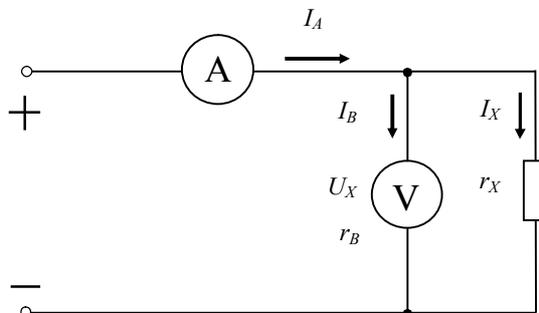


Рис. 8.4. Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра

При измерении сопротивления по схеме (рис. 8.4) вольтметр покажет падение напряжения на измеряемом сопротивлении r_X , а амперметр – сумму токов, проходящих через измеряемое сопротивление и вольтметр, т.е.

$$I_A = I_X + I_B. \quad (8.9)$$

Искомое сопротивление равно

$$r'_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_X}{I_A - I_B} = \frac{U_X}{I_A - U_X/r_B}, \quad (8.10)$$

где U_X – напряжение на вольтметре; I_A – показание амперметра; r_B – сопротивление вольтметра.

Вторую схему (рис. 8.4) следует применять когда измеряемое сопротивление r_X мало по сравнению с сопротивлением вольтметра r_B : $r_X \ll r_B$.

Если неизвестны сопротивления амперметра и вольтметра r_A и r_B или не требуется особой точности в измерении сопротивлений, то сопротивление можно подсчитать по приближенной формуле (8.11) независимо от того, как включены приборы

$$r''_X = \frac{U}{I}, \quad (8.11)$$

где U – показание вольтметра; I – показания амперметра.

Относительная погрешность измерений определяется так:

$$\gamma = \frac{r'_X - r''_X}{r_X} \cdot 100\%, \quad (8.12)$$

где r'_X – сопротивление измеренное методом моста;

r_X – сопротивление, измеренное методом амперметра и вольтметра.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе необходимо провести измерения сопротивлений омметром, одинарным мостом постоянного тока и методом амперметра и вольтметра. Сравнить точность измерений этих методов для малых, средних и больших сопротивлений.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами.

3. Записать в таблицу 8.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 8.1

Сведения об измерительных приборах

	<i>РА</i>	<i>PV</i>
Тип прибора		
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)		
Предел измерений		
Класс точности		
Род тока		
Цена деления		
Абсолютная погрешность измерения		

**3.2.1. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОММЕТРА
(УНИВЕРСАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА)**

1. Зажимы омметра замкните накоротко.
2. Регулировочным резистором выставить ноль на шкале прибора.
3. Подключите к зажимам измеряемое сопротивление и снимите отсчет.
4. Измеренное значение запишите в таблицу 8.2.

3.2.2. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МОСТОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Ознакомьтесь с принципом действия и устройством моста постоянного тока.
2. К зажимам *1* и *2* моста, обозначенным *X*, подключить неизвестное сопротивление r_X .
3. С помощью корректора установить стрелку гальванометра на «0».
4. Установите соответствующее отношение плеч R_2/R_4 .
5. Изменяя сопротивление R_3 , уравновесить мост сначала при нажатии кнопки «грубо», а затем – «точно» и определить сопротивление по формуле (8.5).
6. С помощью моста измерить сопротивления амперметра r_A и вольтметра r_B , используемых при измерении сопротивлений способом амперметра и вольтметра.
7. Полученные результаты измерений занести в таблицу 8.2 (п. 2 примечание).

3.2.3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

1. Выберите схему включения приборов с учетом рекомендаций по точности измерений сопротивлений.
2. Соберите схему (рис. 8.3 или рис. 8.4).
3. По показаниям амперметра и вольтметра, используя известные значения сопротивлений амперметра и вольтметра (r_A и r_B), определите величину сопротивления r_X по формулам (8.8) или (8.10).
4. Определите относительную погрешность γ по формуле (8.12).
5. Полученные результаты измерений и вычислений занести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2

Таблица проведенных измерений

№ п/п	Содержание операции	Результат	Примечание
1	Измерение сопротивления омметром	$r_{\Omega} =$	
2	Измерение сопротивления мостом	$r_X =$	$r_A =$ $r_B =$
3	Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра	$r'_X =$	
4	Определение относительной погрешности измерения	$\gamma = \frac{r'_X - r_X}{r_X} \cdot 100, \%$	

6. Ответить на контрольные вопросы.
7. Оформить отчет в соответствии с методическими указаниями и предоставить для защиты преподавателю.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. На какие группы делятся все электрические сопротивления с точки зрения методики измерения?
2. С помощью каких приборов можно измерять сопротивления?
3. Какими способами можно измерять электрические сопротивления?
4. На чем основан метод амперметра и вольтметра при измерении сопротивления?
5. Какие существуют способы включения приборов при измерении методом амперметра и вольтметра и в каких случаях эти способы применяются?
6. Объясните принцип действия электроизмерительного моста постоянного тока.
7. Что такое условие равновесия одинарного моста?
8. Как проводится измерение с помощью омметра?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Изучение принципа действия и методов испытания однофазного трансформатора, определение его основных параметров.
2. Расчет и построение векторных диаграмм и рабочих характеристик однофазного трансформатора в различных режимах.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в другое напряжение той же частоты.

Трансформаторы делятся по назначению на силовые, специальные, измерительные и радиотехнические. К силовым относятся трансформаторы, передающие потребителю электрическую энергию, к специальным – сварочные и выпрямительные, к измерительным – трансформаторы тока и напряжения, служащие для подключения электроизмерительных приборов, к радиотехническим – маломощные трансформаторы и трансформаторы, работающие на повышенной частоте. Кроме того, по числу фаз трансформаторы подразделяются на однофазные и трехфазные и по способу охлаждения – на масляные, сухие и с твердым наполнителем. По числу обмоток трансформаторы делятся на двухобмоточные и многообмоточные.

Изображение однофазного двухобмоточного трансформатора на электрической схеме приведено на рис. 9.1.

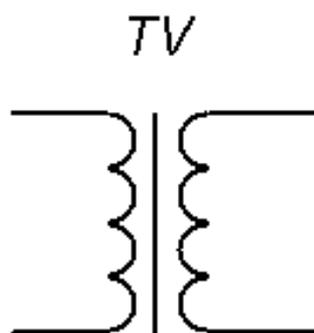


Рис. 9.1. Изображение однофазного трансформатора на электрических схемах

3. УСТРОЙСТВО ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА И ПРИНЦИП ЕГО ДЕЙСТВИЯ

Трансформатор состоит из замкнутого сердечника (магнитопровода), и двух (или большего числа) обмоток (рис. 9.2). Обмотка, которая подключается к источнику напряжения, называется первичной. Другая обмотка, к которой присоединяются приемники энергии, называется вторичной. Все величины, относящиеся к первичной обмотке, отмечаются индексом 1 (например P_1 , U_1 , I_1 , r_1 и т.д.), а величины, относящиеся к вторичной обмотке, – индексом 2 (например P_2 , U_2 и т.д.).

Трансформатор является обратимым аппаратом, т.е. в качестве первичной обмотки может быть любая из обмоток трансформатора. Наматывается обмотка трансформатора медным изолированным проводом с дополнительной изоляцией между слоями.

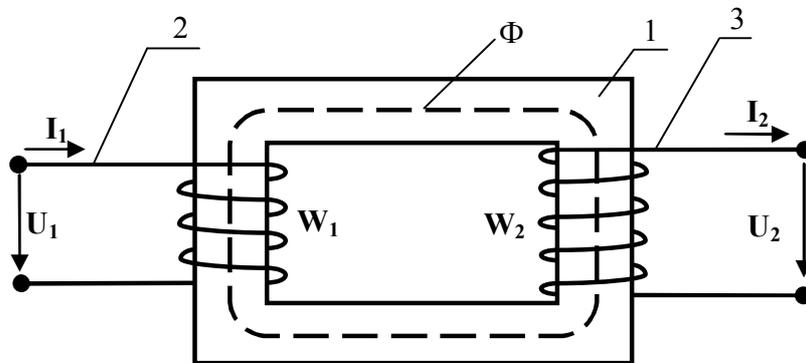


Рис. 9.2. Устройство однофазного трансформатора:
1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка

Магнитопровод (железный сердечник) набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга слоем лака или окалины для уменьшения потерь на гистерезис и от вихревых токов. Часть магнитопровода, на котором располагается обмотка, называется стержнем, а часть, замыкающая стержни, яром. По своему устройству магнитопровод подразделяется на Π -образный и Ш -образный.

Принцип работы трансформатора основан на принципе электромагнитной индукции Фарадея

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (9.1)$$

При подаче переменного синусоидального напряжения U_1 на первичную обмотку трансформатора по этой обмотке пойдет ток I_1 , который создает в ферромагнитном сердечнике переменное магнитное поле. Появляющийся при этом магнитный поток изменяется также по гармоническому закону

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t, \quad (9.2)$$

где $\Phi_m = \frac{U_m}{w_1 \omega}$ – амплитуда магнитного потока;

U_m – амплитуда напряжения на входе трансформатора;

w_1 – число витков первичной обмотки;

ω – круговая частота переменного тока.

Магнитный поток Φ , замыкающийся по сердечнику (магнитопроводу), пронизывает витки первичной и вторичной обмоток. По закону электромагнитной индукции (9.1) поток Φ индуцирует в каждом витке обмоток э.д.с.

$$e_{\epsilon} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -\omega \Phi_m \cos \omega t = \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (9.3)$$

Сравнивая 9.2 и 9.3, видим, что э.д.с. отстает от магнитного потока на угол 90° , а действующее значение э.д.с. в витке

$$E_{\epsilon} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Phi_m = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \Phi_m = 4,44 f \Phi_m. \quad (9.4)$$

Следовательно, в первичной обмотке возникает э.д.с.

$$E_1 = 4,44 \cdot f W_1 \Phi_m, \quad (9.5)$$

а э.д.с. вторичной обмотки

$$E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m. \quad (9.6)$$

Отношение напряжения на первичной обмотке к напряжению на вторичной обмотке называют коэффициентом трансформации K трансформатора

$$K = \frac{U_1}{U_2}. \quad (9.7)$$

Если $K > 1$, то $U_1 > U_2$ (напряжение вторичной обмотки ниже напряжения первичной обмотки) – такой трансформатор называют понижающим; если $K < 1$, $U_1 < U_2$ (напряжение вторичной обмотки выше напряжения первичной) – повышающий трансформатор; $K = 1$, $U_1 = U_2$ (напряжение вторичной обмотки равно напряжению первичной обмотки) – разделительный трансформатор. Разделительные трансформаторы применяются в радиотехнике для электрического разделения цепей (гальванической развязки цепей), т.к. в трансформаторе первичная и вторичная цепи связаны только магнитной связью.

Использование трансформатора связано с неизбежными потерями электрической энергии. Различают два вида потерь в трансформаторе: потери на нагревание обмоток при прохождении по ним переменного тока, получившие название потери в меди (P_M – мощность потерь в меди), и потери в стальном сердечнике, связанные с гистерезисом и вихревыми токами, получившие название потери в стали ($P_{СТ}$ –

мощность потерь в стали).

Энергетические соотношения в трансформаторе наглядно могут быть показаны с помощью энергетической диаграммы (рис. 9.3), где P_1 – активная мощность, подведенная к трансформатору от источника питания; P_2 – полезная активная мощность, отдаваемая трансформатором в нагрузку; $P_{ст}$ – потери на перемагничивание сердечника и вихревые токи (потери в стали); P_M – потери в активных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток (потери в меди).

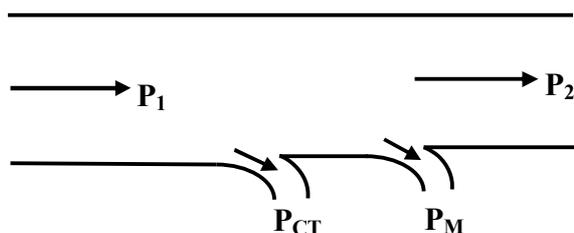


Рис. 9.3. Энергетическая диаграмма трансформатора

Потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи зависят от частоты тока питающей сети и магнитной индукции. Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны (при условии постоянства приложенного напряжения), то потери в стали постоянны, не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям холостого хода трансформатора P_o . Эти потери определяются из опыта холостого хода трансформатора. Потери в меди P_M определяются из опыта короткого замыкания трансформатора.

К.п.д. трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой из первичной сети

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% . \quad (9.8)$$

К.п.д. трансформаторов малых мощностей (до 1000 Вт): $\eta = 85 \div 95 \%$, для трансформаторов больших мощностей $\eta = 95 \div 99,5 \%$.

В работе трансформатора можно выделить три режима:

- 1) режим холостого хода, когда вторичная обмотка разомкнута;
- 2) режим короткого замыкания, когда вторичная обмотка замкнута;
- 3) рабочий режим (работа под нагрузкой).

3.1. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

При этом режиме на первичную обмотку трансформатора (рис. 9.4) подается номинальное напряжение U_{1H} (согласно паспорту трансформатора), а вторичная обмотка разомкнута, т.е. трансформатор работает без

нагрузки. Амперметр PA_1 показывает ток холостого хода $I_{10} = 0$. Вольтметр PV_2 во вторичной цепи показывает напряжение вторичной обмотки $U_{20} = E_2$.

Ввиду малости тока, протекающего в первичной обмотке, потери мощности в первичной катушке составляют не более одного процента от номинальной мощности трансформатора. Поэтому потери мощности в первичной и вторичной обмотке можно принять равными нулю $P_{10} \approx 0$, $P_2 = 0$. Следовательно, в режиме холостого хода потери мощности наблюдаются только в магнитопроводе и связаны с перемагничиванием железа и вихревыми токами в магнитопроводе. Ваттметр PW показывает мощность потерь в сердечнике трансформатора: $P_{10} = P_{CT}$, которые составляют (0,3–1,4) % от номинальной мощности трансформатора.

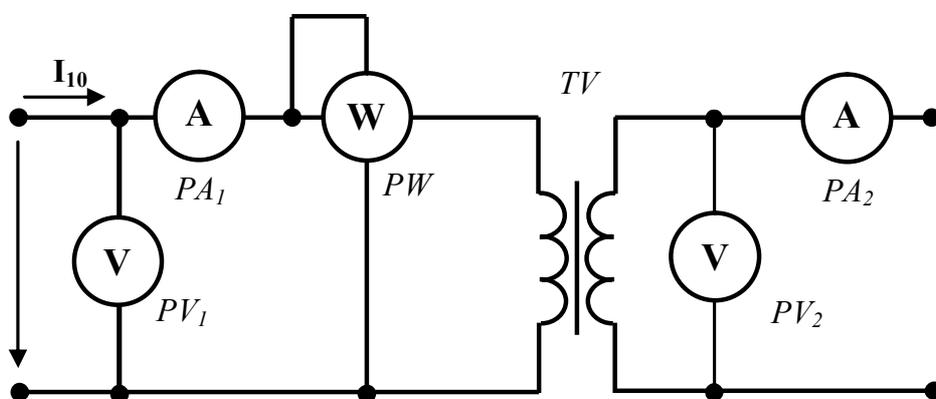


Рис. 9.4. Схема испытания трансформатора в режиме холостого хода

При холостом ходе, пренебрегая падением напряжения на первичной обмотке трансформатора, $E_1 \approx U_1$, $E_2 = U_2$. В этом случае коэффициент трансформации K

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (9.9)$$

Таким образом, в опыте холостого хода определяются коэффициент трансформации, магнитный поток Φ_m и магнитные потери в магнитопроводе.

3.2. РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Режим короткого замыкания для трансформатора является аварийным, т.к. при закорачивании вторичной обмотки $U_2 = U_{2КЗ} = 0$, $Z_H = 0$ и ток в первичной обмотке будет в 15–20 раз больше номинального рабочего режима.

Поэтому опыт короткого замыкания производят только с

целью определения параметров первичной и вторичной обмоток при пониженном напряжении на первичной обмотке: $U_{1К.З.} \ll U_{1Н.}$

Опыт производят при условии протекания по первичной и вторичной обмотке трансформатора номинальных токов: $I_{1К.З.} = I_{1Н.}$, $I_{2К.З.} = I_{2Н.}$. Напряжение короткого замыкания для первичной обмотки задается в процентах от номинального напряжения $U_{1К.З.} = (U_{1К.З.}/U_{1Н.}) \cdot 100\%$ и составляет примерно 5 % трансформаторов с масляным охлаждением и 2–2,5 % для трансформаторов с воздушным охлаждением.

Схема опыта короткого замыкания приведена на рис. 9.5.

Так как напряжение короткого замыкания в первичной обмотке во много раз меньше номинального напряжения, то

$$U_1 \cong 4,44w_1\Phi_m f, \quad (9.10)$$

$$\Phi_{mК.З.} \ll \Phi_{mН.}, \quad (9.11)$$

где $\Phi_{mК.З.}$ – амплитуда магнитного потока при коротком замыкании, $\Phi_{mН.}$ – амплитуда магнитного потока при работе трансформатора под нагрузкой.

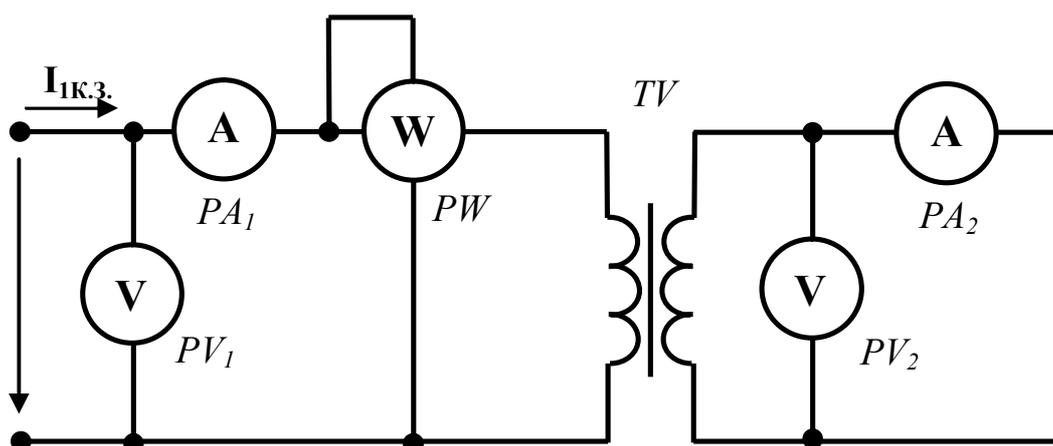


Рис. 9.5. Схема опыта короткого замыкания

Потери в стали магнитопровода будут стремиться к нулю: $P_{cm} \rightarrow 0$. Поэтому мощность при коротком замыкании рассеивается только в обмотках трансформатора и идет на нагрев меди в них

$$P_{К.З.} = P_1 + P_2 = I_{1Н.}^2 R_1 + I_{1Н.}^2 R_2 = I_{1Н.}^2 R_{К.З.}, \quad (9.12)$$

где R_1 и R_2 – сопротивления первичной и вторичной обмоток, $I_{1Н.}$ и $I_{2Н.}$ – номинальные (рабочие) токи, проходящие по первичной и вторичной обмоткам, P_1 , P_2 – мощность потерь в меди в первичной и вторичной обмотках.

По этой причине можно считать, что мощность, измеряемая ваттметром PW при опытном коротком замыкании, показывает мощность потерь в меди (обмотках) трансформатора.

Общее сопротивление короткого замыкания Z_K определится из отношений

$$U_{1K.3.} = I_{1H} R_{K.3.} = \frac{P_{K.3.}}{I_{1H}}, \quad (9.13)$$

$$\cos \varphi_{K.3.} = \frac{R_{K.3.}}{Z_{K.3.}}, \quad (9.14)$$

$$K \approx \frac{I_{2H}}{I_{1H}}. \quad (9.15)$$

Таким образом, при исследовании опытного короткого замыкания измеряются электрические потери в обмотках трансформатора и сопротивления короткого замыкания трансформатора.

3.3. РАБОЧИЙ РЕЖИМ

В этом режиме к первичной обмотке трансформатора подводится номинальное напряжение U_{1H} , а ко вторичной обмотке подключается сопротивление нагрузки Z . При номинальной нагрузке $I_2 = I_{2H}$, напряжение $U_2 = U_{2H}$ и по первичной цепи протекает номинальный ток I_{1H} .

Свойства трансформатора при работе под нагрузкой могут быть определены непосредственным его испытанием. Однако такое определение имеет определенные недостатки: необходимо нагрузочное оборудование и потребляется много электроэнергии. Все рабочие свойства трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. На производство опытов холостого хода и короткого замыкания тратится сравнительно мало электрической энергии, при этом отпадает потребность в громоздком нагрузочном оборудовании и результаты получаются очень точные.

При исследовании работы трансформатора для упрощения и наглядности расчетов применяют различные методы: метод схемы замещения, метод векторных диаграмм, метод построения и анализа характеристик трансформатора в разных режимах.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Собрать электрическую схему для исследования однофазного трансформатора. Изменяя характер нагрузки вторичной обмотки трансформатора осуществить опыты холостого хода и короткого замыкания, а также исследовать работу трансформатора при различных нагрузках в рабочем режиме.

По измеренным данным рассчитать параметры трансформатора, построить векторные диаграммы и рабочие характеристики трансформатора при разных режимах работы.

4.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет в соответствии с указаниями и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.
3. Записать в таблицу 9.1 технические данные измерительных приборов.

Таблица 9.1

Сведения об измерительных приборах

	PA_1	PV_1	PW_1	PA_2	PV_2
Наименование прибора					
Тип прибора					
Измерительный механизм (наименование и обозначение)					
Предел измерений					
Класс точности					
Род тока					
Цена деления					
Абсолютная погрешность измерения					

4. Собрать электрическую схему для исследования однофазного трансформатора (рис. 9.6) и предоставить для проверки преподавателю.

4.2.1. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА

1. Вторичную обмотку разомкнуть с помощью переключателей SA_1 – SA_4 .
2. Первичную обмотку трансформатора подключить к сети с напряжением $U_{IX} = 220$ В.
3. Снять показания измерительных приборов и записать в табл. 9.2.

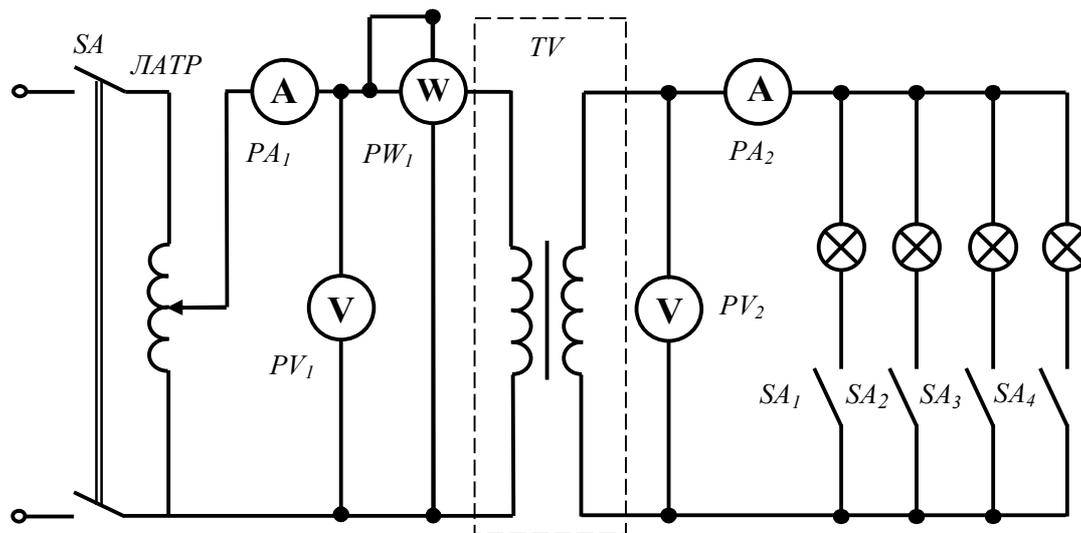


Рис. 9.6. Электрическая схема исследования однофазного трансформатора

Таблица 9.2

Опыт холостого хода трансформатора

Измеренные значения опыта холостого хода						
U_{10} , В	I_{10} , А	P_{10} , Вт	U_{20} , В	I_{20} , А		
Вычисленные значения опыта холостого хода						
Z_0 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом	K	$\cos\varphi_0$	Φ_m , Вб	, Тл

4.2.2. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

1. Вторичную обмотку замкнуть накоротко.
2. Для измерения напряжения $U_{1К.З.}$ использовать вольтметр PV_2 со шкалой 50 В. Для измерения напряжения на вторичной обмотке использовать вольтметр PV_1 . Чтобы это сделать, поменяйте провода с одного вольтметра на другой.
3. К первичной обмотке подведите с помощью автотрансформатора пониженное напряжение $U_{1К.З.} = 10 \div 15$ В (напряжение должно быть такое, чтобы амперметр PA_2 не зашкаливал).
4. Измеренные значения опыта короткого замыкания запишите в таблицу 9.3.

Таблица 9.3

Опыт короткого замыкания трансформатора

Измеренные значения опыта короткого замыкания				
$U_{1К.з.}$, В	$I_{1К.з.}$, А	$P_{1К.з.}$, Вт	$U_{2К.з.}$, В	$I_{2К.з.}$, А
Вычисленные значения опыта короткого замыкания				
$Z_{К.з.}$, Ом	$R_{К.з.}$, Ом	$X_{К.з.}$, Ом	$\cos\varphi_{К.з.}$	

4.2.3. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

1. Собрать схему, как показано на рисунке 9.6.
2. На первичную обмотку подать напряжение $U_1 = 220$ В.
3. Изменяя нагрузку трансформатора включением переключателей $SA_1 - SA_4$ (рис. 9.6), снять показания всех приборов и записать в таблицу 9.4.

Таблица 9.4

Рабочий режим трансформатора

№ п/п	Измеренные значения					Вычисленные значения			
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	K	P_2 , Вт	$\cos\varphi_1$	η
1									
2									
3									
4									

4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Используя результаты проведенных опытов, рассчитать следующие параметры однофазного трансформатора.

Расчет по данным опыта холостого хода

1. $Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}$ – полное сопротивление первичной обмотки трансформатора.
2. $R_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}$ – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора.
3. $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ – реактивное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

4. $K = \frac{U_{10}}{U_{20}}$ – коэффициент трансформации.

5. $\cos \varphi_0 = \frac{R_0}{Z_0}$ – коэффициент мощности.

Используя данные опыта холостого хода рассчитать также магнитный поток Φ_m в сердечнике трансформатора по формуле 9.16 и индукцию B магнитного поля по формуле 8.17:

$$\Phi_m = \frac{U_{10}}{4,44 f w_1}, \quad (9.16)$$

$$\Phi_m = B \cdot S. \quad (9.17)$$

При вычислениях принять:

- 1) количество витков в первичной обмотке трансформатора w_1 равным 136;
- 2) площадь сердечника трансформатора $S = 100 \text{ см}^2$;
- 3) частоту переменного тока $f = 50 \text{ Гц}$.

Полученные данные занести в таблицу 9.2.

Расчет по данным опыта короткого замыкания

1. $Z_{K.3.} = \frac{U_{1K.3.}}{I_{1K.3.}}$ – полное сопротивление трансформатора в опыте короткого замыкания.

2. $R_{K.3.} = \frac{P_{K.3.}}{I_{1K.3.}^2}$ – активное сопротивление трансформатора.

3. $X_{K.3.} = \sqrt{Z_{K.3.}^2 - R_{K.3.}^2}$ – индуктивное сопротивление трансформатора.

4. $\cos \varphi_{K.3.} = \frac{P_{1K.3.}}{U_{1K.3.} \cdot I_{1K.3.}}$ – коэффициент мощности.

Полученные данные занести в таблицу 9.3.

Расчет параметров рабочего режима трансформатора

1. $K = \frac{U_1}{U_2}$ – коэффициент трансформации трансформатора.

2. $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ – мощность во вторичной обмотке трансформатора, при этом $\cos \varphi_2 = 1$, т.к. нагрузка трансформатора активная.

3. $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$ – коэффициент мощности первичной обмотки.

4. $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$ – коэффициент полезного действия трансформатора.

Полученные данные занести в таблицу 9.4.

С помощью вычисленных значений величин можно построить векторные диаграммы трансформатора, найти параметры схемы замещения трансформатора, которая используется для расчета электрических цепей.

Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

Построить векторную диаграмму холостого хода трансформатора по данным опыта холостого хода:

- а) построение векторной диаграммы начинаем с выбора масштабов M_I и M_U (вектор Φ_m один и строится без масштаба);
- б) строим вектор Φ_m , совмещая его с горизонталью ($\Phi = \Phi_m \sin \omega t$);
- в) откладываем вектора E_1 и E_2 под углом 90° в сторону отставания от Φ_m ;
- г) строим вектор $E_1 \approx U_1$;
- д) под углом φ_0 от U_1 в сторону отставания строим вектор I_0 .

Пример построения векторной диаграммы показан на рис. 9.7.

Угол δ называется углом гистерезисного опережения или углом потерь. Обычно этот угол мал и составляет несколько градусов.

Векторная диаграмма опыта короткого замыкания

По данным опыта короткого замыкания построить векторную диаграмму:

- а) построение векторной диаграммы начинаем с выбора масштабов M_I и M_U ;
- б) горизонтально отложим вектор тока короткого замыкания $I_{К.З.}$;
- в) под углом $\varphi_{К.З.}$ отложим вектор напряжения на первичной обмотке $U_{1К.З.}$;
- г) проекции этого вектора на горизонтальную ось определяют вектора падения напряжения на активном и реактивном сопротивлении короткого замыкания.

По данным таблицы 9.4 построить внешнюю (нагрузочную) характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$ и рабочие характеристики трансформатора $K = f(I_2)$, $\cos\varphi_1 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$.

Составить отчет о проделанной работе.

Ответить на контрольные вопросы и сдать отчет по лабораторной работе преподавателю.

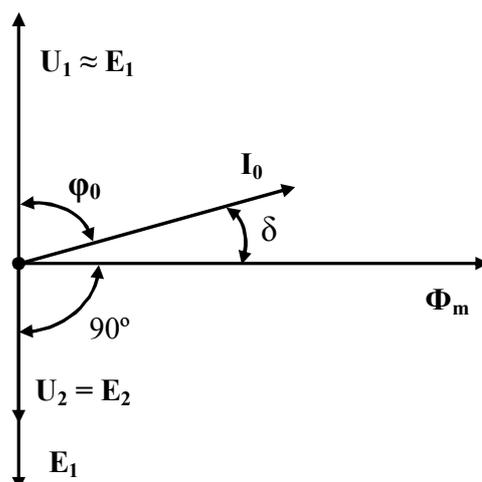


Рис. 9.7. Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое трансформатор и как он устроен? Где применяются трансформаторы?
2. Как работает трансформатор?
3. Почему трансформаторы применяются лишь в цепях переменного тока?
4. Что называется коэффициентом трансформации трансформатора и как его определить?
5. Что называется холостым ходом трансформатора? Для чего осуществляется опыт холостого хода?
6. Что называют коротким замыканием трансформатора? Для чего осуществляется опыт короткого замыкания?
7. Как определить потери мощности в трансформаторе?
8. Как вычислить магнитный поток в сердечнике?
9. Что такое внешняя характеристика трансформатора?
10. Что такое рабочие характеристики трансформатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы полупроводниковых диодов.
2. Приобрести практические навыки в снятии вольтамперной характеристики кремниевого и германиевого диодов.
3. Определить статическое и дифференциальное сопротивления исследуемых диодов.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Широко распространенным элементом электрических цепей являются полупроводниковые диоды.

Диодами называются полупроводниковые приборы, имеющие один p - n переход и два вывода (электрода). Структура и схематическое обозначение диода показано на рис. 10.1. P -область представлена стрелкой, а n -часть – чертой. Вывод от n -области называется катодом, а вывод от p -области – анодом.

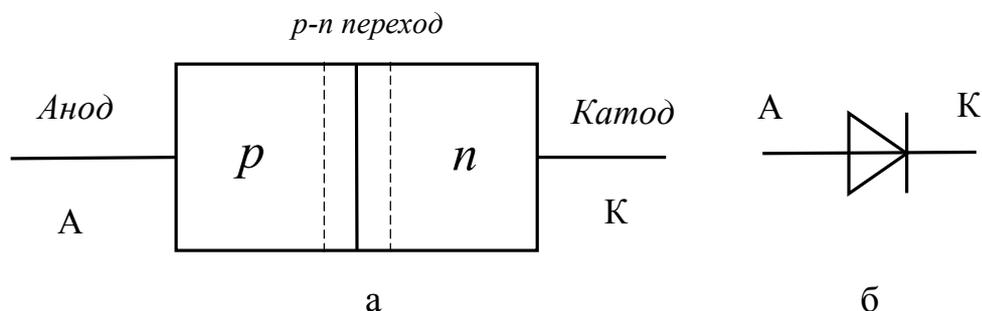


Рис.10.1. Структура (а) и схематическое обозначение (б) диода

Диод образован соединением двух полупроводников p - и n - типа. В месте контакта этих материалов образуется p - n переход, который определяет свойства диода. Ширина p - n перехода очень мала, от 1 до 50 мкм.

Так как концентрация электронов в n -области больше, чем в p -области, электроны диффундируют из n -области в p -область. Аналогичным образом дырки диффундируют из p -области в n -область. По мере диффузии пограничный слой p -области обедняется дырками и в нем возникает отрицательный объемный заряд ионизированных атомов акцепторной примеси. Пограничный слой n -области обедняется электронами, и в нем возникает положительный объемный заряд за счет ионизированных атомов доноров.

Область p - n перехода, имеющую пониженную концентрацию основных носителей заряда, называют запирающим слоем или обедненным слоем. За счет положительного объемного заряда в пограничном слое n -области электрический потенциал этой области становится выше, чем потенциал p -области.

Между n - и p -областями возникает разность потенциалов, которая называется контактной.

Поскольку электрическое поле p - n перехода препятствует диффузии основных носителей в соседнюю область, то считают, что между p - и n -областями установился потенциальный барьер.

Потенциальный барьер довольно мал, его величина составляет несколько десятых долей вольта. Типичные значения потенциального барьера – 0,3 вольта для p - n перехода в германии, и 0,7 вольта для p - n перехода в кремнии. Потенциальный барьер проявляется, когда к p - n переходу прикладывается внешнее напряжение.

При прямом включении p - n перехода (рис. 10.2, а), когда «+» источника питания подается на область p , а «-» – на область n , потенциальный барьер уменьшается. Вследствие этого диффузия основных носителей через p - n переход значительно облегчается и во внешней цепи возникает ток. Такой ток называют током прямого направления или прямым током, а переход считают смещенным в прямом направлении.

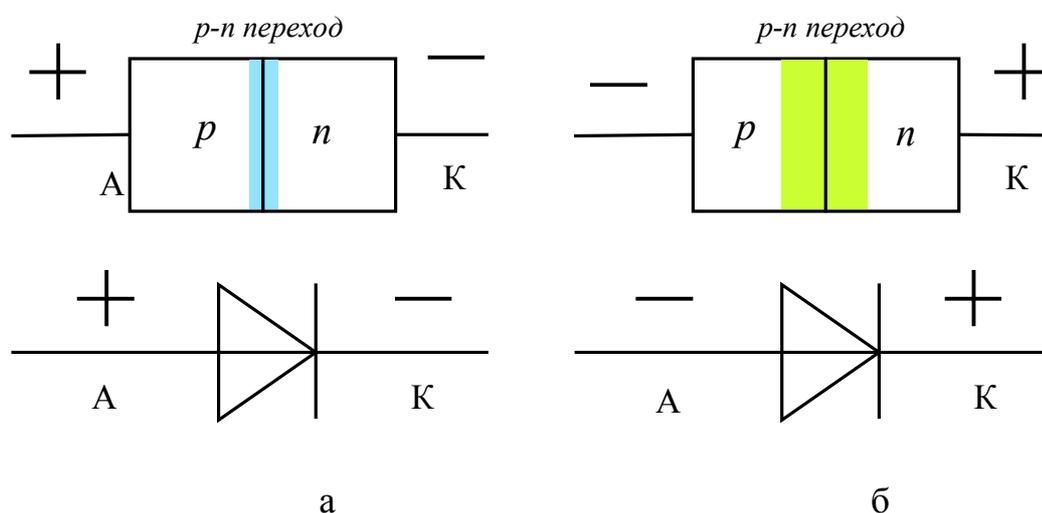


Рис. 10.2. Способы подачи напряжения на p - n переход:
а – прямое включение; б – обратное включение

При обратном включении p - n перехода (рис. 10.2, б), когда «+» источника питания подается на область n , а «-» – на область p , потенциальный барьер возрастает. В этом случае переход основных носителей из одной области в другую затрудняется и уменьшается ток во внешней цепи. Такой ток называют обратным, а переход считают смещенным в обратном направлении.

Таким образом, в зависимости от полярности приложенного напряжения диод может находиться в одном из двух состояний: открытом либо закрытом. Такое свойство p - n перехода и диода называют вентиляльным эффектом.

В зависимости от функционального назначения диоды делят на выпрямительные, универсальные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные, параметрические, фотодиоды, светодиоды и др.

В качестве выпрямительных диодов используют сплавные и диффузионные диоды, выполненные на основе несимметричных p - n переходов. Для выпрямительных диодов характерно малое сопротивление в проводящем состоянии и возможность пропускать большие токи. Барьерная емкость из-за большой площади p - n перехода велика и достигает значений десятков пикофард.

Выпрямительные диоды обладают односторонней проводимостью электрического тока. Это свойство используют, например, в выпрямителях, где диоды преобразуют переменный ток электрической сети в ток постоянный для питания радиоаппаратуры и другой электротехники, в приемниках – для детектирования модулированных колебаний высокой частоты, то есть преобразования их в колебания низкой (звуковой) частоты и т.д.

Зависимость тока, протекающего через диод, от приложенного к нему напряжения называют вольтамперной характеристикой (ВАХ) p - n перехода (полупроводникового диода). ВАХ диода снимают экспериментально. Типичная вольтамперная характеристика для кремниевого и германиевого диодов приведена на рис. 10.3.

Основные параметры выпрямительных диодов

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- прямое напряжение на диоде U_{np} – напряжение при определенном значении прямого тока I_{np} ;
- максимально допустимый прямой ток диода – $I_{np.max}$;
- максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.max}$ – значение напряжения, приложенного в обратном направлении, которое диод может выдержать в течение длительного времени без нарушения его работоспособности;

- обратный ток диода $I_{обр}$ – среднее значение обратного тока при заданном обратном напряжении $U_{обр}$;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность на диоде P_{max} .
- предельно допустимая температура диода T_{max} .

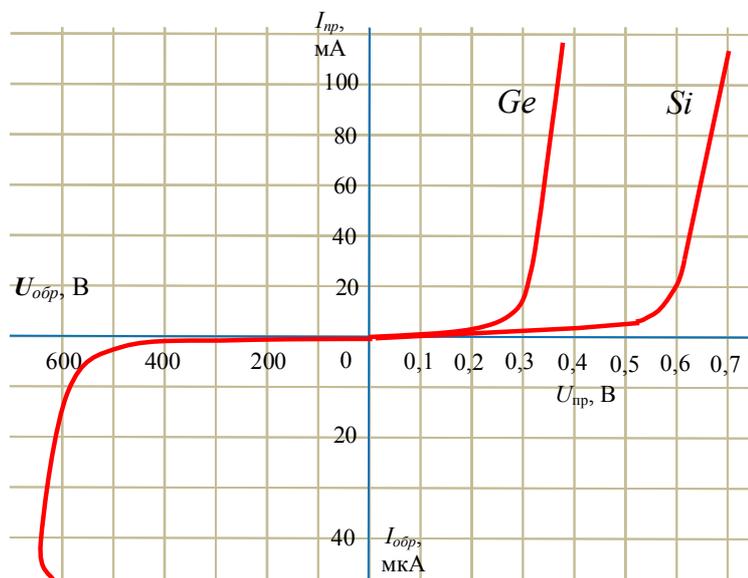


Рис.10.3. Вольтамперные характеристики кремниевого и германиевого диодов

Превышение предельно допустимых параметров приводит, как правило, к тепловому пробую и разрушению полупроводникового диода.

Основные электрические параметры полупроводниковых диодов связаны с односторонней проводимостью диодов и показаны на ВАХ (рис. 10.4).

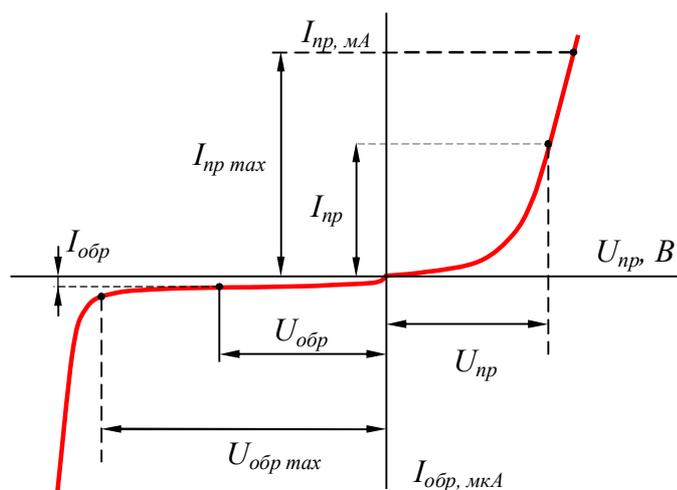


Рис. 10.4. Основные параметры диодов

К основным параметрам полупроводникового диода также относятся:

- статическое сопротивление (сопротивление диода постоянному току)

$$R_0 = \frac{U}{I}, \quad (10.1)$$

где U и I – напряжение и ток в рабочем режиме;

- дифференциальное сопротивление диода R_i (сопротивление переменному току) – отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его приращению тока

$$R_i = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{I=const} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (10.2)$$

В прямом направлении R_i составляет единицы Ом, в обратном – сотни кОм.

Эти параметры можно определить на прямой ветви вольтамперной характеристики диода (рис. 10.5) следующим образом:

$$R_0 = \left. \frac{U}{I} \right|_M = \frac{U_M}{I_M}; \quad (10.3)$$

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}. \quad (10.4)$$

Аналогично можно определить данные параметры и на обратной ветви ВАХ.

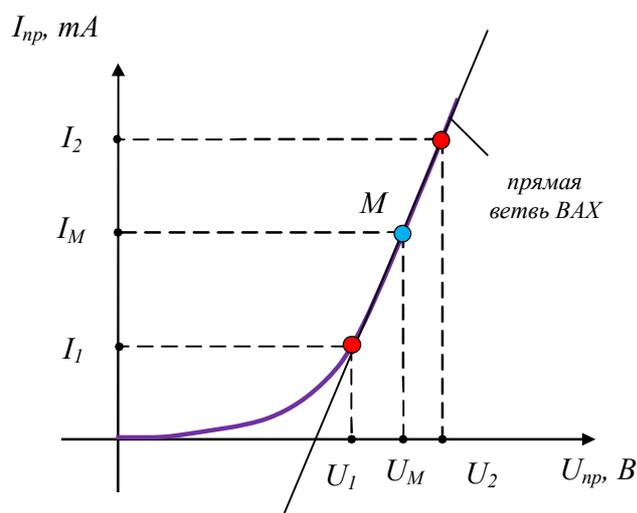


Рис. 10.5. Определение статического и дифференциального сопротивлений диода на прямой ветви ВАХ

Важным параметром диода является его емкость. В $p-n$ переходе имеется двойной слой из положительно заряженных доноров с одной стороны и отрицательно заряженных акцепторов – с другой. Этот двойной электрический слой подобен заряженным обкладкам конденсатора. Эту емкость называют барьерной

$$C_{бар} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{4\pi \cdot d}, \quad (10.5)$$

где S – площадь $p-n$ перехода;

d – толщина обедненного слоя;

ε – диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Изменение заряда в $p-n$ переходе может быть также вызвано изменениями концентрации подвижных носителей заряда в p - и n - областях при прямом смещении $p-n$ перехода. Эту емкость называют диффузионной $C_{диф}$. Эта емкость зависит от тока: чем выше ток, тем выше $C_{диф}$. Обе емкости обуславливают инерционность $p-n$ перехода. Наибольшее влияние на работу $p-n$ перехода оказывает барьерная емкость.

В настоящее время более широкое распространение получили кремниевые выпрямительные диоды, которые имеют следующие преимущества:

- 1) малые обратные токи;
- 2) высокое значение допустимого обратного напряжения, которое достигает 2500...3500 В;
- 3) работоспособность кремниевых диодов сохраняется при температурах от -60°C до $+150^\circ\text{C}$, германиевых лишь от -60°C до $+80^\circ\text{C}$.

Преимуществом германиевых диодов является малое падение напряжения при пропускании прямого тока (0,2 – 0,6 В против 0,8 – 1,2 у кремниевых). Поэтому в выпрямительных устройствах низких напряжений выгоднее применять германиевые диоды, так как их сопротивление в прямом направлении в 1,5...2 раза меньше, чем у кремниевых.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуются наиболее широко распространенные кремниевые и германиевые диоды. Для этого необходимо снять прямую и обратную ветвь вольтамперной характеристики, используя ВАХ, определить статическое и динамическое сопротивления полупроводникового диода.

Для снятия прямой ветви вольтамперной характеристики в данной лабораторной работе используют схему, показанную на рис. 10.6. Для снятия обратной ветви ВАХ диода необходимо изменить полярность питающего напряжения и его значение (рис. 10.7).

Входное напряжение с помощью трансформатора понижается до определенного значения. Для преобразования переменного тока в постоянный используется выпрямительный мост на диодах $VD1 - VD4$. Изменяя положение движка потенциометра R_1 , можно задавать различный ток через исследуемый диод $VD5$. Измеряя напряжение на диоде с помощью вольтметра PV и ток с помощью амперметра PA , построить по точкам прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики.

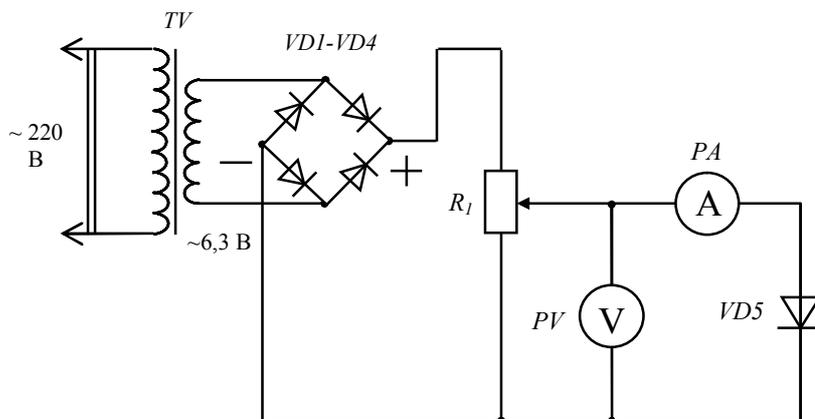


Рис. 10.6. Схема для снятия прямой ветви ВАХ диода

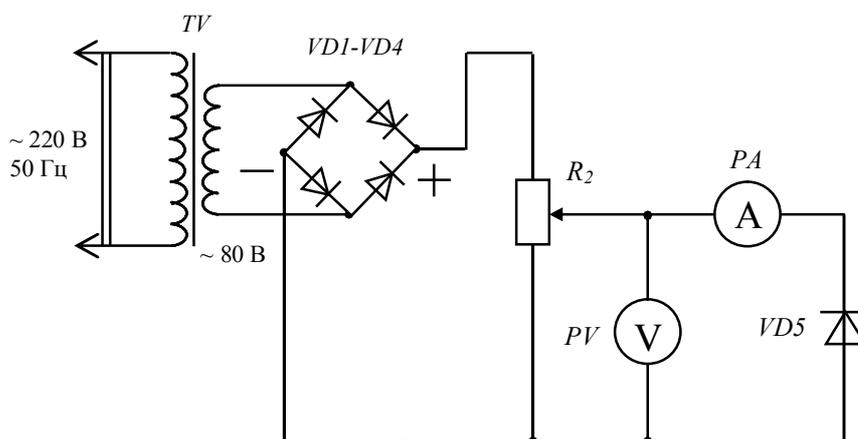


Рис. 10.7. Схема для снятия обратной ветви ВАХ диода

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.

2. Ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда и измерительными приборами.

3. Записать в таблицу 10.1 технические данные измерительных приборов, используемых при выполнении работы.

Таблица 10.1

Сведения об измерительных приборах

	РА	PV
Наименование прибора		
Тип и номер прибора		
Система измерительного механизма (наименование и обозначение)		
Предел измерений		
Класс точности		
Род тока		
Цена деления прибора	(при предельных значениях тока 1,5 А и 0,015 А)	(при предельных значениях напряжения 1,5 В и 75 В)
Абсолютная погрешность измерения		

4. Выписать из справочника основные параметры используемых диодов.

5. Собрать схему электрической цепи по рис. 10.6. В качестве трансформатора используется унифицированный анодно-накальный трансформатор ТАН-17. Реостат $R_1 = 15 \text{ Ом}$. На амперметре РА типа М2051 установить предел измерений 1,5 А, на вольтметре PV типа М2051 установить предел измерений 1,5 В и **представить схему для проверки преподавателю**.

6. Изменяя положение движка резистора R_1 , подать на диоды напряжение от 0 до 0,7 В, при этом снимая показания вольтметра и амперметра. Во избежание выхода диода из строя ток не должен превышать 1,5 А. Данные занести в табл. 10.2.

7. Собрать цепь, показанную на рис. 10.7. Реостат $R_2 = 470 \text{ Ом}$. На амперметре РА типа М2051 установить предел измерений 0,015 А, на вольтметре PV типа М2051 установить предел измерений 75 В и **представить схему для проверки преподавателю**.

8. Изменяя положение движка резистора R_2 , подать на диоды обратное напряжение от 0 до 80 В, при этом снимая показания вольтметра и амперметра. Данные занести в таблицу 10.3.

Таблица 10.2

Экспериментальные данные прямого включения диодов

U_{np} ,	<i>Si</i>								
B	<i>Ge</i>								
I_{np} ,	<i>Si</i>								
A	<i>Ge</i>								

Таблица 10.3

Экспериментальные данные обратного включения диодов

$U_{обр}$, В	<i>Si</i>								
	<i>Ge</i>								
$I_{обр}$, А	<i>Si</i>								
	<i>Ge</i>								

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Используя экспериментальные данные таблиц 10.2 и 10.3, построить вольтамперные характеристики германиевого и кремниевого диодов. Построение ВАХ каждого диода сделать на отдельном рисунке.

2. Из полученных характеристик найти U_{np} при $I_{np} = 0,5$ мА и $U_{обр}$ при $I_{обр} = 0,5$ мА для германиевого и кремниевого диода.

3. Определить статическое и дифференциальное сопротивление диодов в точке, указанной преподавателем.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Какое основное свойство диода на основе p-n перехода?
2. Что такое обедненный слой, потенциальный барьер?
3. Что такое прямое и обратное включение диода? Нарисовать, пользуясь схематическим обозначением диода.
4. При каких условиях открывается кремниевый (германиевый) диод?
5. Нарисовать вольтамперную характеристику диода. Показать на ней прямую и обратную ветвь.
6. Перечислите основные параметры выпрямительных диодов и показать их на вольтамперной характеристике диода.
7. Каким образом можно определить статическое и дифференциальное сопротивление диода?
8. В каких устройствах используются выпрямительные диоды?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучить устройство, принцип действия биполярного транзистора. Приобрести практические навыки в снятии статических характеристик транзистора и определении его параметров.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. СТРУКТУРА И УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРА

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих $p-n$ перехода, образованные в едином кристалле полупроводника. Он широко используется и как усилительный элемент, и как переключающий элемент.

Основным элементом конструкции транзистора является монокристалл полупроводника, в котором сформированы три области с чередующимися p - и n -типами электропроводности. На границе этих областей возникают электронно-дырочные переходы. От каждой области полупроводника сделаны токоотводы (омические контакты, не имеющие контактной разности потенциалов). Другими элементами конструкции являются кристаллодержатель, корпус, выводы.

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают $p-n-p$ транзисторы и $n-p-n$ транзисторы. Структуры этих транзисторов представлены, соответственно, на рис. 11.1.

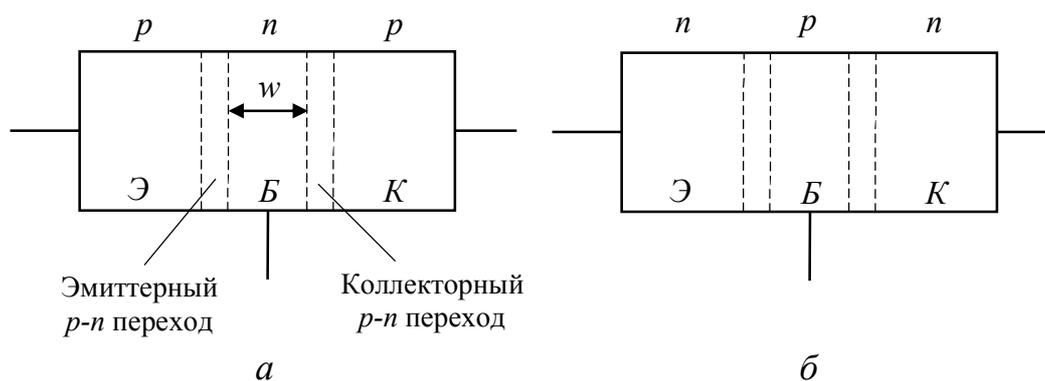


Рис.11.1. Упрощенная структура транзистора:
а – $p-n-p$; б – $n-p-n$; Э – эмиттер; Б – база; К – коллектор

Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют базой (Б). Примыкающие к базе

области обычно делают неодинаковыми. Одну из областей делают так, чтобы из нее наиболее эффективно проходила инжекция носителей заряда в базу, а другую так, чтобы $p-n$ переход между базой и этой областью наилучшим образом собирал инжектированные в базу носители заряда, то есть осуществил экстракцию носителей из базы.

Область транзистора, назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером (Э), а $p-n$ переход между базой и эмиттером – эмиттерным. Область транзистора, назначением которой является собирание, экстракция носителей заряда из базы, называют коллектором (К), а $p-n$ переход между базой и коллектором – коллекторным. Выводы областей транзистора называют аналогично.

На условно-графическом обозначении транзистора (УГО) разная структура транзистора отмечается направлением стрелки эмиттера: у первого типа транзистора ($p-n-p$) она идет к базе, у второго типа ($n-p-n$) – от базы (рис. 11.2). Для более наглядного изображения транзисторы иногда рисуют с кружком (рис. 11.3).

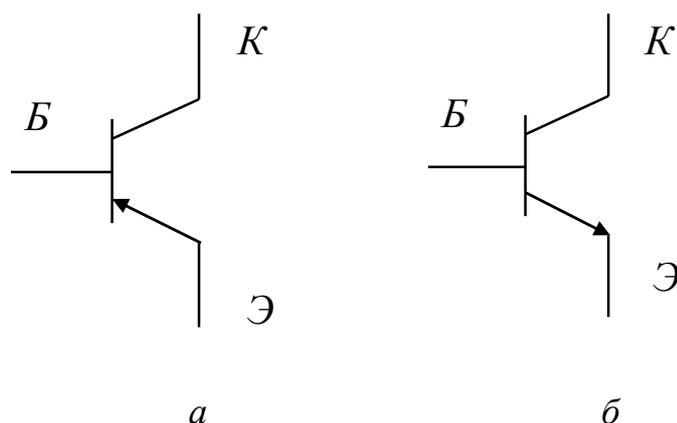


Рис. 11.2. Условно-графическое изображение биполярного $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б) транзистора

Таким образом, биполярный транзистор имеет два взаимодействующих $p-n$ перехода и три вывода: база (Б), эмиттер (Э) и коллектор (К).

2.2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Транзистор в схему включают так, что один из его выводов является входным, второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепи, различают следующие схемы включения биполярного транзистора:

- с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 11.3, а);
- общей базой (ОБ) (рис. 11.3, б);

- с общим коллектором (*ОК*) (рис. 11.3, *в*).
Для транзистора *p-n-p* в схемах включения изменяются лишь полярности напряжений и направление токов.

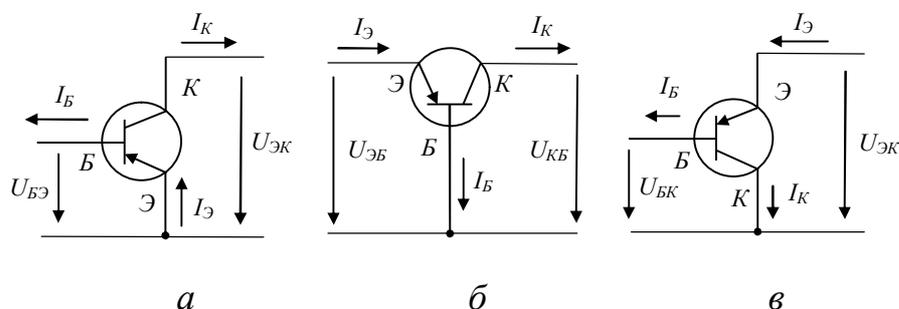


Рис. 11.3. Схемы включения биполярного транзистора

2.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Внешние напряжения двух источников питания $U_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$ подключают к транзистору таким образом, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода П1 в прямом направлении, а коллекторного перехода П2 – в обратном направлении. Такой режим работы транзистора называют активным или усилительным.

Физические процессы, протекающие внутри транзистора, происходят следующим образом.

При включении в цепь эмиттера постоянного напряжения $U_{КЭ}$ в прямом направлении потенциальный барьер эмиттерного перехода понижается. Через эмиттер идет поток основных носителей заряда – электронов. Они создают ток эмиттера I_E (рис. 11.4).

Внешнее напряжение, приложенное к транзистору, оказывается приложенным в основном к переходам П1 и П2, т.к. они имеют большое сопротивление по сравнению с сопротивлением базовой, эмиттерной и коллекторной областей. Поэтому инжектированные в базу электроны перемещаются в ней посредством диффузии. При этом электроны рекомбинируют с дырками базы. Поскольку концентрация носителей в базе значительно меньше, чем в эмиттере, то рекомбинируют очень немногие электроны. При малой толщине базы почти все электроны будут доходить до коллекторного перехода П2. На место рекомбинированных дырок в базу поступают дырки от источника питания $U_{БЭ}$. Дырки, рекомбинировавшие с электронами в базе, создают ток базы I_B .

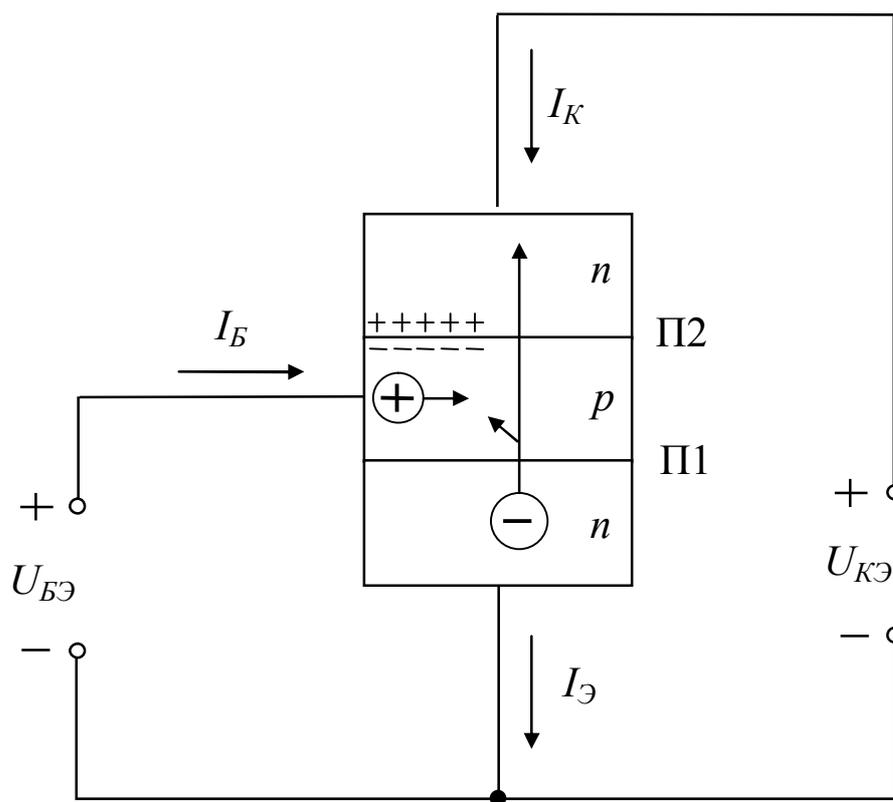


Рис. 11.4. Принцип работы биполярного транзистора

Под воздействием обратного напряжения $U_{КЭ}$ потенциальный барьер коллекторного перехода повышается, а толщина перехода П2 увеличивается. Вошедшие в область коллекторного перехода электроны попадают в ускоряющее поле, созданное на переходе коллекторным напряжением, и втягиваются коллектором, создавая коллекторный ток I_K .

Таким образом, в биполярном транзисторе протекает три вида тока: эмиттера, коллектора и базы.

Полный ток эмиттера $I_Э$ определяется количеством инжектированных эмиттером основных носителей заряда. Основная часть этих носителей заряда, достигая коллектора, создает коллекторный ток I_K . Незначительная часть инжектированных в базу носителей заряда рекомбинируют в базе, создавая ток базы I_B . Следовательно, ток эмиттера разделиться на токи базы и коллектора

$$I_Э = I_B + I_K. \quad (11.1)$$

Это уравнение называется основным уравнением транзистора.

Выходной ток транзистора зависит от входного тока. Поэтому

транзистор – прибор, управляемый током.

Как было отмечено ранее, из-за малости числа «дырок» в базе по сравнению с числом инжектированных электронов

$$I_{\text{Э}} \ll I_{\text{Б}}. \quad (11.2)$$

Из формул (11.1) и (11.2) следует, что

$$I_{\text{Э}} \approx I_{\text{К}}. \quad (11.3)$$

Физические процессы в транзисторе типа *p-n-p* протекают аналогично процессам в транзисторе типа *n-p-n*, только меняется тип основных носителей заряда и полярность приложенного напряжения.

3. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

В любой схеме включения транзистора в каждой из двух цепей (входной и выходной) действует напряжение между двумя электродами и протекает ток: во входной цепи – $U_{\text{ВХ}}$ и $I_{\text{ВХ}}$, в выходной – $U_{\text{ВЫХ}}$ и $I_{\text{ВЫХ}}$. Эти электрические величины определяют режим работы транзистора и взаимно влияют друг на друга. Характеристики транзистора представляют собой зависимость одной из этих величин от другой при неизменной третьей величине. Характеристики, снятые без нагрузки, когда одна из величин поддерживается постоянной, называют статическими.

Для схемы с общим эмиттером (рис. 11.3, а) входной ток – ток базы $I_{\text{Б}}$, выходной – ток коллектора $I_{\text{К}}$, входное напряжение создается между базой и эмиттером $U_{\text{БЭ}}$, а выходное – между коллектором и эмиттером $U_{\text{КЭ}}$. Тогда статические характеристики имеют вид.

1. Входная характеристика: $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}})$ при $U_{\text{КЭ}} = \text{const}$ (рис. 11.5).

Входные характеристики относятся к эмиттерному переходу. Он открыт, и поэтому зависимость $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}})$ похожа на вольтамперную характеристику диода, работающего при прямом включении.

2. Выходная характеристика: $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}})$ при $I_{\text{Б}} = \text{const}$ (рис. 11.6).

Выходные характеристики относятся к коллекторному переходу, находящемуся в закрытом состоянии, поэтому зависимость $I_{\text{К}}(U_{\text{КЭ}})$ при $I_{\text{Б}} = 0$ подобна характеристике диода при обратном напряжении. Если $I_{\text{Б}} > 0$, то выходная характеристика расположена выше, чем при $I_{\text{Б}} = 0$. Увеличение тока базы означает, что увеличилось напряжение $U_{\text{БЭ}}$ (рис. 11.5). Вследствие этого увеличивается ток коллектора $I_{\text{К}}$. Благодаря линейной зависимости $I_{\text{К}}$ и $I_{\text{Б}}$ пологие участки соседних выходных характеристик расположены приблизительно на одинаковых расстояниях друг от друга, если $I_{\text{Б}}$ пропорционально возрастает (рис. 11.6).

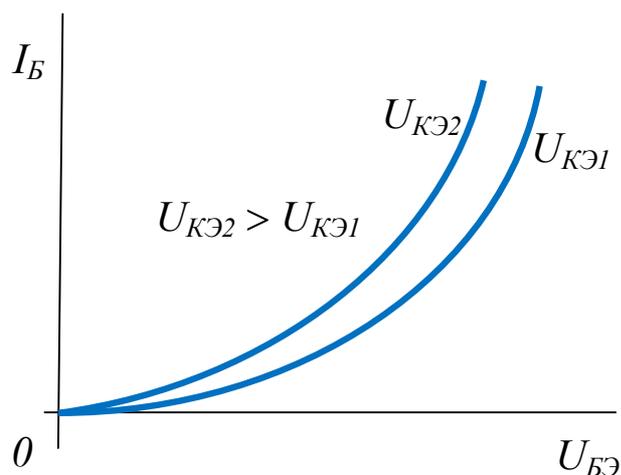


Рис. 11.5. Входная характеристика биполярного транзистора

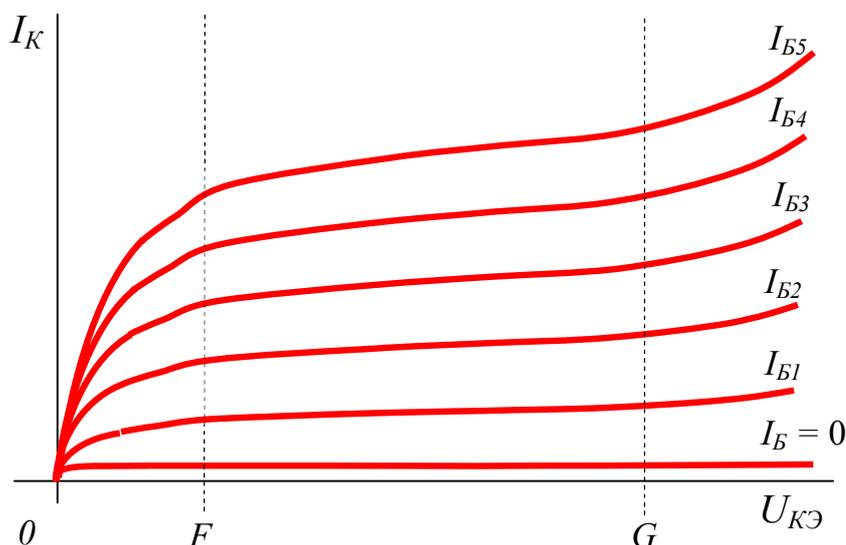


Рис. 11.6. Семейство выходных характеристик транзистора

Существование пологого участка на выходной характеристике (рис. 11.6), где ток коллектора практически не зависит от $U_{КЭ}$ при $I_B = \text{const}$ объясняется просто. Хотя при увеличении $U_{КЭ}$ падение напряжения в области коллекторного перехода возрастает и электроны быстрее достигают коллектора, но через базу может пройти лишь фиксированное их количество (а оно остается постоянным из-за $I_B = \text{const}$), поэтому I_K не изменяется при повышении $U_{КЭ}$.

При очень большом значении $U_{КЭ}$ наступает пробой коллекторного $p-n$ перехода, и транзистор утрачивает свои свойства.

3. Передаточная характеристика: $I_K = f(I_B)$ при $U_{КЭ} = \text{const}$.

Эта зависимость называется также характеристикой управления (рис. 11.7).

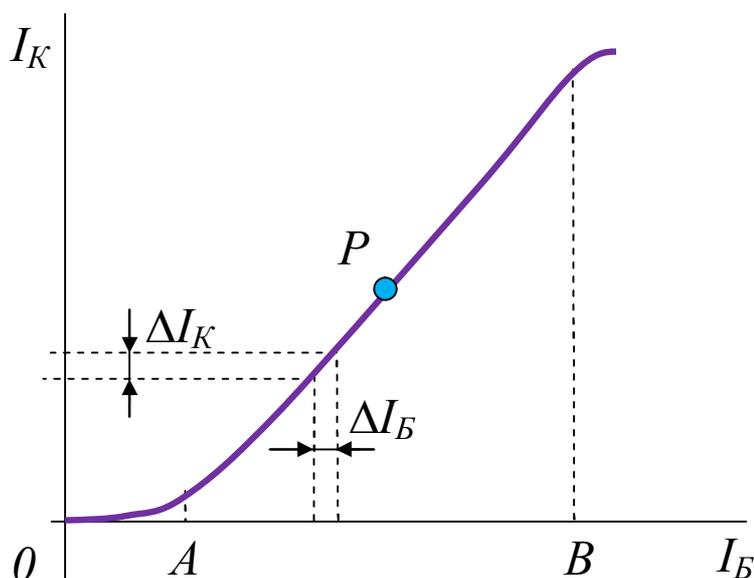


Рис. 11.7. Передаточная характеристика транзистора

Эта характеристика снята при $U_{КЭ}$, лежащим в области FG (рис. 11.6). Кривые, снятые при других значениях $U_{КЭ}$, совпадают с приведенной кривой в связи с независимостью коллекторного тока I_K от $U_{КЭ}$ в области FG .

При $I_B = 0$, $I_{K0} > 0$, но очень мал, так как это ток неосновных носителей заряда, движущихся через коллекторный переход.

Из-за пропорциональности I_K и I_B на графике существует прямолинейный участок AB на кривой управления.

Режим работы транзистора выбирают таким, чтобы точка P (I_B , I_K) находилась примерно на середине прямолинейного участка. При малом изменении базового тока ΔI_B вблизи точки P ток коллектора существенно изменяется

$$\Delta I_K \gg \Delta I_B. \quad (11.4)$$

Величина $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ называется статическим коэффициентом усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером.

Обычно $\beta = 10\text{--}300$, т.е. возможно усилить слабый переменный ток при помощи транзистора в $10\text{--}300$ раз. При этом на базу подают усиленное переменное напряжение, которое вызывает изменение тока базы, а на коллекторе получают во много раз усиленный переменный ток (рис. 11.8).

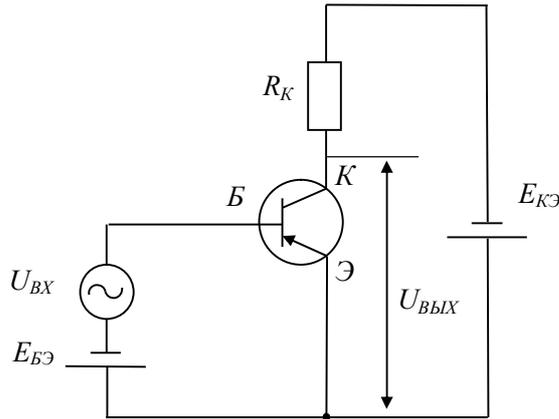


Рис. 11.8. Схема усиления переменного сигнала транзистором

Изменения тока I_B вызывают изменения напряжения эмиттерного перехода, которые полностью передаются в коллекторную цепь и приводят к изменению тока коллектора I_K . А т.к. напряжение источника коллекторного питания $E_{КЭ}$ значительно больше, чем эмиттерного $E_{БЭ}$, то и мощность, потребляемая в цепи коллектора P_K , будет значительно больше мощности в цепи база-эмиттер $P_{БЭ}$. Таким образом, обеспечивается возможность управления большой мощностью в коллекторной цепи транзистора малой мощностью, затрачиваемой в цепи базы, т.е. имеет место усиление мощности.

4. H-ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА

Свойства транзистора можно описать системой h -параметров, с помощью которых можно сравнивать качества транзисторов и рассчитывать электронные схемы.

Указанные h -параметры связывают входные и выходные токи и напряжения и справедливы для активного режима работы транзистора и небольших амплитуд сигналов.

- Входное сопротивление для переменного тока

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{КЭ} = \text{const.} \quad (11.5)$$

- Коэффициент внутренней обратной связи по напряжению

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}}, \text{ при } I_B = \text{const.} \quad (11.6)$$

- Коэффициент усиления по току

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{КЭ} = \text{const.} \quad (11.7)$$

- Выходная проводимость

$$h_{22Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}}, \text{ при } I_B = \text{const.} \quad (11.8)$$

Эти коэффициенты определяются либо экспериментально, либо из входных и выходных характеристик (рис. 11.9).

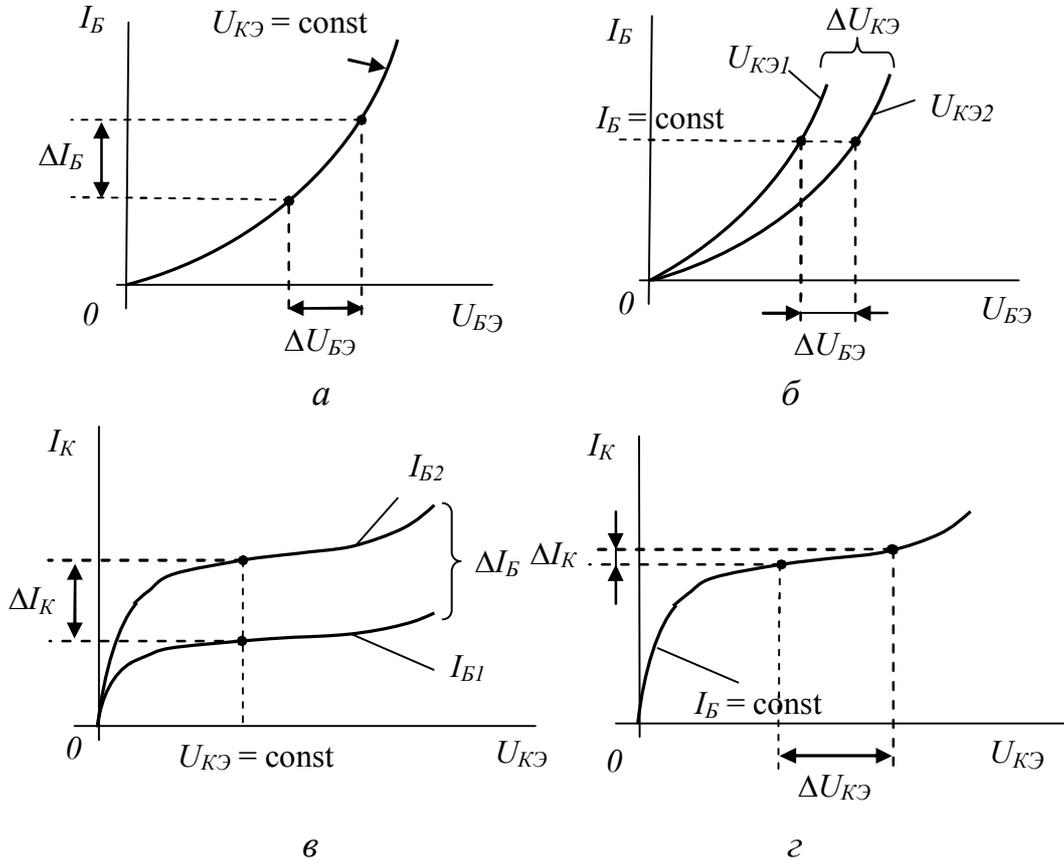


Рис. 11.9. Определение h -параметров по статическим характеристикам транзистора в схеме с ОЭ:
 $a - h_{11Э}$; $б - h_{12Э}$; $в - h_{21Э}$; $г - h_{22Э}$

5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения статических характеристик транзистор включается в электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 11.10.

От стабилизированного источника питания напряжение подается на транзистор VT типа $p-n-p$.

Потенциометр $R1$ регулирует напряжение между базой и эмиттером. Вольтметр PVI и миллиамперметр PAI служат для измерения напряжения и тока в цепи база-эмиттер.

Потенциометр $R2$ регулирует напряжение между коллектором и эмиттером. Вольтметр $PV2$ и миллиамперметр $PA2$ служат для измерения напряжения и тока в цепи коллектора.

Изменяя потенциометром $R1$ напряжение между базой и эмиттером, определяем величину тока базы I_B для различных значений напряжения между коллектором и эмиттером. По данным эксперимента строятся входные статические характеристики.

Изменяя потенциометром $R2$ напряжение между коллектором и эмиттером, определяем величину тока коллектора I_K для различных значений напряжения между базой и эмиттером. По данным эксперимента строятся выходные статические характеристики.

По полученным данным необходимо вычислить h -параметры биполярного транзистора: $h_{11Э}$, $h_{12Э}$, $h_{21Э}$ и $h_{22Э}$.

5.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть, подготовить отчет и получить допуск к выполнению лабораторной работы.
2. В работе исследуется транзистор МП40 (МП41) структуры р-п-р, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Максимально допустимые значения токов и напряжений транзистора даны в табл. 11.1.
3. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами. Данные по измерительным приборам записать в табл. 11.2.

Таблица 11.1

Предельные параметры исследуемого транзистора

№ п/п	Наименование параметра	Величина
1	Наибольшая величина тока коллектора в активном режиме $I_{K \max}$, мА	20
2	Наибольшая величина напряжения между коллектором и базой $U_{KB \max}$, В	15
3	Наибольшая величина напряжения между коллектором и эмиттером $U_{KE \max}$, В	15
4	Наибольшее обратное напряжения между эмиттером и базой $U_{ЭБ \text{обр. max}}$, В	15

Сведения об измерительных приборах

	$PA1$	$PA2$	$PV1$	$PV2$
Наименование прибора				
Тип и номер прибора				
Система измерительного механизма				
Предел измерений				
Класс точности				
Род тока				
Цена деления прибора				
Абсолютная погрешность измерения				

4. Соберите электрическую схему, показанную на рис. 11.10.

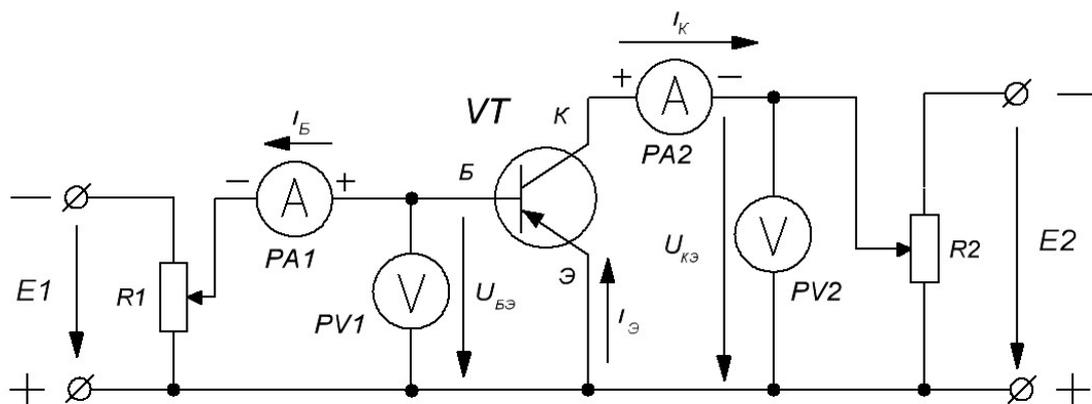


Рис. 11.10. Схема для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

- Поставьте ручки потенциометров R_1 и R_2 в крайнее левое положение.
- Включите блоки питания в сеть.

Снятие входных статических характеристик транзистора

1. Потенциометром R_2 установите напряжение между коллектором и эмиттером 3 В.
2. Потенциометром R_1 изменяйте напряжение между базой и эмиттером транзистора от 0 до 500 мВ через 50 мВ, измерить ток базы I_B для каждого значения напряжения и записать в таблицу 11.3.

Таблица 11.3

Экспериментальные значения $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = const$

№ п/п	$U_{БЭ}$, мВ	I_B , мкА		
		$U_{КЭ} = 3$ В	$U_{КЭ} = 6$ В	$U_{КЭ} = 9$ В
1	0			
2	50			
3	100			
4	150			
5	200			
6	250			
7	300			
8	350			
9	400			
10	450			
11	500			

3. Повторить п. 2, установив напряжение между коллектором и эмиттером 6 В.
4. Повторить п. 2, установив напряжение между коллектором и эмиттером 9 В.

Снятие выходных статических характеристик транзистора

1. С помощью потенциометра R_1 установить ток базы 40 мкА (для транзистора типа МП40).
2. Изменяя потенциометром R_2 напряжение между коллектором и эмиттером от 0 до 16 В через 2 В, измерить ток, протекающий в цепи коллектора. Показания приборов записать в табл. 11.4.

3. Повторить п. 2, установив ток базы 80 мкА.
4. Повторить п. 2, установив ток базы 120 мкА.
5. Закончив работу, выключите напряжение цепи и разберите цепь.

Таблица 11.4

Экспериментальные значения $I_K = f(U_{KЭ})$ при $I_B = const$

№ п/п	$U_{KЭ}$, В	I_K , мА		
		$I_{\bar{o}} = 40$ мкА	$I_{\bar{o}} = 80$ мкА	$I_{\bar{o}} = 120$ мкА
1	0			
2	2			
3	4			
4	6			
5	8			
6	10			
7	12			
8	14			
9	16			

5.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По результатам измерений, занесенных в таблицу 11.3, построить семейство входных характеристик транзистора $I_B = f(U_{BЭ})$ при $U_{KЭ} = const$. Рядом с каждой кривой укажите, для какого значения напряжения коллектора она построена.

2. По результатам измерений, занесенных в табл. 11.4, построить семейство выходных характеристик транзистора $I_K = f(U_{KЭ})$ при $I_B = const$. Рядом с каждой кривой укажите, для какого значения тока коллектора она построена.

3. Используя характеристики транзистора, определить параметры $h_{11Э}$, $h_{12Э}$, $h_{21Э}$ и $h_{22Э}$.

4. Сделайте выводы о проделанной работе.

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что представляет собой биполярный транзистор?
2. Как транзистор обозначается на электрических схемах?
3. Какие существуют схемы включения транзистора? Начертите их.
4. Объясните принцип работы биполярного транзистора.
5. Дайте определение и нарисуйте входные и выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером.
6. Что такое коэффициент усиления по току и как он определяется?
7. Дайте определение h -параметров транзистора и способ их определения по статическим характеристикам.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИОДНОГО ТИРИСТОРА

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Изучить принцип действия тиристора.
2. Снять статические вольтамперные характеристики цепи управления и анодной цепи тиристора.
3. Провести разные способы запираания тиристора.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Тиристор – это полупроводниковый прибор с тремя (или более) p - n переходами, обладающий двумя устойчивыми состояниями: *открытом (рабочим) и закрытом*.

В зависимости от конструктивных особенностей и свойств тиристоры делят на диодные и триодные. Диодные тиристоры имеют два вывода (электрода), а триодные тиристоры имеют три вывода. Диодные тиристоры также называют динисторами, а триодные – тринисторами (или просто – тиристорами).

Тиристор представляет собой четырехслойную структуру полупроводников p и n - типов проводимости (рис. 12.1).

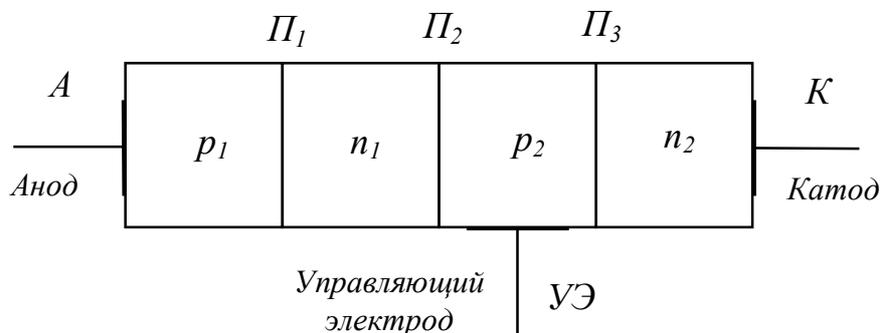


Рис.12.1. Структура триодного тиристора

Вывод от крайней области p_1 называют а н о д о м, вывод от крайней области n_2 называют к а т о д о м, а вывод от одной из промежуточных областей (n_1 или p_2) называют управляющим электродом. $П_1, П_2, П_3$ – p - n переходы (рис. 12.1).

В зависимости, от какой промежуточной области тиристора сделан вывод управляющего электрода, различают тиристоры с анодным и с катодным управлением. На рисунке 12.2 показаны условно-графические изображения тиристора с анодным управлением (а) и с катодным управлением (б).

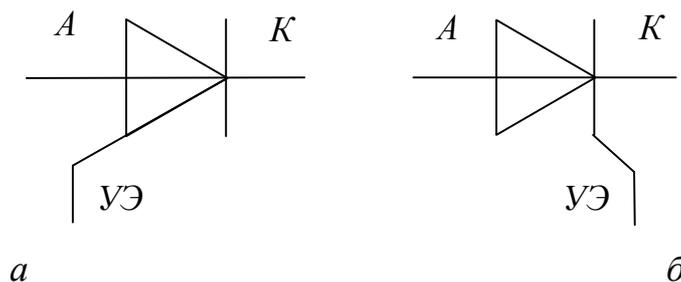


Рис. 12.2. Условно-графическое изображение тиристора:
а – с анодным управлением; *б* – с катодным управлением

Тиристор включается в схему последовательно с нагрузкой R_H . На рис. 12.3 показана схема включения триодного тиристора с катодным управлением.

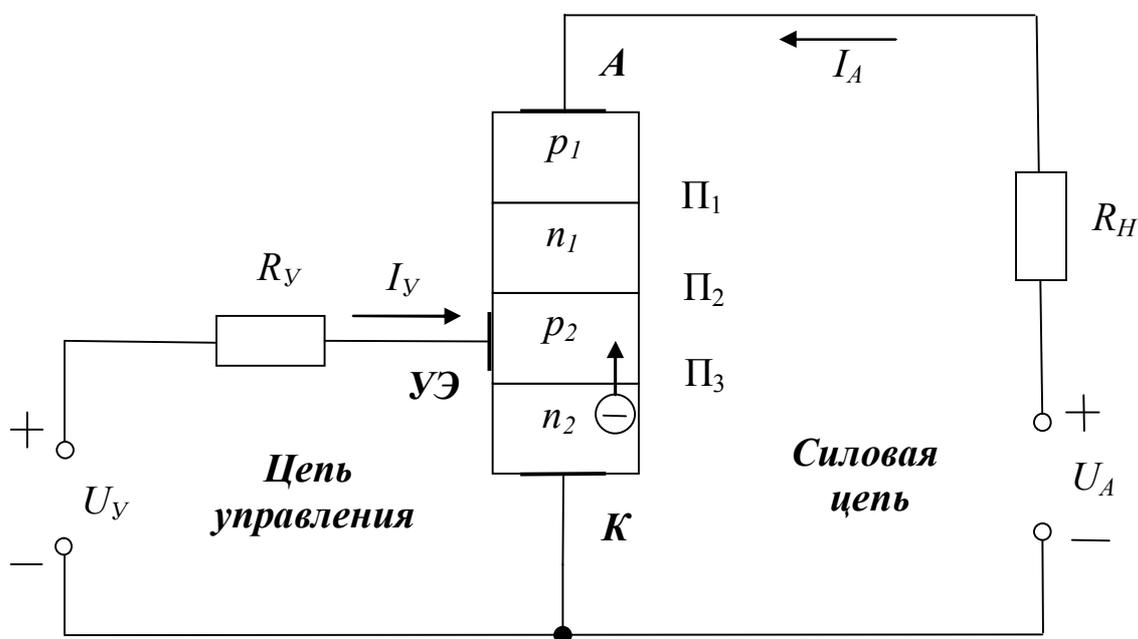


Рис. 12.3. Схема включения тиристора с катодным управлением

Если на анод тиристора подать положительный потенциал относительно катода, то p - n переходы Π_1 и Π_3 будут смещены в прямом направлении, а p - n переход Π_2 – в обратном. Сопротивление этого p - n перехода большое. Поэтому большая часть напряжения U_A будет приложена к переходу Π_2 и анодный ток тиристора представляет собой малый обратный ток этого перехода. Сопротивление прибора в целом большое, ток, текущий через тиристор, очень мал. В этом случае говорят, что тиристор находится в закрытом состоянии.

Если между управляющим электродом и катодом пропустить не-

большой ток управления I_Y , то в зависимости от величины этого тока произойдет переключение тиристора из закрытого в открытое состояние. Сопротивление тиристора в открытом состоянии небольшое (менее одного Ома) и ток, текущий через тиристор, будет определяться в основном сопротивлением нагрузки R_H .

Напряжение U_A , при котором тиристор переключается в проводящее состояние, при определенном напряжении (токе) на управляющем электроде U_Y (I_Y) называют напряжением включения $U_{вкл}$ или напряжением переключения $U_{пер.}$ тиристора.

Тиристор может находиться во включенном состоянии неограниченно долго, пока существуют условия для протекания в его основной цепи достаточного анодного тока, т.е. включенное состояние тиристора является устойчивым.

Наличие двух устойчивых состояний тиристора (открытое и закрытое), позволяет использовать его в качестве переключателя в различных схемах автоматики и вычислительной техники.

Меняя напряжение U_Y , подаваемое на управляющий электрод, а значит, и ток управления I_Y , можно изменять напряжение переключения $U_{пер.}$ тиристора. Чем меньше ток управления, тем меньше значение напряжения переключения. И если в цепи управления создать ток управления срабатывания $I_{Yспр.}$, то тиристор откроется сразу, как если бы это был обычный диод.

Вольтамперная характеристика тиристора, представленная на рис. 12.4, показывает, что с увеличением тока управления I_Y уменьшается напряжение включения $U_{пер.}$ тиристора.

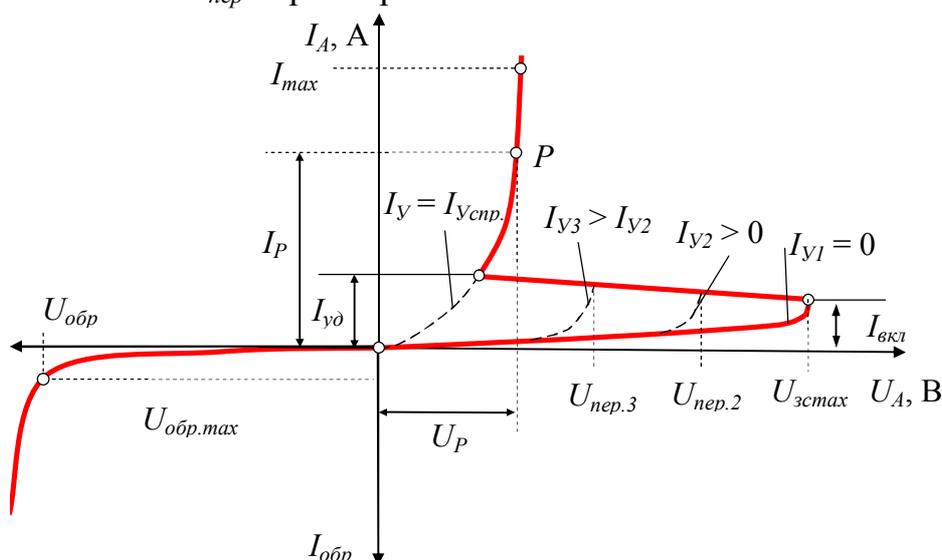


Рис. 12.4. Вольтамперная характеристика тиристора

При отрицательном потенциале на аноде относительно катода тиристор при любых условиях на управляющем электроде открыться не может, т.к. p - n переходы Π_1 и Π_3 смещены в обратном направлении, поэтому обратная ветвь вольтамперной характеристики тиристора такая же, как и у обычного диода.

Таким образом, тиристоры представляют собой электронный ключ, который может находиться в открытом или закрытом состоянии. В открытом состоянии тиристоры хорошо проводят электрический ток, а в закрытом состоянии они представляют большое сопротивление для электрического тока, протекающего через тиристор.

Работу тиристора, механизм включения и выключения обычно рассматривают на примере двухтранзисторной модели тиристора.

Структуру тиристора на рис. 12.1 можно изобразить в виде двух транзисторов разной электропроводности, соединенных между собой так, как показано на схеме рис. 12.5.

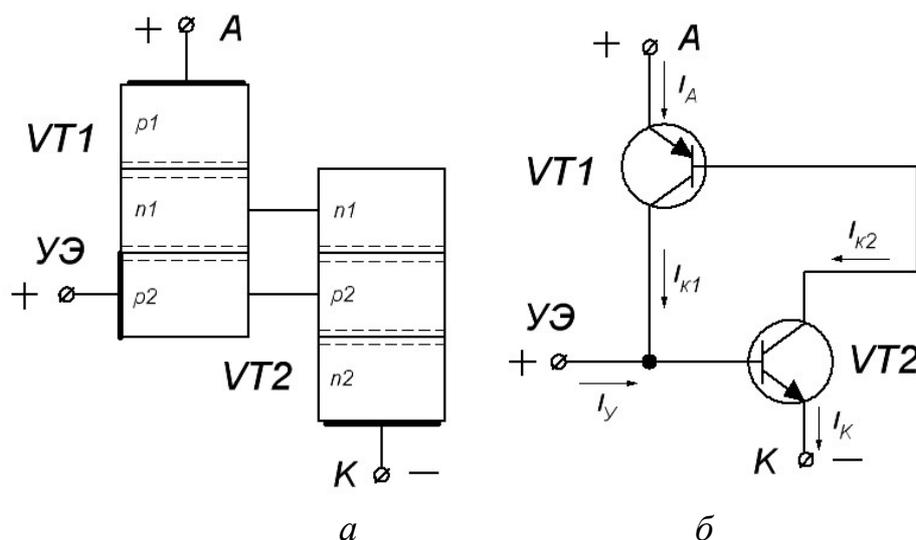


Рис. 12.5. Структура (а) и схема (б) двухтранзисторной модели тиристора

Коллекторный ток $I_{к2}$ транзистора $VT2$ является базовым током транзистора $VT1$, и, наоборот, коллекторный ток $I_{к1}$ транзистора $VT1$ является базовым током транзистора $VT2$. В такой схеме возникает внутренняя обратная связь, которая после включения тиристора делает цепь управления неэффективной, так как оба транзистора поддерживают друг друга в открытом состоянии и без цепи управления, т.е. закрыть тиристор по цепи управления невозможно. Поэтому он называется однооперационным тиристором или в зарубежной терминологии *SCR (Silicon Controlled Rectifier)*. Для запираания тиристора

необходимо каким-либо способом снизить анодный ток до нуля и удерживать его на нулевом уровне в течение времени рассасывания неосновных носителей, накопившихся в базах транзисторов $VT1$ и $VT2$.

Таким образом, после включения тиристора управляющий электрод теряет свое управляющее свойство. С помощью управляющего электрода выключить тиристор нельзя. Выключить тиристор можно:

- понижением анодного тока ниже тока удержания $I_{уд}$;
- снижением анодного напряжения U_A до нуля;
- подачей на тиристор обратного напряжения.

Основными параметрами тиристора являются:

- 1) напряжение переключения $U_{прк}$, при котором тиристор переключается в проводящее состояние;
- 2) напряжение в открытом состоянии U_{oc} – падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии ($U_{oc} = 1 \div 3$ В).
- 3) максимальное постоянное напряжение в закрытом состоянии $U_{зс.маx}$ – максимальное значение прямого напряжения, при котором не происходит включения тиристора (единицы – сотни В);
- 4) максимальный прямой ток в открытом состоянии – $I_{маx}$;
- 5) ток удержания $I_{уд}$ – наименьший рабочий ток, необходимый для поддержания прибора в открытом состоянии;
- 6) максимально допустимое обратное напряжение – $U_{обр.маx}$;
- 7) максимальная рассеиваемая мощность в открытом состоянии $P_{маx}$.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуется триодный тиристор с катодным управлением (рис. 12.6).

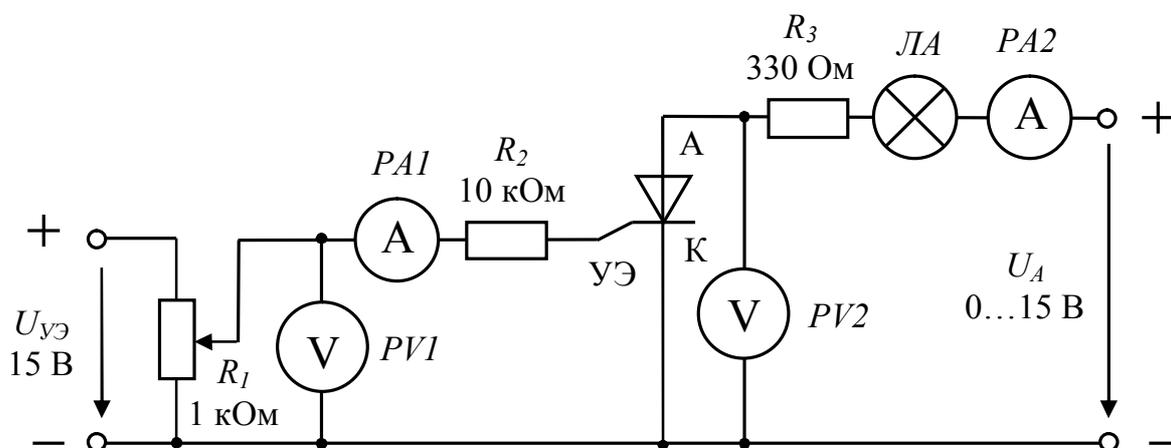


Рис. 12.6. Электрическая схема исследования тиристора

Напряжение и ток в цепи управления тиристора измеряют с помощью вольтметра *PV1* и амперметра *PA1*. Напряжение и ток в силовой цепи тиристора (цепь анод-катод) измеряют с помощью вольтметра *PV2* и амперметра *PA2*.

Изменяя ток и напряжение в цепи управления и силовой цепи тиристора, необходимо снять вольтамперные характеристики этих цепей. Момент переключения тиристора в проводящее состояние фиксируется с помощью лампочки *ЛА* или по показаниям амперметра *PA2*. Также необходимо исследовать различные способы выключения тиристора.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Соберите цепь, как показано на рис. 12.6 и представьте для проверки преподавателю.

2. Мультиметр *PA1* в цепи управления тиристора включите на предел измерений 2 мА. Мультиметр *PA2* в силовой цепи (цепи анод-катод тиристора) на предел измерений 200 мА. Мультиметр *PV1* (для измерения напряжения на управляющем электроде тиристора) включите на предел измерений 20 В.

3.2.1. СНЯТИЕ ПРЯМОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРА

1. Подайте на цепь анод/катод максимальное напряжение $U_A = 15$ В.

2. В цепи управления с помощью сопротивления R_1 установите напряжение $U_y = 0$ В.

3. Увеличивайте с помощью переменного сопротивления R_1 напряжение U_y , и измеряйте соответствующие значения тока управления I_y мультиметром *PA1*. Занесите данные измерений в таблицу 12.1. Заметьте и запишите, при каком напряжении и токе открывается тиристор (загорается лампочка).

Таблица 12.1

Напряжение и ток в цепи управления тиристора

$U_y, \text{ В}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$I_y, \text{ мА}$												

3.2.2. СНЯТИЕ ПРЯМОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЙ ЦЕПИ ТИРИСТОРА

1. Изменяйте величину напряжения U_A от 0 до 15 В (8 ÷ 10 точек), и снимайте показания амперметра $PA2$ и вольтметра $PV2$ в цепи анод-катод тиристора. Занесите данные измерений в таблицу 12.2.

2. Замкните электрическую цепь управляющего электрода. Установите с помощью потенциометра R_I ток в цепи управления электрода I_{y1} и снимите прямую ветвь вольтамперной характеристики тиристора. Результаты измерений занести в таблицу 12.2. Обратите особое внимание на момент включения тиристора. Запишите, при каком напряжении открывается тиристор.

3. Установите с помощью потенциометра R_I ток в цепи управления электрода I_{y2} и повторите операцию п.2. Результаты измерений записать в табл. 12.2. Запишите, при каком напряжении открывается тиристор.

Таблица 12.2

Напряжение и ток в силовой цепи тиристора

$I_{y1} =$										
$U_{пр.}, В$										
$I_{пр.}, мА$										
$I_{y2} =$										
$U_{пр.}, В$										
$I_{пр.}, мА$										

3.2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВЫКЛЮЧЕНИЯ ТИРИСТОРА

Убедитесь, что для запираания тиристора необходимо:

- разорвать цепь питания анод-катод тиристора;
- кратковременно зашунтировать тиристор;
- снизить ток в рабочей цепи до значения меньше тока удержания.

Для этого проделайте следующие эксперименты.

1. Снижение напряжения в цепи управления тиристора до нуля не приводит к выключению тиристора:

- а) подайте напряжение на цепь анод-катод тиристор $U_A = 15 В$;

б) увеличивая с помощью переменного сопротивления R_I напряжение в цепи управления тиристора U_Y , переведите тиристор в открытое состояние (загорается лампочка);

в) отключите источник питания цепи управления U_Y . Что при этом произошло? Запирается ли открытый тиристор, когда отключается напряжение цепи управления?

2. Для запираания тиристора необходимо *разорвать цепь питания анод-катод тиристора*:

а) подайте напряжение на цепь анод-катод тиристор $U_A = 15$ В;

б) увеличивая с помощью переменного сопротивления R_I напряжение в цепи управления тиристора U_Y , переведите тиристор в открытое состояние (загорается лампочка);

в) выключите напряжение в цепи анод-катод тиристора (опыт проведите при разном напряжении в цепи управления тиристора). Что при этом происходит? Ответ запишите.

3. Для запираания тиристора необходимо *кратковременно зашунтировать тиристор*:

а) подайте напряжение на цепь анод-катод тиристор $U_A = 15$ В;

б) увеличивая с помощью переменного сопротивления R_I напряжение в цепи управления тиристора U_Y , переведите тиристор в открытое состояние (загорается лампочка);

в) при включенном тиристоре (горит лампочка) с помощью потенциометра R_1 установите напряжение в цепи управления $U_Y = 0$ В. С помощью соединительного провода зашунтируйте тиристор (кратковременно соедините между собой анод и катод тиристора). Что произошло после этого? Опыт проведите при разном напряжении в цепи управления.

4. Для запираания тиристора необходимо *снизить ток в рабочей цепи до значения меньше тока удержания*:

а) подайте напряжение на цепь анод-катод тиристор $U_A = 15$ В;

б) увеличивая с помощью переменного сопротивления R_I напряжение в цепи управления тиристора U_Y , переведите тиристор в открытое состояние (загорается лампочка);

в) при включенном тиристоре (горит лампочка) с помощью потенциометра R_1 установите напряжение в цепи управления $U_Y = 0$ В;

г) предел измерения мультиметра $A2$ переключите на 200 μ А;

д) плавно снижайте напряжение питания в цепи анод-катод тиристора до тех пор, пока ток нагрузки скачком не упадет до нуля (необходимо наблюдать за показаниями мультиметра $A2$). Последнее значение тока перед этим скачком и есть ток удержания $I_{уд}$, запишите его значение.

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По данным таблицы 12.1 постройте график вольтамперной характеристики цепи управление тиристора $I_{np.} = f(U_{np.})$. На графике отметьте напряжение включения $U_{вкл}$ и ток включения $I_{вкл}$ тиристора.

2. По данным таблицы 12.2 постройте график вольтамперной характеристики цепи анод-катод тиристора $I_{np.} = f(U_{np.})$. На графике отметьте напряжение включения $U_{вкл}$ и ток включения $I_{вкл}$ тиристора.

3. Ответьте **письменно** на вопросы.

Вопрос 1: Запирается ли открытый тиристор, когда отключается напряжение цепи управления?

Вопрос 2: Что случится с открытым тиристором при размыкании питания в анодной цепи тиристора (рис. 12.6)?

Вопрос 3: Что произойдет с открытым тиристором при его кратковременном шунтировании переключкой в цепи (рис. 5)?

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Чем отличается динистор от тиристора?
2. Сколько устойчивых состояний имеет тиристор? Чем характеризуются эти состояния?
3. Как изменяется анодное напряжение тиристора при его переключении в открытое состояние и наоборот?
4. Каково назначение управляющего электрода в тринисторе?
5. Сохранится ли открытое состояние тиристора при снятии сигнала управления?
6. Какие основные параметры тиристора?
7. Как выглядит вольтамперная характеристика тиристора?
8. Как можно выключить тиристор?
9. Где применяются динисторы и тиристоры?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ознакомление с устройством и принципом работы полупроводниковых однофазных выпрямителей, экспериментальное исследование их свойств и определение основных параметров.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. СТРУКТУРА И НАЗНАЧЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Для питания радиоэлектронной аппаратуры, устройств автоматики и вычислительной техники требуется постоянное напряжение различных значений. Наиболее распространенным источником электрической энергии является промышленная сеть переменного напряжения частотой 50 Гц. Для преобразования переменного синусоидального напряжения сети в постоянное напряжение применяют выпрямители.

Электрическая схема, предназначенная для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока, называется выпрямителем. Выпрямление переменного тока производится при помощи электрических вентилей (полупроводниковых диодов), обладающих односторонней проводимостью.

Выпрямительное устройство обычно имеет следующую структуру (рис. 13.1).



Рис. 13.1. Структура выпрямителя

Схема любого выпрямителя содержит три основных элемента:

- силовой трансформатор – устройство для понижения или повышения напряжения питающей сети и гальванической развязки сети и нагрузки;
- выпрямительный элемент (вентиль), имеющий одностороннюю проводимость, – для преобразования переменного напряжения в пульсирующее;
- фильтр – для сглаживания пульсирующего напряжения.

Выпрямительное устройство, в зависимости от схемы соединения и

назначения, может быть однофазное и трехфазное, управляемое и неуправляемое.

Для устройств электроники, автоматики, сигнализации, контроля и т.п. требуются небольшие мощности. Поэтому для их питания обычно применяются однофазные выпрямители с диодами малой и средней мощности. Для выпрямления однофазного переменного тока применяются как однополупериодные, так и двухполупериодные схемы выпрямителей.

2.2. ОДНОПОЛУПЕРИОДНОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ

Схема однополупериодного выпрямителя переменного тока приведена на рис.13.2.

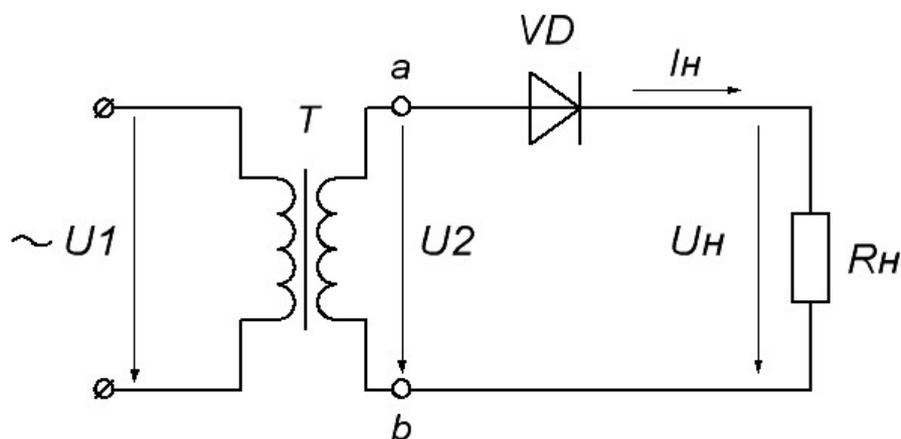


Рис. 13.2. Однополупериодный выпрямитель

На рис. 13.2 обозначены: U_1 – напряжение на первичной обмотке трансформатора; U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора; U_H – напряжение на нагрузке R_H ; i_H – ток, протекающий через нагрузку.

В положительный полупериод переменного напряжения в точке a будет положительный потенциал относительно точки b . Диод VD будет открыт, и через него проходит ток i_H . В результате на нагрузке R_H будет создаваться падение напряжения $U_H = i_H \cdot R_H$, практически равное напряжению U_2 , т.к. диод в проводящем состоянии обладает низким сопротивлением.

Когда начинается отрицательный полупериод, в точке a будет отрицательный потенциал относительно точки b . Диод VD будет закрыт, и через нагрузку ток не протекает, следовательно, $i_H = 0$ и выходное напряжение нулю. Из изложенного ясно, что ток и напряжение на нагрузке является пульсирующими, причем за период T синусои-

дальнего переменного напряжения в нагрузку проходит только одна полуволна.

Таким образом, через диод и нагрузочный резистор при однополупериодном выпрямлении проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полпериода и разделенных промежутком также в полпериода. Поэтому временные диаграммы тока и напряжения на нагрузке выглядят так, как показано на рис. 13.3.

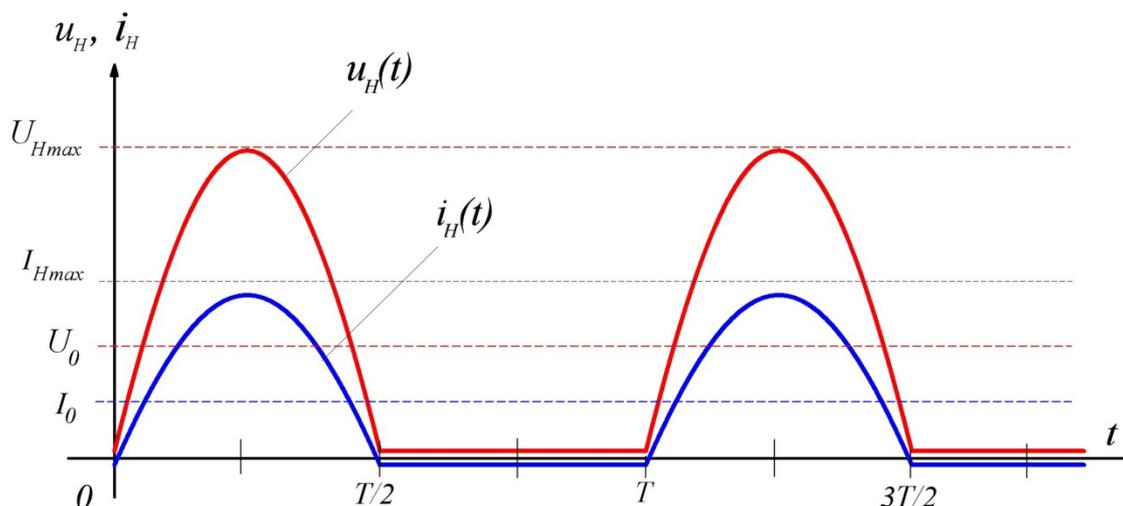


Рис. 13.3. Временные диаграммы напряжения и тока при однополупериодном выпрямлении переменного тока

Величину пульсаций тока или напряжения оценивают коэффициентом пульсаций p – отношение амплитуды первой гармоники тока или напряжения к постоянной составляющей тока или напряжения.

$$p = \frac{I_{1m}}{I_0} = \frac{U_{1m}}{U_0}. \quad (13.1)$$

Из разложения пульсирующего напряжения в ряд Фурье

$$u_n(t) = \frac{2}{\pi} U_m \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos \omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \dots \right) \quad (13.2)$$

следует:

а) среднее значение выпрямленного напряжения U_0 равно

$$U_0 = \frac{U_m}{\pi}; \quad (13.3)$$

б) амплитуда первой гармоники напряжения U_{1m}

$$U_{1m} = \frac{U_m}{2}; \quad (13.4)$$

в) коэффициент пульсаций

$$p = \frac{U_{1m}}{U_0} = \frac{\pi}{2} = 1,57. \quad (13.5)$$

Недостатками однополупериодной схемы выпрямления являются:

- высокий уровень пульсации ($K_{II} \approx 1,57$) выпрямленного напряжения;
- низкий КПД, т.к. выпрямитель работает только на одной (положительной) полуволне переменного напряжения;
- значительно больший, чем в других схемах, вес трансформатора и нерациональное использование в трансформаторе меди и стали.

Данная схема выпрямителя применяется крайне редко и только в тех случаях, когда выпрямитель используется для питания цепей с низким током потребления.

2.3. ДВУХПОЛУПЕРИОДНОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ

Для снижения коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения p и повышения к.п.д. выпрямителя применяются двухполупериодные схемы выпрямления.

Наиболее часто применяется в самых различных устройствах мостовая схема выпрямителя, показанная на рис. 13.4.

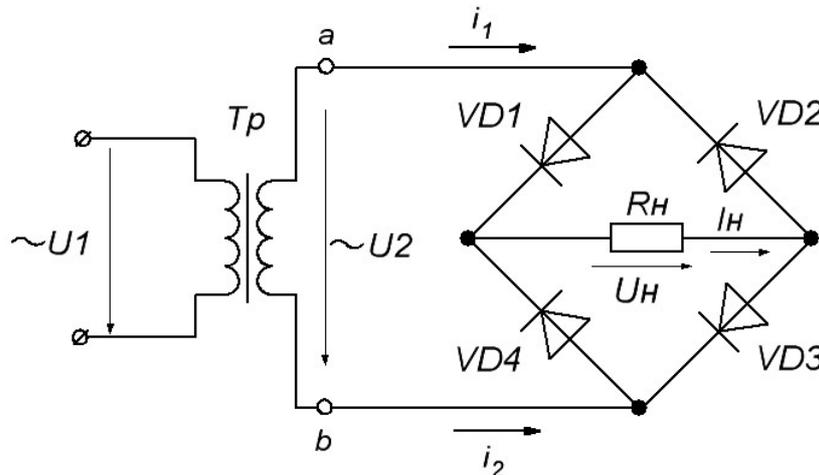


Рис. 13.4. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя

В положительный полупериод точка a имеет положительный потенциал, а точка b – отрицательный. Вследствие этого диоды $VD2$ и $VD4$ будут открыты и по ним протекает ток i_1 , который является и током нагрузки I_H , создавая на нагрузке напряжение U_H . При отрицательном полупериоде потенциал точки a будет отрицательным, а точки b – положительным. Диоды $VD3$ и $VD1$ открываются ($VD2$ и $VD4$ закрываются), что приводит к протеканию тока i_2 , который в нагрузочном сопро-

тивлении R_H имеет такое же направление, что и ток i_l .

Таким образом, в положительный и в отрицательный полупериоды ток через нагрузку имеет одинаковое направление, но изменяется по величине, т.е. пульсирует. Вид выпрямленного напряжения при двухполупериодном выпрямлении представлен на рис. 13.5.

Из графика выпрямленного напряжения (рис. 13.5) видно, что при двухполупериодном выпрямлении частота пульсаций на выходе выпрямителя вдвое превышает частоту входного питающего напряжения, тогда как при однополупериодном выпрямлении частота пульсаций совпадает с частотой питающего напряжения (рис. 13.3).

Из разложения в ряд Фурье напряжения, выпрямленного двухполупериодной схемой

$$u_H(t) = \frac{4}{\pi} U_m \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t - \dots \right), \quad (13.6)$$

вытекает, что по сравнению с однополупериодным выпрямлением:

а) среднее значение выпрямленного напряжения U_0 в два раза больше

$$U_0 = \frac{2U_m}{\pi}; \quad (13.7)$$

б) амплитуда первой гармоники напряжения U_{1m}

$$U_{1m} = \frac{4U_m}{3\pi}; \quad (13.8)$$

в) а коэффициент пульсаций меньше

$$p = \frac{U_{1m}}{U_0} = \frac{2}{3} = 0,67. \quad (13.9)$$

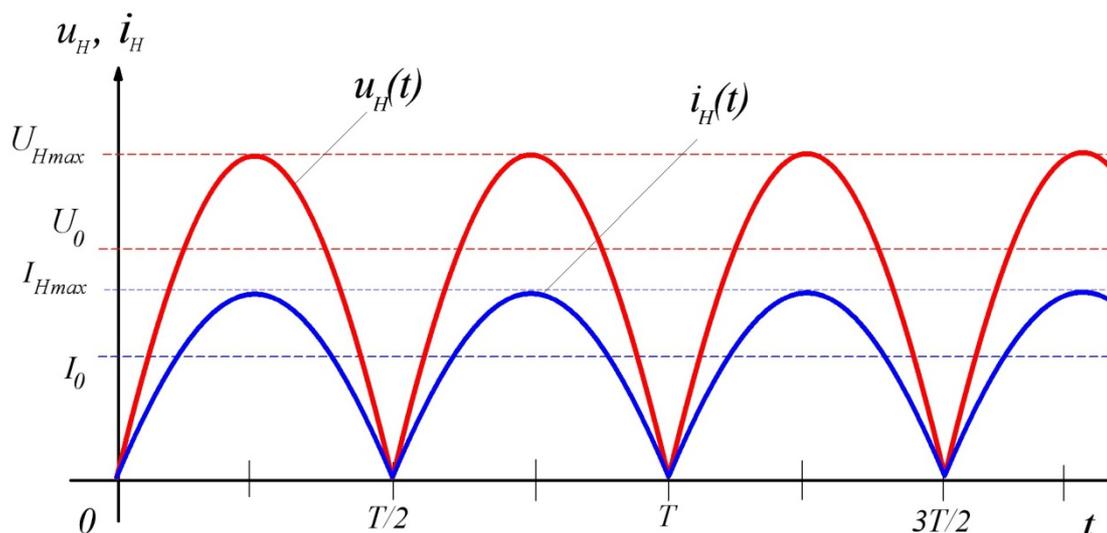


Рис. 13.5. Временные диаграммы напряжения и тока при двухполупериодном выпрямлении переменного тока

В двухполупериодной мостовой схеме (рис. 13.4) ток через нагрузку в оба полупериода протекает в одном направлении, причем ток во вторичной обмотке трансформатора также протекает в течение обоих полупериодов и является синусоидальным, что исключает дополнительное намагничивание сердечника.

Из рисунков 13.3 и 13.5 видно, что пульсации выпрямленного напряжения довольно значительны. Они могут быть уменьшены с помощью сглаживающего фильтра.

Простейшим фильтром является конденсатор, который включается параллельно нагрузке. В положительный полупериод конденсатор заряжается до максимального входного напряжения U_{max} и затем разряжается через нагрузку R_H . Емкость конденсатора выбирают такой величины, чтобы для частоты пульсаций $\omega_{П}$ реактивное сопротивление конденсатора X_C было много меньше сопротивления нагрузки R_H . Тогда постоянная времени разряда цепи $\tau_{раз.} = C_{\phi} \cdot R_H$ значительно больше периода пульсаций, конденсатор разряжается сравнительно медленно и напряжение на нем уменьшается незначительно. Это приводит к увеличению среднего значения выпрямленного напряжения U_0 на нагрузочном резисторе R_H и к снижению коэффициента пульсаций p .

На рис. 13.6 иллюстрируется влияние накопительного конденсатора на форму выходного напряжения однополупериодного выпрямителя. Выходное напряжение содержит значительную по величине постоянную составляющую, на которую наложены малые пульсации напряжения. Амплитуда этих пульсаций определяется постоянной времени $\tau_{раз.}$ для используемого конденсатора C_{ϕ} и нагрузочного резистора R_H . Поэтому конденсатор должен иметь значительную емкость – от 100 до 5000 мкФ (и даже больше).

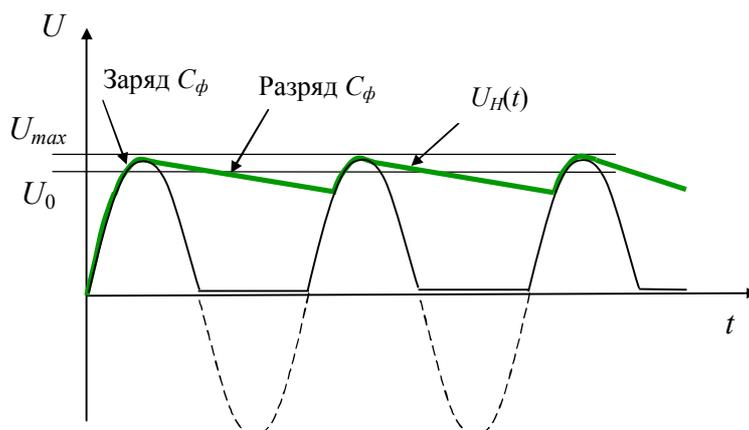


Рис. 13.6. Влияние конденсатора на форму выпрямленного синусоидального напряжения

Эффективность фильтров оценивается коэффициентом сглаживания

$$q = \frac{P_{вх}}{P_{вых}}, \quad (13.10)$$

где $P_{вх}$ и $P_{вых}$ – коэффициенты пульсаций напряжений, соответственно, на входе и выходе фильтра.

2.4. НАПРЯЖЕНИЕ ХОЛОСТОГО ХОДА

Напряжением холостого хода называют величину выходного напряжения выпрямителя при нулевом токе нагрузки, т.е. при отключенной нагрузке. На рис. 13.7 показан однополупериодный выпрямитель без нагрузочного резистора.

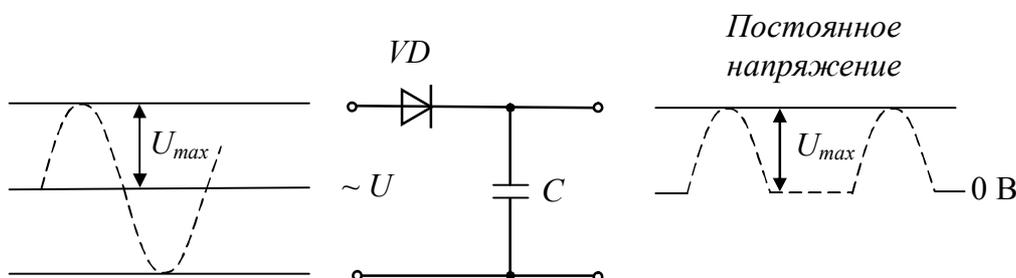


Рис. 13.7. Напряжение холостого хода равно максимальному входному напряжению

Накопительный конденсатор C_f заряжается, как обычно, до максимального значения входного напряжения. Однако, если нагрузка не подключена, этот конденсатор сохраняет свой заряд и обеспечивает тем самым постоянное значение выходного напряжения (равное максимальному входному напряжению) без каких-либо пульсаций. Таким образом, напряжение холостого хода $U_{ХХ}$ – это максимально возможное напряжение источника питания.

2.5. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Увеличение выходного тока выпрямителя приводит к уменьшению его выходного напряжения. Это связано с тем, что выпрямитель имеет свое внутреннее сопротивление, представляющее собой сумму сопротивлений обмотки трансформатора, выпрямительных диодов и резистора или дросселя сглаживающего фильтра.

Рис. 13.8 иллюстрирует изменение напряжения на выходе источника питания при изменении тока нагрузки. Зависимость среднего значения выходного напряжения U_H от среднего значения выходного тока

I_H называется внешней или нагрузочной характеристикой выпрямителя.

Выходное напряжение максимально, когда ток нагрузки равен нулю, т.е. при холостом ходе. Напряжение на выходе источника питания, которое он обеспечивает при установленной полной нагрузке или номинальном (полном) токе нагрузки, называется номинальным выходным напряжением $U_{ном.}$ источника питания.

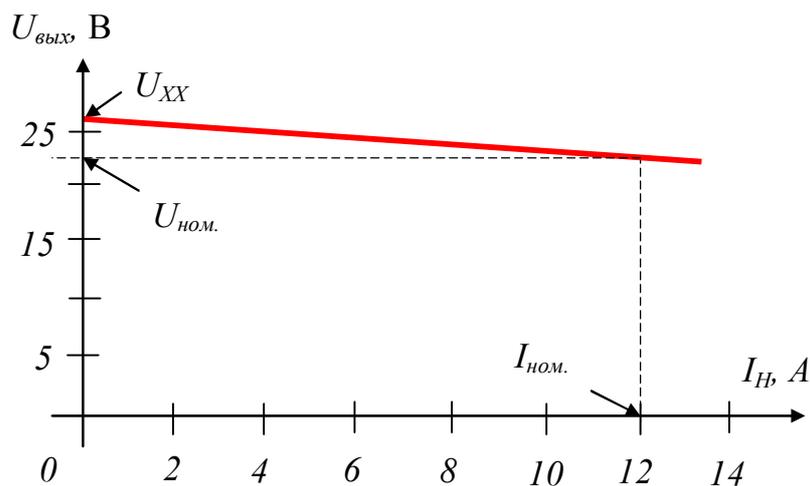


Рис. 13.8. Внешняя характеристика выпрямителя

2.6. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Основными характеристиками выпрямителей являются:

1. Номинальное напряжение постоянного тока U_0 (U_{CP}) – среднее значение выпрямленного напряжения. Обычно указывается напряжение до фильтра U_0 и напряжение после фильтра (или отдельных его звеньев – U). Определяется значением напряжения, необходимым для питаемых выпрямителем устройств.

2. Номинальный выпрямленный ток I_0 – среднее значение выпрямленного тока, т.е. его постоянная составляющая, заданная техническими требованиями. Определяется результирующим током всех цепей, питаемых выпрямителем.

3. Входное напряжение $U_{вх.}$ – напряжение сети переменного тока, питающей выпрямитель. Стандартное значение этого напряжения для бытовой сети – 220 вольт с допускаемыми отклонениями не более 10 %.

4. Пульсация – переменная составляющая напряжения или тока на выходе выпрямителя. Это качественный показатель выпрямителя.

5. Частота пульсаций f – частота наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя. Для самой простой – однополупериодной схемы выпрямителя частота пульсаций равна частоте питающей сети. Двухполупериодные, мостовые схемы и схемы удвоения напряжения дают пульсации, частота которых равна удвоенной частоте питающей сети. Многофазные схемы выпрямления имеют частоту пульсаций, зависящую от схемы выпрямителя и числа фаз.

6. Коэффициент пульсаций p – отношение амплитуды наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя к среднему значению напряжения или тока

$$p = \frac{U_{1m}}{U_0} \cdot 100\%. \quad (13.11)$$

Различают коэффициент пульсаций на входе фильтра (p_0 %) и коэффициент пульсаций на выходе фильтра (p %). Допускаемые значения коэффициента пульсаций на выходе фильтра определяются характером нагрузки.

7. Коэффициент фильтрации (коэффициент сглаживания) – отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра $q = p_{вх} / p_{вых}$. Для многозвенных фильтров коэффициент фильтрации равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной лабораторной работе исследуются однополупериодный и мостовой однофазные выпрямители.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.2.1. ИЗУЧЕНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Соберите схему для исследования однополупериодного выпрямителя, как показано на рис. 13.9, и **предоставьте для проверки преподавателю.**

2. Выключатели $SA1$ и $SA2$ переведите в положение «ВЫКЛ». Переменное напряжение $U_{вх} = 6,3$ В на выпрямитель подайте от источника напряжения БИСЭР.

3. Включите питание стенда.

4. Подключите осциллограф к гнездам $a-b$. Подбирая длительность и чувствительность осциллографа, установить на экране изображение двух-трех периодов сигналов входного напряжения. Зарисовать в масштабе данное изображение в отчет.

5. Подключите осциллограф к гнездам $c-d$. Подбирая длительность и чувствительность осциллографа, установить на экране изображение двух-трех периодов сигналов выходного напряжения. Зарисуйте в масштабе данное изображение в отчет.

6. Присоедините к схеме конденсатор фильтра $C1$. Для этого включите тумблер $SA1$. Зарисуйте в масштабе получившееся изображение на экране осциллографа в отчет.

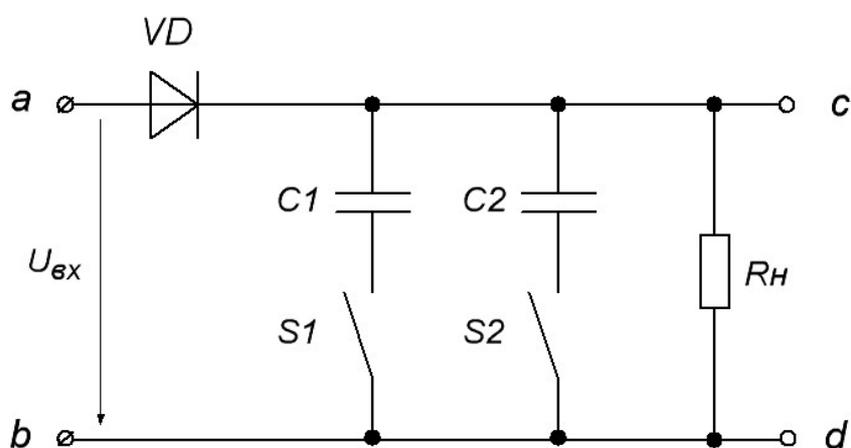


Рис. 13.9. Схема для исследования однополупериодного выпрямителя

7. Присоедините к схеме выпрямителя второй конденсатор фильтра $C2$. Для этого включите тумблер $SA2$. Зарисуйте в масштабе получившееся изображение на экране осциллографа в отчет.

3.2.2. ИЗУЧЕНИЕ ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Соберите схему для исследования двухполупериодного выпрямителя, как показано на рис. 13.10, и **предоставьте для проверки преподавателю.**

2. Выключатели $SA1$ и $SA2$ переведите в положение «ВЫКЛ». Переменное напряжение $U_{вх} = 6,3$ В на выпрямитель подайте от источника напряжения БИСЭР.

3. Подключите осциллограф к гнездам $a-b$. Подбирая длительность и чувствительность осциллографа, установить на экране изображение двух-трех периодов сигналов входного напряжения. Зарисовать в масштабе данное изображение в отчет.

4. Подключите осциллограф к гнездам $c-d$. Подбирая длительность и чувствительность осциллографа, установить на экране изображение двух-трех периодов сигналов выходного напряжения. Зарисовать в масштабе данное изображение в отчет.

5. Присоедините к схеме конденсатор фильтра $C1$ (для этого включите тумблер SA). Зарисуйте в масштабе получившееся изображение на экране осциллографа в отчет.

6. Присоедините к схеме выпрямителя второй конденсатор фильтра $C2$ (для этого включите тумблер $SA2$). Зарисуйте в масштабе получившееся изображение на экране осциллографа в отчет.

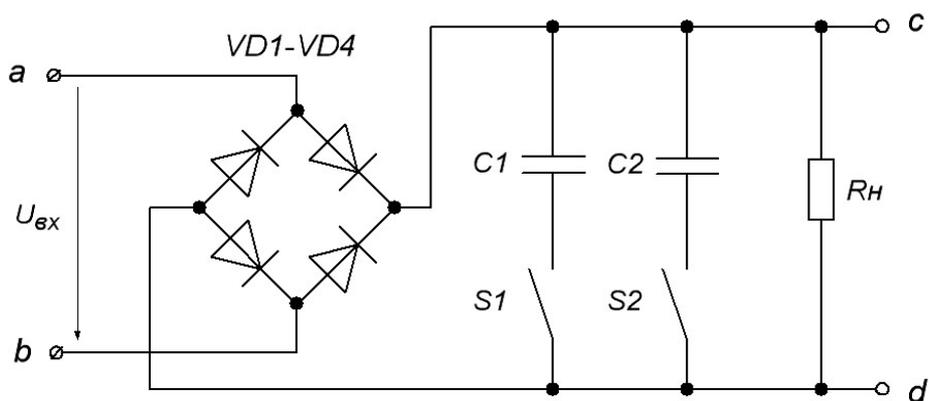


Рис. 13.10. Схема для исследования двухполупериодного выпрямителя

7. Вместо осциллографа в гнезда $c-d$ вставьте измерительные провода вольтметра постоянного тока или мультиметра, включенного на измерение постоянного тока. В гнезда $a-b$ подключите вольтметр переменного тока или мультиметр, включенный на измерение переменного тока. Тумблера $SA1$ и $SA2$ выключить.

8. Временно отключив нагрузку R_H , измерить ток с помощью амперметра PA , измерить с помощью мультиметра переменное напряжение $U_{вх}$ и постоянное напряжение U_H . Результаты измерений записать в отчет.

3.2.3. СНЯТИЕ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Подключить к схеме двухполупериодного выпрямителя переменное нагрузочное сопротивление $R = 470$ Ом, расположенное на передней панели источника питания БИСЭР (рис. 13.11). Сопротивление включить средним и любым из крайних выводов.

2. Изменяя с помощью переменного сопротивления R_H ток от 15 мА до 100 мА, снять показания приборов PA , PV для 8–10 точек. Полученные данные занести в таблицу 13.1.

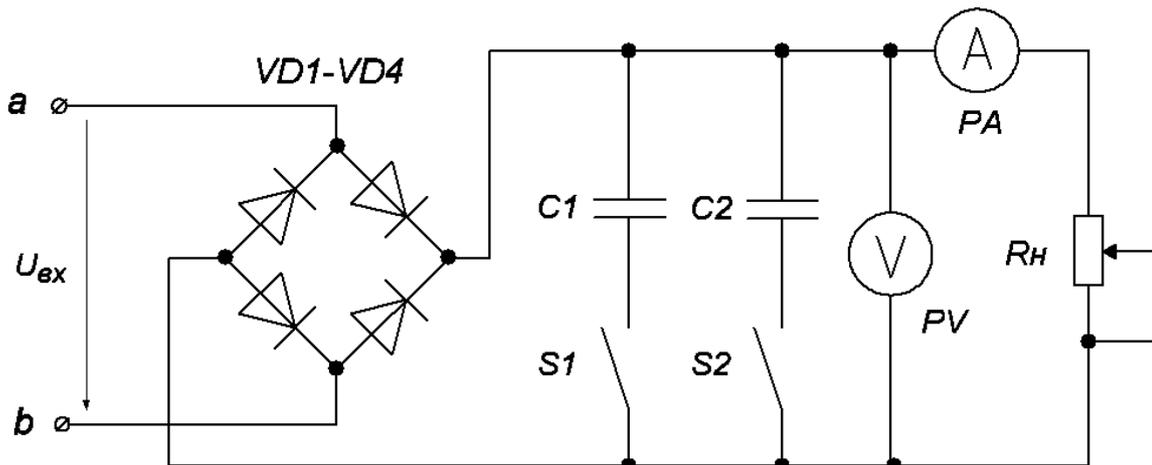


Рис. 13.11. Схема для снятия внешней характеристики выпрямителя

Таблица 13.1

Экспериментальные данные для построения внешней характеристики двухполупериодного выпрямителя

№ п/п	I_H, A	U_H, B	$K_{П}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. На полученных осциллограммах определить амплитуду пульсаций U_{max} , пульсации напряжения ΔU , период T и частоту f пульсирующего напряжения.

2. Рассчитать коэффициент пульсаций p двухполупериодного выпрямителя по формуле

$$p = \frac{U_{\approx}}{U_{=}} = \frac{U_{ex}}{U_H}. \quad (13.12)$$

3. По данным таблицы 13.1. построить:

а) внешнюю характеристику генератора $U_H = f(I_H)$;

б) зависимость $K_{II} = f(I_H)$.

4. Сделайте вывод о значении фильтра для получения постоянного напряжения и о влиянии величины емкости конденсатора фильтра на величину пульсаций выпрямленного напряжения.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое выпрямитель? Для чего они применяются?
2. Объяснить принцип работы одно- и двухполупериодных выпрямителей.
3. Сравнить преимущества и недостатки одно- и двухполупериодных выпрямителей.
4. Как находится коэффициент пульсаций в выпрямителях? Его физический смысл.
5. Дать определение внешней (нагрузочной) характеристики выпрямителя.
6. Почему при увеличении тока нагрузки уменьшается выходное напряжение?
7. Какие существуют схемы выпрямителей? Приведите классификацию выпрямителей.
8. Назовите основные параметры выпрямителей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ознакомиться с устройством и принципом работы параметрического стабилизатора напряжения, экспериментально исследовать его свойства:

- 1) исследовать зависимость выходного напряжения и тока стабилизатора от входного напряжения в цепи параметрического стабилизатора напряжения;
- 2) исследовать влияние тока нагрузки на величину тока стабилизатора;
- 3) исследовать стабилизирующее действие стабилизатора в случае выпрямленного напряжения с заметными пульсациями;
- 4) определить основные параметры стабилизатора.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Постоянное напряжение, получаемое с выхода выпрямителя, вследствие нестабильности входного переменного напряжения или изменения сопротивления нагрузки, может значительно изменять свою величину. Однако для нормальной работы электроаппаратуры необходимо, чтобы величина напряжения питания была достаточно стабильной. Такое требование достигается включением на выходе выпрямителя стабилизатора напряжения – электронного устройства, предназначенного для поддержания неизменным напряжения на нагрузке.

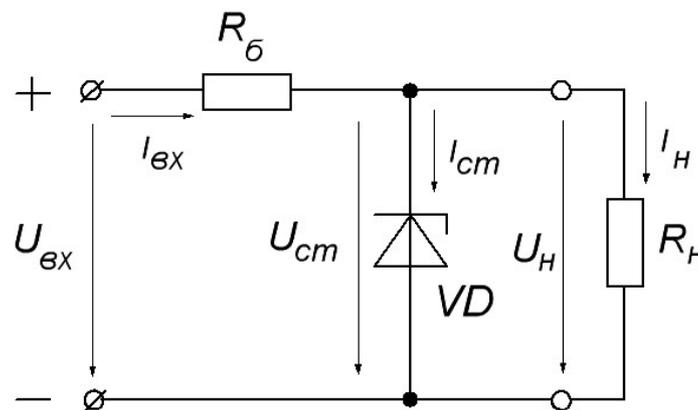


Рис. 14.1. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Наиболее простым и вместе с тем весьма распространенным типом стабилизатора является параметрический стабилизатор

напряжения на полупроводниковом стабилитроне (рис. 14.1).

Схема такого стабилизатора представляет собой делитель напряжения, состоящий из резистора R_{δ} и стабилитрона VD . Нагрузка R_n включается параллельно стабилитрону.

Основным свойством стабилитрона является наличие на обратной ветви вольтамперной характеристики участка, на котором напряжение практически не зависит от тока.

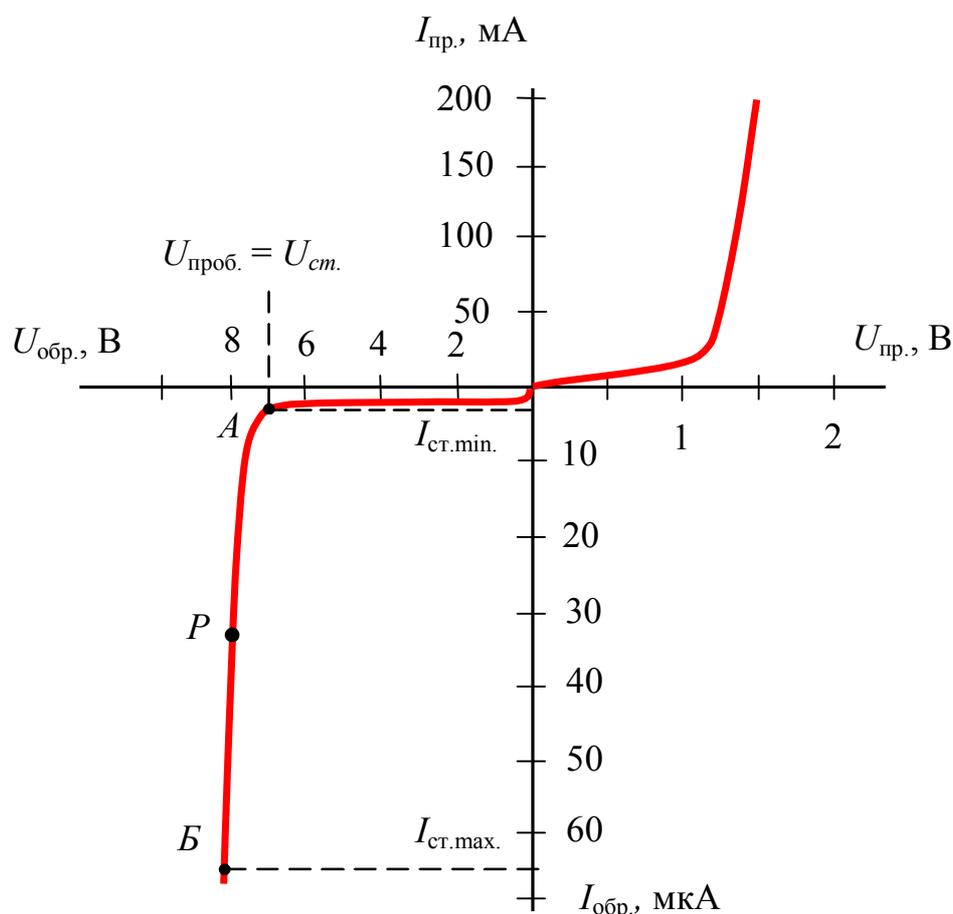


Рис. 14.2. Вольтамперная характеристика стабилитрона

Из вольтамперной характеристики стабилитрона (рис. 14.2) видно, что при обратных напряжениях, меньших чем $U_{ст.}$, ток через стабилитрон практически не протекает. При напряжении, равном $U_{ст.}$, стабилитрон открывается и через него начинает протекать электрический ток. При включении стабилитрона на прямое напряжение он работает как обыкновенный диод. В стабилитроне используется только обратная ветвь характеристики. Участок AB , ограниченный минимальным и максимальным током стабилизации, называется рабочим участком стабилитрона. Свойства стабилитронов делают их пригодными для стабилизации и ограничения напряжений.

Чтобы избежать перегрузки, последовательно со стабилитроном включают балластный резистор R_{δ} . Величина его определяется следующим образом:

$$R_{\delta} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{см}}}{I_{\text{см}} + I_{\text{н}}}, \quad (14.1)$$

где $U_{\text{вх}}$ – приложенное рабочее напряжение;
 $U_{\text{см}}$ – напряжение стабилизации стабилитрона;
 $I_{\text{см}}$ – допустимый ток стабилизации;
 $I_{\text{н}}$ – ток в резисторе нагрузки $R_{\text{н}}$.

Принцип действия параметрического стабилизатора основан на изменении параметров нелинейного элемента (стабилитрона), которое заключается в том, что в пределах некоторого участка вольтамперной характеристики стабилитрона напряжение на нем не зависит от тока.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{см}} + I_{\text{вх}} \cdot R_{\delta}. \quad (14.2)$$

При изменении входного напряжения $U_{\text{вх}}$ напряжение на стабилитроне $U_{\text{см}}$ и, следовательно, на нагрузке изменяться почти не будет. Пояснить это можно следующим образом. Предположим, что напряжение $U_{\text{вх}}$ несколько увеличилось (линия нагрузки I перейдет в линию нагрузки 2). В соответствии с ходом вольтамперной характеристики стабилитрона увеличение $U_{\text{см}}$ вызовет резкое увеличение $I_{\text{см}}$, а следовательно, и увеличение падения напряжения на сопротивлении R_{δ} . Напряжение же на стабилитроне остается почти без изменения (рис. 14.3)

$$U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{см}} + I_{\text{см}} \cdot R_{\delta} + \Delta I_{\text{см}} \cdot R_{\delta}. \quad (14.3)$$

Таким образом, практически все приращение входного напряжения оказывается приложенным к балластному сопротивлению R_{δ} .

Основным преимуществом параметрических стабилизаторов является простота конструкции и высокая надежность работы. Недостатком – сравнительно низкий коэффициент стабилизации и ограниченные значения тока нагрузки.

Основными параметрами стабилизаторов напряжения являются следующие:

- коэффициент стабилизации по входному напряжению

$$k_{\text{см}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}}; \quad (14.4)$$

- выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{н}}}; \quad (14.5)$$

- коэффициент полезного действия стабилизатора η_{cm} – это отношение мощности, отдаваемой в нагрузку P_n , к мощности, потребляемой от входного источника напряжения P_{ex}

$$\eta_{cm} = \frac{P_n}{P_{ex}}. \quad (14.6)$$

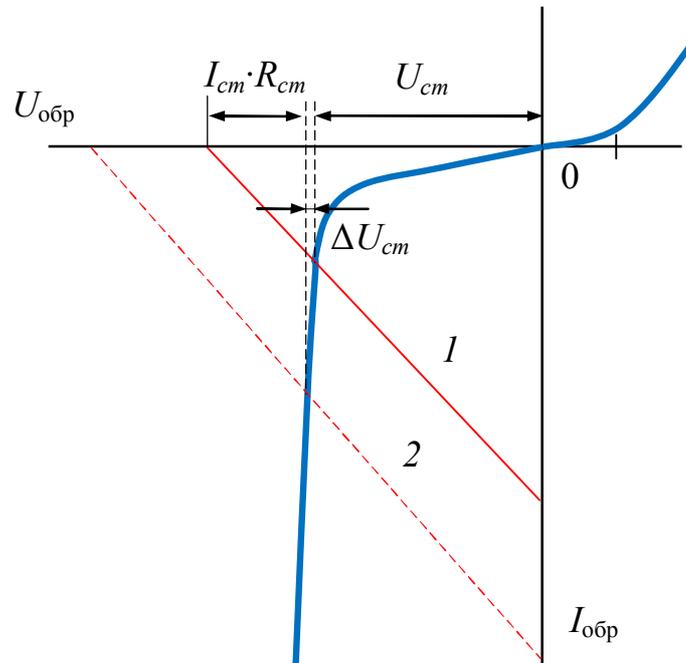


Рис. 14.3. Принцип стабилизации напряжения

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В лабораторной работе необходимо изучить устройство и исследовать работу параметрического стабилизатора напряжения. Для этой цепи с помощью вольтметров $PV1$ и $PV2$ измеряется входное и выходное напряжение стабилизатора, а также ток, протекающий через стабилитрон при разных значениях входного напряжения.

С помощью осциллографа необходимо исследовать стабилизирующее действие стабилитрона в случае выпрямленного напряжения с заметными пульсациями. Для этого к выходу однополупериодного выпрямителя нужно подключить стабилизатор напряжения и определить по осциллограммам пульсации напряжения на входе и выходе стабилизатора.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование зависимости выходного напряжения и тока стабилитрона от входного напряжения стабилизатора напряжения

1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 14.4). Устанавливая последовательно величины входного напряжения постоянного тока по табл. 14.1, измерьте соответствующие выходные напряжения и токи стабилитрона посредством мультиметров. Результаты занесите в таблицу 14.1.

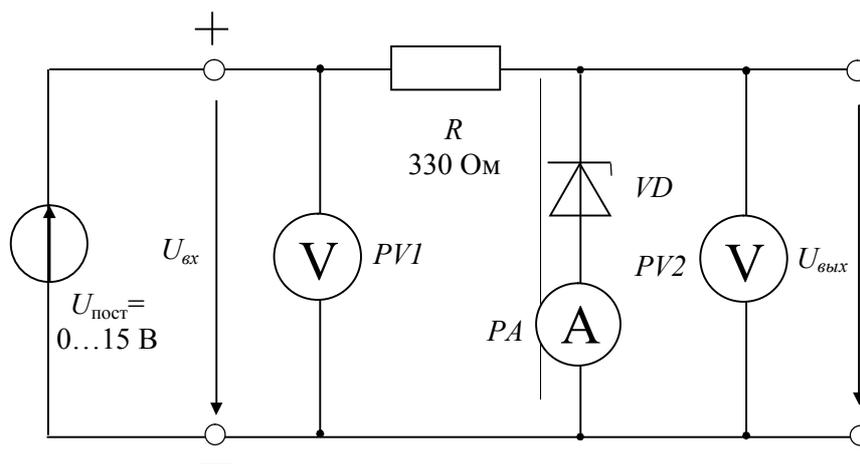


Рис. 14.4. Схема для исследования зависимостей $U_{вых} = f(U_{вх})$ и $I_{вых} = f(U_{вх})$

Таблица 14.1

Измеренные значения зависимостей $U_{вых} = f(U_{вх})$ и $I_{вых} = f(U_{вх})$

$U_{вх}, В$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{вых}, В$																
$I_{ст}, мА$																

Исследование влияния тока нагрузки I_H на величину тока стабилитрона

1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 14.5) и **представьте для проверки преподавателю.**

2. Устанавливая последовательно сопротивления нагрузки 10; 4,7; 2,2; 1; 0,68; 0,47 кОм, измерьте посредством мультиметра соответствующие значения токов $I_{ст}$ и I_H и занесите их в табл. 14.2.

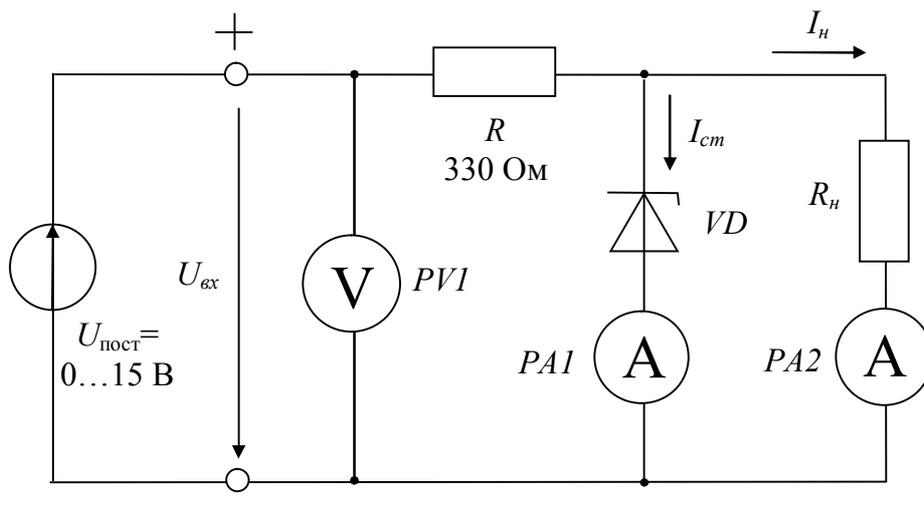


Рис. 14.5. Схема для исследования влияния тока нагрузки I_H

Таблица 14.2

Измеренные значения влияния тока нагрузки I_H

R_H , кОм	10	4,7	2,2	1,0	0,68	0,47
I_H , мА						
$I_{см}$, мА						

Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения

1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 14.6) и **представьте для проверки преподавателю.**

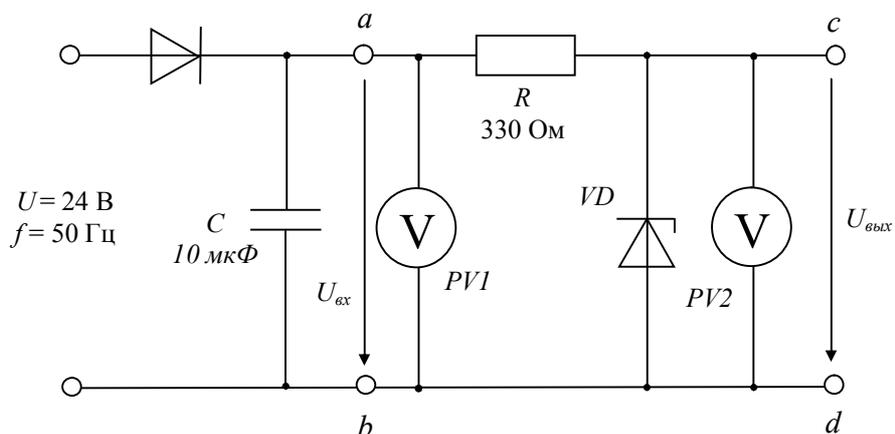


Рис. 14.6. Схема для исследования сглаживания пульсаций

2. Включите и настройте осциллограф.
3. Перенесите осциллограммы входного и выходного напряжений на график (рис. 14.7).

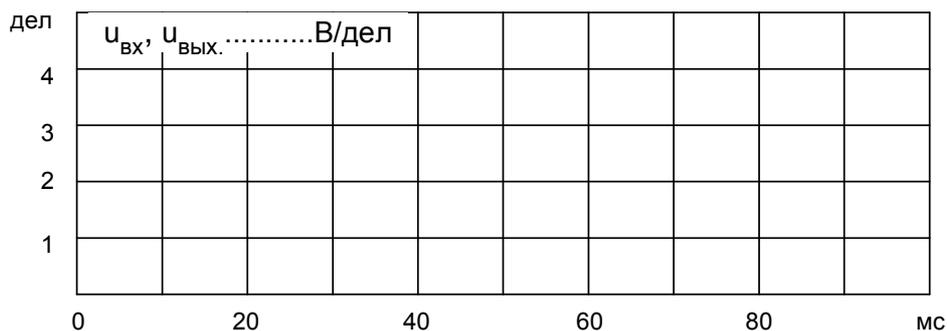


Рис. 14.7. Осциллограммы входного и выходного напряжений

4. Перенесите осциллограммы входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ напряжения без постоянных составляющих на график (рис. 14.8), укажите масштабы.

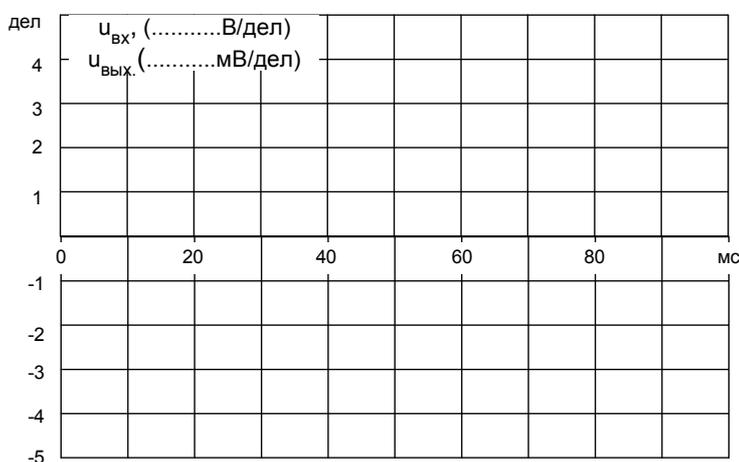


Рис. 14.8. Осциллограммы входного и выходного напряжения без постоянных составляющих

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По экспериментальным данным таблицы 14.1 постройте на графике (рис. 14.9) кривые зависимости выходного напряжения $U_{вых}$ от входного $U_{вх}$, а также зависимости выходного тока $I_{вых}$ от входного напряжения $U_{вх}$.

2. По измеренным значениям таблицы 14.2 постройте кривую зависимости тока $I_{ст}$ от тока нагрузки I_n .

3. Пользуясь осциллограммами рис. 14.7 и рис. 14.8, определите:
- величину пульсации входного напряжения $\Delta U_{вх}$ за сглаживающим конденсатором;
 - величину пульсации выходного напряжения $\Delta U_{вых}$ за стабилитроном;

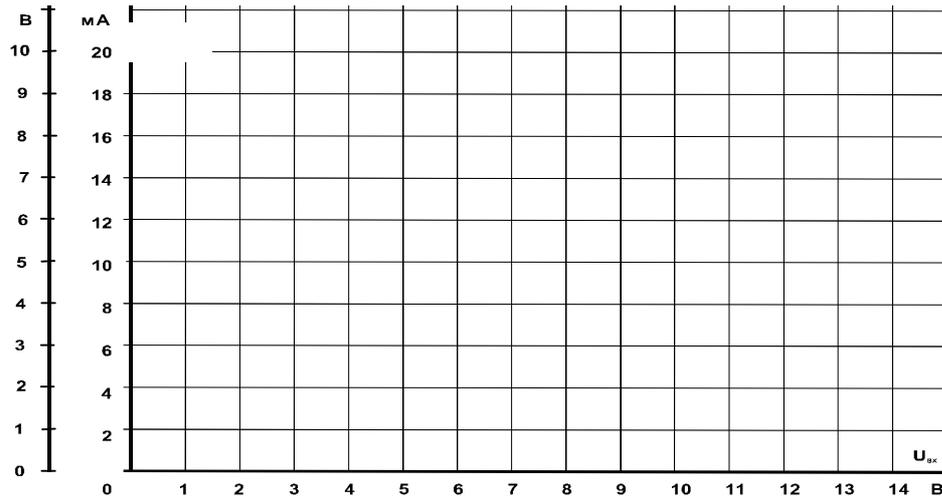


Рис. 14.9. Графики зависимостей $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ и $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

- в) величину коэффициента сглаживания q (абсолютного коэффициента стабилизации)

$$q = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}}; \quad (14.7)$$

- г) величину относительного коэффициента стабилизации S

$$S = \frac{\Delta U_{\text{вх}} \cdot U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вых}} \cdot U_{\text{вх}}} = q \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (14.8)$$

4. Определите коэффициент стабилизации

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}}. \quad (14.9)$$

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Для чего применяются стабилизаторы напряжения?
2. Как называется напряжение, при котором стабилитрон становится проводящим?
3. Что произойдет при изменении полярности стабилитрона в цепи (рис. 14.4)?
4. Какова величина напряжения стабилизации $U_{\text{ст}}$?
5. Каков максимальный обратный ток стабилитрона $I_{\text{ст}}$?
6. При каких условиях выходное напряжение параметрического стабилизатора остается постоянным?
7. Нарисовать схему параметрического стабилизатора напряжения, объяснить назначение элементов цепи.
8. Объясните принцип работы стабилизатора.
9. Назовите основные параметры стабилизатора напряжения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

ИНВЕРТИРУЮЩИЙ И НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛИ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ознакомиться с операционным усилителем. Исследовать инвертирующий и неинвертирующий усилитель на операционном усилителе:

- 1) изучить влияние сопротивления нагрузки на выходное напряжение;
- 2) исследовать зависимость выходного напряжения от входного при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Операционный усилитель (ОУ) – универсальный функциональный элемент в интегральном исполнении (серии К140, К544, К533, КР1040УД, КР1435 и др.), который широко используется для усиления, формирования и преобразования сигналов различного назначения как в аналоговой, так и в цифровой технике.

Наименование «операционный усилитель» обусловлено тем, что, прежде всего, такие усилители получили применение для выполнения операций над сигналами: суммирование, дифференцирование, интегрирования, инвертирования и т.д.

По размерам и цене операционные усилители практически не отличаются от отдельного транзистора. Благодаря идеальным характеристикам ОУ реализация различных электронных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на дискретных элементах, поэтому ОУ почти полностью вытеснили отдельные транзисторы в качестве элементов схем во многих областях аналоговой схемотехники.

На принципиальных схемах операционный усилитель обозначается с выводами для подключения питания, вывод частотной коррекции и др. (рис. 15.1).

ОУ в интегральном исполнении помещают в герметизированный корпус, который имеет такой же вид, как и у обычных транзисторов, но со значительно большим числом выводов (12–14). Кроме шести основных выводов (два входа, выход, «земля», источник питания), в схеме ОУ предусматривают ряд других (вспомогательных и дополнительных) выводов, предназначенных для коррекции характеристик ОУ, а также для использования части интегральной схемы.

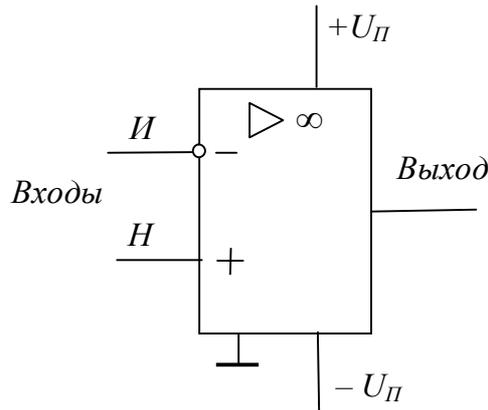


Рис. 15.1. Условное обозначение операционного усилителя

Операционный усилитель имеет два входа: инвертирующий (I) и неинвертирующий (H). При подаче сигнала на неинвертирующий вход выходной сигнал совпадает по знаку (фазе) с входным сигналом. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то выходной сигнал имеет обратный знак (противоположный по фазе). При подаче сигналов на оба входа сигнал на выходе равен

$$U_{\text{диф}} = k(U_2 - U_1), \quad (15.1)$$

где $k \rightarrow \infty$ – коэффициент усиления операционного усилителя;

U_2 и U_1 – сигналы на неинвертирующем и инвертирующем входах соответственно. Инвертирующий вход часто используется для введения в операционный усилитель внешних обратных связей.

Обозначим напряжения на выводах операционного усилителя (рис. 15.2).

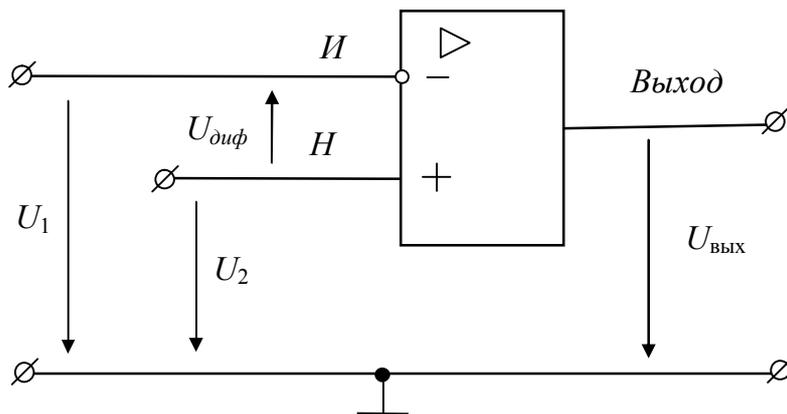


Рис. 15.2. Напряжения на выходах ОУ

Напряжение $U_{\text{диф}}$ между инвертирующим и неинвертирующим входом называют дифференциальным напряжением (дифференциальным сигналом). Ясно, что

$$U_{\text{диф}} = U_2 - U_1 = U_+ - U_-. \quad (15.2)$$

Операционные усилители рассчитаны на питание от двухполярного источника напряжения от ± 5 до ± 15 вольт. Положительный вывод источника должен обеспечивать от $+5$ до $+15$ вольт по отношению к земле, а отрицательный от -5 до -15 вольт по отношению к земле. Это позволяет выходному напряжению изменяться в сторону положительных и отрицательных значений по отношению к земле. При рассмотрении теории ОУ выводы питания не указываются.

Нормальный режим работы операционного усилителя – это режим работы с обратной связью. Операционный усилитель почти всегда охвачен глубокой отрицательной обратной связью, свойства которой и определяют свойства схемы с ОУ. Принцип введения обратной связи иллюстрируется на рис. 15.3.

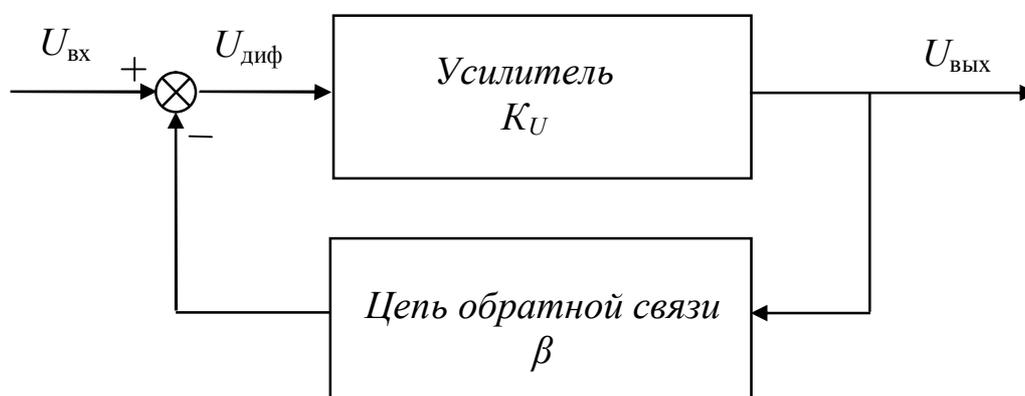


Рис. 15.3. Принцип отрицательной обратной связи

Часть выходного напряжения возвращается через цепь обратной связи к входу усилителя. Если, как это показано на рис. 15.3, напряжение обратной связи вычитается из входного напряжения, обратная связь называется отрицательной.

В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ работает как линейный усилитель, коэффициент усиления которого определяется только коэффициентом ослабления цепи обратной связи. Если в качестве цепи обратной связи применяется RC -цепь, то образуется активный фильтр. Наконец, включение в цепь обратной связи ОУ диодов и транзисторов позволяет реализовать нелинейные преобразования сигналов с высокой точностью.

Универсальность ОУ выдвигает ряд требований к его электрическим параметрам, которые приближают его к понятию «идеальный усилитель»:

1. В связи с тем, что ОУ должен хорошо работать от различных источников сигналов, внутреннее сопротивление которых может иметь величину, изменяющуюся в широких пределах, входное сопротивление ОУ должно быть большим ($R_{ВХ} \rightarrow \infty$).

2. Так как выходной сигнал ОУ также поступает на устройства с очень разным входным сопротивлением, выходное сопротивление должно быть низким ($R_{ВЫХ} \rightarrow 0$).

3. Также необходимо, чтобы ОУ обладал большим коэффициентом усиления и высокой стабильностью.

4. Необходим низкий уровень шумов и дрейфа нуля.

5. Широкая полоса пропускания и плоская АЧХ.

Для выполнения всех указанных требований ОУ содержит минимум три каскада: входной, промежуточный и выходной. Каждый каскад является усилителем со своими характерными особенностями. На рис. 15.4 изображена блок-схема операционного усилителя.

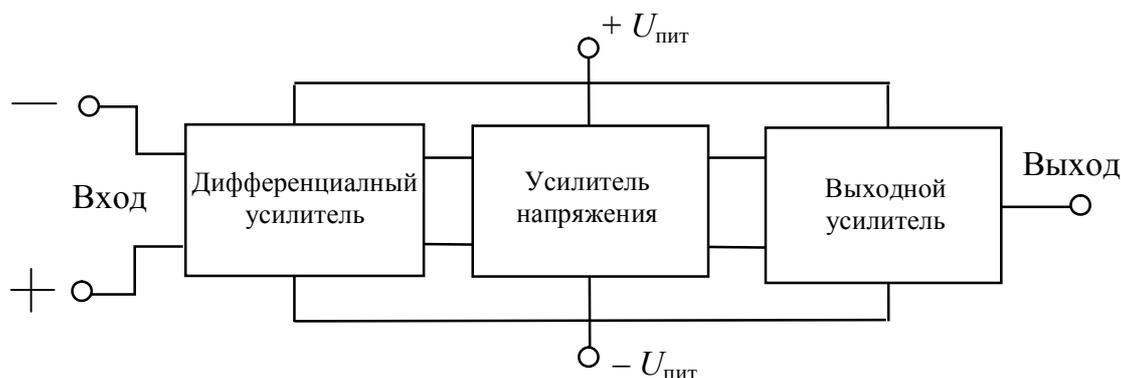


Рис. 15.4. Блок-схема операционного усилителя

Входной каскад – это дифференциальный усилитель. Он позволяет операционному усилителю реагировать только на разность входных сигналов. Амплитудно-частотная характеристика дифференциального усилителя обеспечивает усиление от области низких частот до постоянного тока. Это означает, что дифференциальный усилитель может усиливать не только низкочастотные сигналы переменного тока, но и сигналы постоянного тока. Этот усилитель обладает большим входным сопротивлением, малым уровнем дрейфа нуля, большой линейностью амплитудной характеристики и широкой полосой пропускания.

Промежуточный каскад – это усилитель напряжения с высоким коэффициентом усиления. Он обеспечивает большую часть усиления сигнала по напряжению и сдвиг уровня постоянного напряжения.

Выходной каскад – это усилитель мощности. Он используется для усиления сигнала, а также для того, чтобы операционный усилитель

имел низкое выходное сопротивление и широкую полосу пропускания.

Входное сопротивление операционного усилителя очень велико ($R_{вх} \rightarrow \infty$), поэтому входной ток при расчете считается равным нулю.

Выходное сопротивление операционного усилителя очень мало ($R_{вых} \rightarrow 0$), поэтому ток нагрузки усилителя (выходной ток) практически не влияет на выходное напряжение.

Операционные усилители представляют собой широкополосные усилители напряжения постоянного тока, которые в определенном частотном диапазоне усиливают также и напряжения переменного тока. Поэтому они применяются в самых разнообразных схемах электроники и автоматики. Операционные усилители используются в схемах усилителей, фильтров, интегрирующих и дифференцирующих цепей и других устройств.

В данной лабораторной работе исследуются инвертирующий и неинвертирующий усилители на ОУ.

Инвертирующий усилитель представляет собой устройство, которое преобразует входное напряжение в выходное напряжение противоположной полярности. В случае синусоидального напряжения образуется фазовременной сдвиг 180° между входным и выходным сигналом. Инвертирующий усилитель может быть использован для усиления или ослабления входного сигнала. Его принципиальная схема показана на рис. 15.5.

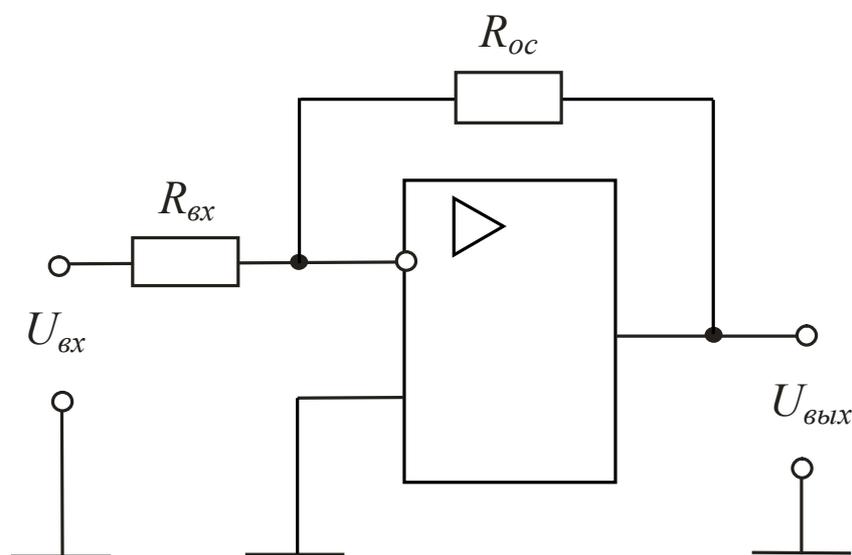


Рис. 15.5. Инвертирующий усилитель

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя равен

$$K = -\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{ос}}{R_{вх}}. \quad (15.3)$$

Для упрощения расчетов делаются следующие допущения:

- в диапазоне модуляции разность потенциалов между двумя входами равна 0;
- входной ток усилителя равен 0.

В неинвертирующем усилителе входное и выходное напряжения имеют одинаковую полярность, то есть фазовый сдвиг по напряжению равен 0^0 .

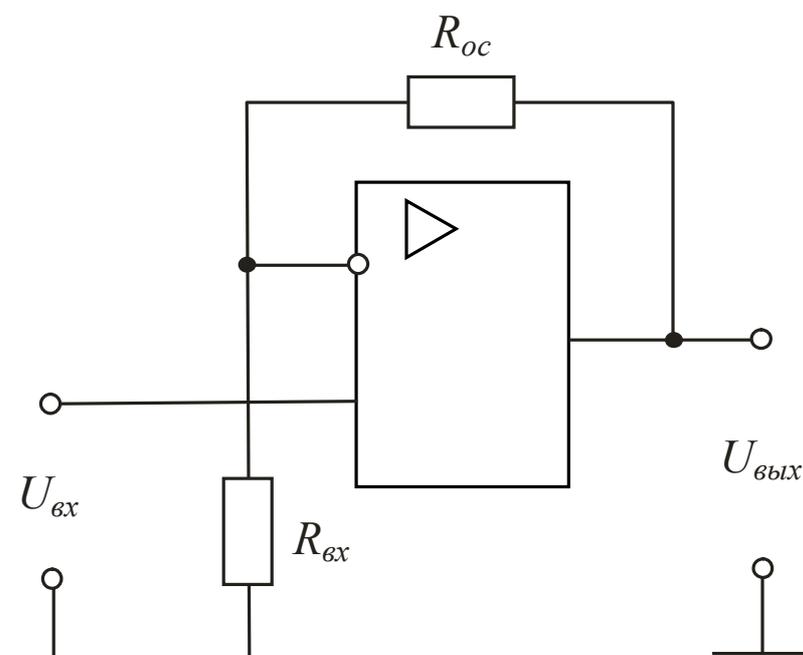


Рис. 15.6. Неинвертирующий усилитель

Как показано на принципиальной схеме (рис. 15.6), входное напряжение подается на неинвертирующий вход. В диапазоне модуляции усилителя разность потенциалов между двумя входами равна 0. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя вычисляется по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ех}}} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_{ех}}. \quad (15.4)$$

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Собрать схему эксперимента. Подать на вход усилителя двуполярное питание. Изменяя величину сопротивления отрицательной обратной связи R_{oc} и величину входного напряжения, снять зависимости выходного напряжения от входного для инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Сравнить полученные кривые.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование инвертирующего усилителя

1. Соберите цепь, как показано на рис. 15.7, и представьте для проверки преподавателю.

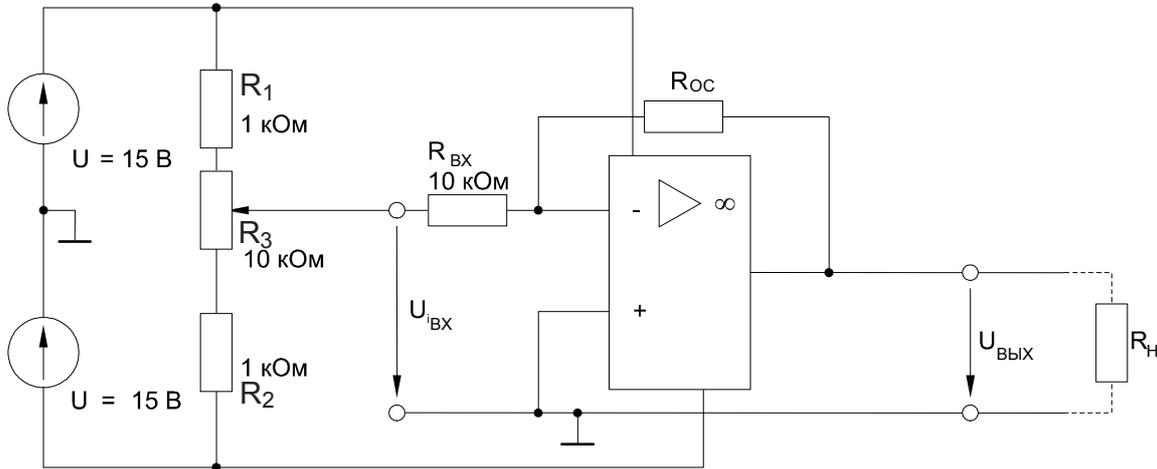


Рис. 15.7. Исследуемая цепь с инвертирующим усилителем

2. С помощью мультиметра измерьте величины выходного напряжения $U_{вых}$ при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи R_{oc} и входных напряжениях $U_{вх}$ согласно таблице 15.1.

Таблица 15.1

Экспериментальные значения входного и выходного напряжения

$U_{вх}, В$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{вых}$ при $R_{oc} = 10 кОм$											
$U_{вых}$ при $R_{oc} = 22 кОм$											
$U_{вых}$ при $R_{oc} = 47 кОм$											

3. Занесите результаты измерений $U_{вых}$ в таблицу 15.1.
4. Для изучения влияния сопротивления нагрузки установите входное напряжение $U_{вх} = -5 В$, а $R_{oc} = R_{вх} = 10 кОм$.
5. Подсоедините к выходу усилителя поочередно различные сопротивления нагрузки согласно таблицы 15.2 и измерьте мультиметром результирующие выходные напряжения $U_{вых}$.
6. Занесите измеренные величины в таблицу 15.2.

Таблица 15.2

Измеренные значения выходного напряжения

R_n , Ом	1000	680	470	330	220	100	47
$U_{вых}$, В							

Исследование неинвертирующего усилителя

1. Соберите цепь по схеме (рис. 15.8) и **представьте для проверки преподавателю.**
2. Используя мультиметр, измерьте выходное напряжение $U_{вых}$ при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи R_{oc} и входного напряжения $U_{вх}$ согласно таблице 15.3.

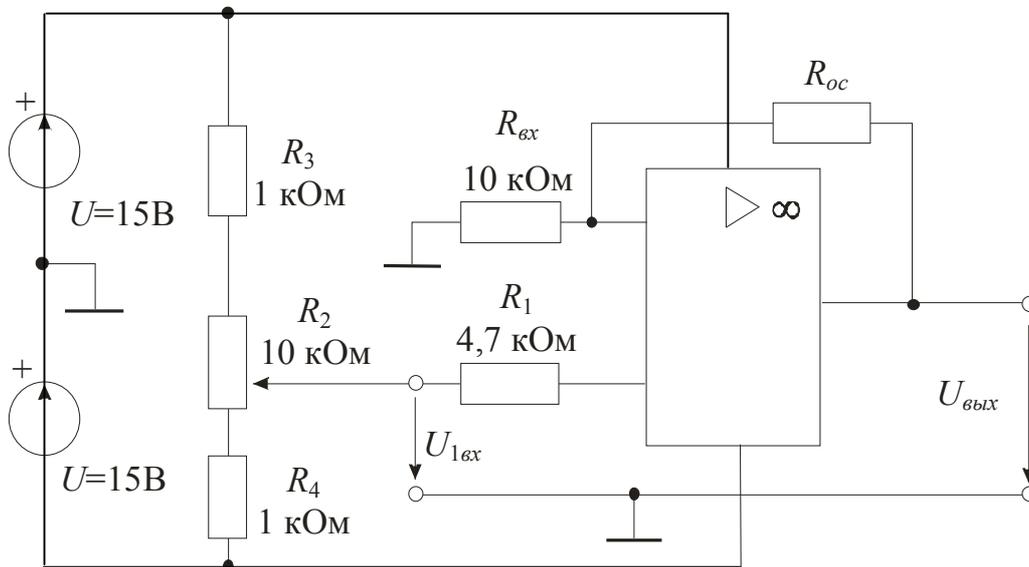


Рис. 15.8. Схема для исследования неинвертирующего усилителя

3. Занесите результаты измерений в таблицу 15.3.

Таблица 15.3

Измеренные значения выходного напряжения

$U_{ВХ}$, В	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{вых}$, В при $R_{oc}=10$ кОм											
$U_{вых}$, В при $R_{oc}=22$ кОм											
$U_{вых}$, В при $R_{oc}=47$ кОм											

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По экспериментальным данным таблицы 15.1 на графике (рис. 15.9) постройте кривые зависимостей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от входного $U_{\text{вх}}$ при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи $R_{\text{ос}}$.

2. По данным таблицы 15.2 постройте кривую зависимости выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$.

3. По данным таблицы 15.3, на графике (рис. 15.9) постройте зависимости выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от входного напряжения $U_{\text{вх}}$ при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи $R_{\text{ос}}$.

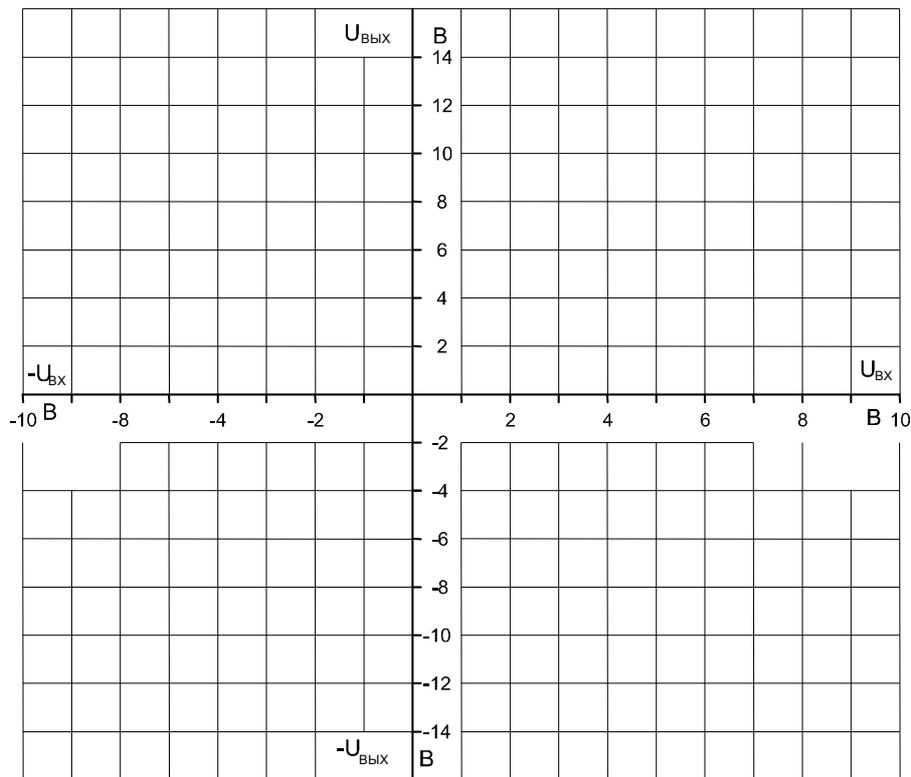


Рис. 15.9. Зависимости выходного напряжения от входного при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И САМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНТОВ

1. Что такое операционный усилитель, как он обозначается на схемах и где он используется?
2. В чем разница между инвертирующим и неинвертирующим входами операционного усилителя?
3. Нарисуйте блок-схему операционного усилителя. Объясните назначение каждого элемента блок-схемы.
4. Какое напряжение питания подается на операционный усилитель?

5. Что такое отрицательная обратная связь? Как она вводится в схему усилителей на основе операционного усилителя?
6. Какова полярность входного напряжения $U_{вх}$ инвертирующего усилителя по сравнению с выходным напряжением $U_{вых}$?
7. Какие компоненты определяют коэффициент усиления K усилителя?
8. Какова величина коэффициента усиления при $R_{oc} = 100$ кОм и $R_{вх} = 10$ кОм?
9. Какова полярность входного напряжения $U_{вх}$ в сравнении с выходным напряжением $U_{вых}$ в неинвертирующем усилителе?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Академия, 2008. – 539 с.
2. Электротехника. Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.
3. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. – М.: Энергоиздат. 1987. – 528 с.
4. Миклашевский С.Л. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1973. – 617 с.
5. Клауснитцер Г. Введение в электротехнику. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 480 с.
6. Траубе Е.С., Миргородский В.Г. Электротехника и основы электроники. – М.: Высшая школа, 1985. – 160 с.
7. Электротехника. Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высшая школа, 1995. – 536 с.
8. Кузовкин В.А. Теоретическая электротехника. – М.: Логос, 2002. – 480 с.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

Механико-машиностроительный факультет

Наименование выпускающей кафедры

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторная работа № _____

(название лабораторной работы)

Исполнитель:

студент группы _____ подпись И.О. Фамилия
(дата)

Руководитель:

(должность, ученая степень, звание) подпись И.О. Фамилия
(дата)

Юрга – 20__

ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для правильного снятия результатов и уменьшения погрешности измерений необходимо соблюдать следующие правила.

1. Все измерения, относящиеся к одному режиму работы исследуемого устройства, должны проводиться без перерыва, за короткий промежуток времени для уменьшения погрешностей, обусловленных различными факторами, например нагревом исследуемого устройства.

При использовании приборов с зеркальной шкалой необходимо для снятия правильного показания прибора соблюдать следующие требования: во время снятия правильного показания отсчета по шкале глаз должен быть расположен так, чтобы стрелка прибора и её отражение в зеркале совпадали, т.е. нужно смотреть под прямым углом.

2. Прежде чем приступить к измерениям, нужно определить цену деления прибора (C). Если на шкале прибора имеются цифры, означающие измеряемую величину, то **цена деления прибора определяется как частное от деления разности двух ближайших оцифрованных значений на число делений (n) между ними**

$$C = \frac{A_n - A_{n-1}}{n}.$$

Пример 1. Амперметр электромагнитной системы имеет оцифрованные деления: 0, 1, 2, 3, 4, 5 А. Между отметками 3 и 4 нанесены четыре риска, т.е. пять делений. Цена одного деления амперметра

$$C_I = 1/5 = 0,2 \text{ А/дел.}$$

Между отметками 1 и 2 только одна риска, т.е. два деления. В этом случае цена деления

$$C_I = 1/2 = 0,5 \text{ А/дел.}$$

Цена деления ваттметра равна произведению пределов напряжения и силы тока, деленному на число делений:

$$C_P = U_{\text{ном.}} I_{\text{ном.}} / n.$$

Пример 2. $U_{\text{ном.}} = 150 \text{ В}$, $I_{\text{ном.}} = 5 \text{ А}$, $n = 150$ делений, цена деления ваттметра

$$C_P = 150 \cdot 5 / 150 = 5 \text{ Вт/дел.}$$

3. После определения цены деления прибора **измеряемая величина A_X определяется умножением цены деления C на число делений N , на которое отклонилась стрелка прибора при измерении**

$$A_X = C \cdot N.$$

Пример 3. При измерении тока прибором М104, имеющем цену деления $C_I = 1 \cdot 10^{-4}$ А/дел., стрелка прибора отклонилась на $n = 20$ делений. Измеряемый ток

$$I_X = C_I \cdot N = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 2 \text{ мА}.$$

4. Измеренные результаты должны быть записаны с учетом абсолютной и относительной погрешности измерений.

Амперметры, вольтметры и ваттметры подразделяются на восемь классов точности : 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра, означающая класс точности, определяет приведенную погрешность, которую имеет данный прибор.

Пример 4. Прибор класса точности 0,5 имеет $\gamma_{пр.} = \pm 0,5\%$.

Приведенная погрешность (класс точности) характеризует точность измерительного прибора.

Под приведенной погрешностью прибора понимают выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности ΔA к номинальной величине прибора $A_{НОМ.}$

$$\gamma_{пр.} = \frac{\Delta A}{A_{НОМ.}} \cdot 100\%,$$

где $A_{НОМ.}$ – максимальное, предельное значение шкалы прибора;

ΔA – абсолютная погрешность, которая равна разности между измеренным и действительным значением величины

$$\Delta A = A_{И} - A.$$

Обычно точность измерения характеризуется абсолютной и относительной погрешностью измерений. Из формулы для приведенной погрешности прибора получим выражение для абсолютной погрешности измерения

$$\Delta A = \frac{\gamma_{пр.} \cdot A_{НОМ.}}{100}.$$

Пример 5. Номинальное напряжение, т.е. предел измерения вольтметра $U_{НОМ.} = 150 \text{ В}$, класс точности 1,5. С помощью вольтметра измерено напряжение $U_{И} = 50 \text{ В}$. Определить абсолютную величину погрешности измерения, а также действительное значение напряжения.

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta U = \frac{\gamma_{пр.} \cdot U_{НОМ.}}{100} = \frac{\pm 1,5 \cdot 150}{100} = \pm 2,25 \text{ В}.$$

Действительное значение напряжения может лежать в пределах

$$U = U_{И} - \Delta U = (50 \pm 2,25) \text{ В},$$

где $U_{И}$ – измеренная величина напряжения; ΔU – абсолютная погрешность измерения.

Абсолютную погрешность округлять до одной значащей цифры, а значение измеренной величины – до того разряда, в котором находится значащая цифра абсолютной погрешности.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к действительному значению величины в процентах

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} 100\%.$$

Пример 6. Амперметр имеет класс точности 0,2, число делений шкалы $n = 100$ и предел измерения $I_H = 5$ А. При измерении стрелка прибора отклонилась на $N = 76$ делений. Определить цену деления, абсолютную и относительную погрешности, значение тока.

Цена деления амперметра

$$C = \frac{I_{НОМ.}}{n} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А/дел.}$$

Измеренный ток

$$I = C \cdot N = 0,05 \cdot 76 = 3,8 \text{ А.}$$

Абсолютная погрешность

$$\Delta I = \gamma \frac{I_{НОМ.}}{100} = \frac{0,2 \cdot 5}{100} = 0,01 \text{ А.}$$

Относительная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta I}{I} 100 = \frac{0,01}{3,8} 100 = 0,26\%.$$

Учебное издание

СТЕПАНОВ АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»**

Учебное пособие

Научный редактор *кандидат технических наук,
доцент А.Г. Крампит*
Редактор *Л.А. Холопова*
Компьютерная верстка *Ю.В. Сотокина*
Дизайн обложки *А.П. Степанов*

Подписано к печати 05.11.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательство Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru