

ОАО РНПО "Росучприбор"
Южно-Уральский государственный университет

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ»

Методические указания
к проведению лабораторных работ

Челябинск
2007г.

Бородянко В.Н. Электрические цепи и основы электроники: Методические указания к проведению лабораторных работ на стендах «Электротехника и основы электроники». – Челябинск: ЮУрГУ, 2007.

Методические указания предназначены для студентов средних и высших учебных заведений, в которых предусмотрено изучение курса «Электротехника основы электроники». Методические указания также могут быть использованы для обучения учащихся профессионально-технических училищ и слушателей отраслевых учебных центров повышения квалификации инженерно-технических работников.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	с.
1. Общие рекомендации по осуществлению лабораторного эксперимента	5
1.1. Цель лабораторных занятий	5
1.2. Подготовка к лабораторному занятию	5
1.3. Проведение эксперимента	6
1.4. Обработка результатов и оформление отчета	7
2. Методические указания к проведению лабораторных работ по разделу «Электрические цепи»	8
2.1. Работа № 1. Электроизмерительные приборы и измерения	8
2.2. Работа № 2. Линейные электрические цепи постоянного тока	13
2.3. Работа № 3. Экспериментальное определение параметров элементов цепей переменного тока	(16)
! 2.4. Работа № 4. Неразветвленная электрическая цепь переменного тока <i>страница</i>	21
2.5. Работа № 5. Разветвленная электрическая цепь переменного тока	26
— 2.6. Работа № 6. Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «звезда» —	29
— 2.7. Работа № 7. Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «треугольник» —	33
2.8. Работа № 8. Нелинейная цепь постоянного тока	36
2.8. Работа № 9. Нелинейная цепь переменного тока	40
3. Методические указания к проведению лабораторных работ по разделу «Электроника»	45
4.1. Работа № 1. Полупроводниковые диоды	45
4.2. Работа № 2. Биполярные транзисторы	(51)
4.3. Работа № 3. Полевые транзисторы	57
4.3. Работа № 4. Однофазный выпрямитель	63
Работа № 5. Исследование тиристорных и управляемых выпрямителей	68
4.4. Работа № 6. Операционный усилитель	73
4.5. Работа № 7. Исследование мультивибратора	81
4.6. Работа № 8. Логические элементы на интегральных микросхемах	85
4.7. Работа № 9. Триггеры и счетчики на интегральных микросхемах	901

1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Цель лабораторных занятий

Важнейшей частью курса «Электрические цепи и основы электроники» является лабораторный практикум. Чтобы знать электротехнику и основы электроники, необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи. Решение этих задач может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методом. Экспериментальные методы решения изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия дают возможность:

- закрепить на практике теоретические сведения о работе различных электротехнических и электронных устройств;
- подробно ознакомиться с устройством и характеристиками наиболее важных электротехнических и электронных приборов, аппаратов и машин, составляющих предмет лабораторной практики;
- помочь овладеть практическими способами управления и настройки электротехнических устройств на заданный режим;
- получить практические навыки в проведении измерений электрических величин, пользовании различными измерительными приборами и аппаратами, чтении электрических схем, построении графиков и характеристик;
- научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических и электронных устройств;
- выработать умение рассуждать о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных электротехнических устройств для решения тех или иных задач.

В соответствии с государственными образовательными стандартами по курсам электротехники и основы электроники лабораторные работы должны выполняться по разделам электрические цепи постоянного и переменного тока, трехфазные электрические цепи, трансформаторы и электрические машины постоянного и переменного тока, основы электроники.

1.2. Подготовка к лабораторному занятию

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное в соответствии с расписанием занятий время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой из них.

Студент, в первую очередь, должен твердо уяснить цель задания и четко представлять назначение устройства, его условное обозначение на электрических схемах, принцип действия и основные характеристики.

Затем, по материалам руководства необходимо ознакомиться с основными параметрами объекта исследования, источников питания и других используемых в стенде преобразователей и пускорегулирующих аппаратов. Эти сведения нужны для определения диапазона возможного изменения величин и необходимого режима работы объекта исследования. Требуемые расчетные соотношения и

формулы следует найти и записать самостоятельно на основе изучения учебных пособий.

Особое внимание следует уделить измерительным приборам. В соответствии с каждым этапом рабочего задания необходимо проанализировать схему соединений, состоящую из элементов объекта исследования и электроизмерительных приборов. При этом рекомендуется заготовить таблицы для записи показаний приборов.

Одним из важных этапов подготовки к выполнению лабораторной работы является изучение технологии проведения эксперимента, используя методические рекомендации к выполнению рабочего задания.

Завершает этап подготовки к выполнению лабораторной работы составление ответов на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях.

1.3. Проведение эксперимента

Получив разрешение преподавателя на проведение лабораторного исследования, следует немедленно приступить к сборке электрических цепей на рабочем месте. Рекомендуется придерживаться следующего порядка, значительно облегчающего работу по сборке и избавляющего от многих ошибок при соединениях. Общим правилом является соединение сначала участков цепи с последовательным соединением элементов и приборов, а затем параллельных ветвей как объекта исследования, так и приборов.

Этот прием позволяет сознательно подойти к оценке назначения каждого элемента цепи тем самым правильно осуществить её сборку.

Одновременно со сборкой цепи надо произвести маркировку измерительных приборов в соответствии с их условными обозначениями на рабочей схеме соединений. Маркировку приборов можно выполнить с помощью бумажных бирок, которые заготавливает учащийся, выполняющий лабораторное исследование.

Во избежание возможного возникновения больших токов в собранной цепи элементы регулирования потенциометров необходимо устанавливать в положение, соответствующее минимуму напряжения на выходе.

Собранную цепь следует обязательно показать для проверки преподавателю. Только с его разрешения можно включить источник питания и произвести предварительное опробование работы цепи, чтобы убедиться в возможности проведения опыта при заданных пределах измерения величин. Нельзя приступать к измерениям, не будучи совершенно уверенным, что цепь собрана правильно.

Если при испытании цепи постоянного тока стрелка измерительного прибора уходит за пределы шкалы в обратном направлении, надо отключить цепь и переключить подходящие к прибору провода.

При снятии характеристик недопустимо превышать номинальные значения токов и напряжений испытываемого электротехнического устройства, если нет особых указаний в руководстве по лабораторному эксперименту. В случае, если стрелка какого-либо прибора выходит за пределы шкалы, надо немедленно отключить цепь от источника питания, доложить преподавателю или лаборанту и

изменить условия эксперимента (уменьшить напряжение питания, увеличить диапазон изменения сопротивления и т.д.).

После предварительного опробования цепи, проверки или оценки диапазона изменения переменного параметра необходимо наметить последовательность отдельных манипуляций и отсчетов, а затем приступить к наблюдениям.

Отсчеты рекомендуется проводить по возможности одновременно по всем приборам. Следует избегать перерыва начатой серии наблюдений и во всех случаях, когда возникает сомнение в правильности полученных наблюдений, их необходимо повторить несколько раз.

Результаты всех первичных наблюдений и отсчетов записывают в таблицу протокола испытаний. Запись отсчетов должна вестись в точном соответствии с показаниями измерительных приборов. Протоколы наблюдений являются единственным документальным следом, остающимся от измерений, поэтому от точной и своевременной фиксации в таблицах результатов отсчета в значительной степени зависит успех экспериментальной работы.

При переходе от одного этапа исследования к другому необходимо каждый раз обращаться к преподавателю за проверкой правильности полученных результатов, которые представляют в виде таблиц или графиков.

К следующему этапу работы разрешается приступать только после проверки и визирования протокола преподавателем.

1.4. Обработка результатов и оформление отчета

Каждый студент самостоятельно должен обрабатывать данные опытов и подготовить отчет по каждой проделанной работе.

В отчете на титульном листе указываются название учебного заведения, кафедры. Номер и наименование работы, фамилия и инициалы студента, выполнившего работу, номер его академической группы.

Отчет должен содержать, паспортные данные объекта исследования, схемы соединения элементов объекта исследования с включенными измерительными приборами, таблицы с записью результатов эксперимента, графики зависимостей и векторные диаграммы.

После проведения эксперимента должны быть сделаны основные выводы, полученные в результате исследования.

Каждая схема должна быть сопровождена соответствующей таблицей записей результатов измерений и графиком, иллюстрирующим изучаемые зависимости. В таблице обязательно следует указывать, в каких единицах измерены исследуемые величины. Все таблицы необходимо снабдить заголовками, характеризующими проводимый опыт.

На основании результатов измерений проводится их окончательная обработка. Измеренные и вычисленные величины заносятся в соответствующие колонки одной и той же таблицы.

Вычерчивание схем и таблиц рекомендуется производить карандашом обязательно с помощью линейки.

Особое внимание надо уделить графикам зависимостей между величинами, т.к. они являются наглядным результатом работы, графическим ответом на вопросы, поставленные в лабораторной работе.

При построении графиков по осям приводят стандартные буквенные обозначения величин и единиц их измерения, указывают деления с одинаковыми интервалами, соответствующие откладываемым величинам в принятых единицах измерения или в десятичных кратных либо дольных единицах.

Числовые отметки у масштабных делений принято выбирать так, чтобы они составляли $10^{\pm n}$, $2 \cdot 10^{\pm n}$ или $5 \cdot 10^{\pm n}$ от тех единиц, в которых выражены величины, откладываемые по осям. Например, 10 мА; 0,02 Ом; 500 Вт.

При построении графиков вдоль оси абсцисс в выбранном масштабе откладывают независимую переменную. Условное буквенное обозначение этой величины рекомендуется ставить под осью, а наименование единиц измерения либо их десятичных кратных или дольных единиц – после обозначения величины. Вдоль оси ординат масштабные цифры ставят слева от оси, наименование или условное обозначение откладываемых величин – также слева от оси и под этим обозначением указывают единицу измерения. Если в одних координатных осях строят несколько графиков функций одной независимой переменной, то следует провести дополнительные шкалы параллельно основным, каждую со своим масштабом. Если величины по осям абсцисс и ординат отложены в определенном масштабе с числовыми отметками, то не следует ставить стрелок, указывающих направление роста численных значений величин. Наименование единиц измерения дается без скобок. При вычерчивании графиков надо учитывать, что всякое измерение имеет случайные погрешности (истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, а вместо него принимают некоторое её значение, признаваемое за наиболее приближающееся к истинному). Поэтому не следует проводить кривые через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, которые проходят среди экспериментальных точек. Отступление некоторых точек от плавной кривой называют «разбросом точек». Величина разброса при наблюдении закономерных явлений определяет тщательность проведения эксперимента.

При наличии нескольких кривых на одном графике точки, соответствующие опытным данным и относящиеся к различным кривым, должны быть помечены условными значками (крестиками, кружками и т. п.).

Каждый график обязательно должен быть снабжен таким лаконичным текстом, чтобы любой достаточно подготовленный читатель мог легко понять, какую зависимость характеризует построенный график.

На последней странице отчета следует указать дату оформления и поставить подпись.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений. Составление подобных отчетов – первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ»

Работа № 1. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

1. Цель работы

Изучение электроизмерительных приборов, используемых в лабораторных работах, выполняемых на стенде. Получение представлений о пределе измерения и цене деления, абсолютной и относительной погрешности, условиях эксплуатации и других характеристиках стрелочных электроизмерительных приборов, получение навыков работы с цифровыми измерительными приборами.

2. Пояснения к работе

Контроль работы электрооборудования осуществляется с помощью разнообразных электроизмерительных приборов. Наиболее распространенными электроизмерительными приборами являются приборы непосредственного отсчета. По виду отсчетного устройства различают аналоговые (стрелочные) и цифровые измерительные приборы.

На лицевой стороне стрелочных приборов изображены условные обозначения, определяющие классификационную группу прибора. Они позволяют правильно выбрать приборы и дают некоторые указания по их эксплуатации.

В цепях постоянного тока для измерений токов и напряжений применяются в основном приборы магнитоэлектрической системы. Принцип действия таких приборов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и измеряемого тока, протекающего по катушке. Угол поворота стрелки α прямо пропорционален измеряемому току I : $\alpha = K I$. Шкалы магнитоэлектрических приборов равномерные.

В измерительных механизмах электромагнитной системы, применяемых для измерений в цепях переменного и постоянного тока, вращающий момент обусловлен действием магнитного поля измеряемого тока в неподвижной катушке прибора на подвижный ферромагнитный якорь. Угол поворота стрелки α здесь пропорционален квадрату тока: $\alpha = K I^2$. Поэтому шкала электромагнитных приборов обычно неравномерная, что является недостатком этих приборов. Начальная часть шкалы не используется для измерений.

Для практического использования измерительного прибора необходимо знать его предел измерений (номинальное значение) и цену деления (постоянную) прибора. Предел измерений – это наибольшее значение электрической величины, которое может быть измерено данным прибором. Это значение обычно указано на лицевой стороне прибора. Один и тот же прибор может иметь несколько пределов измерений. Ценой деления прибора называется значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы прибора. Цена деления прибора C легко определяется как отношение предела измерений $A_{\text{ном}}$ к числу делений шкалы N : $C = A_{\text{ном}} / N$.

На лицевой стороне стрелочных прибора указывается класс точности, который определяет приведенную относительную погрешность прибора $\gamma_{\text{пр}}$.

Приведенная относительная погрешность прибора – это выраженное в процентах отношение максимальной для данного прибора абсолютной погрешности ΔA к номинальному значению прибора (пределу измерений) $A_{НОМ}$: $\gamma_{ПР} = 100 \Delta A / A_{НОМ} \%$.

Зная класс точности прибора, можно определить абсолютную ΔA и относительную погрешности измерения $\gamma_{ИЗМ}$, а также действительное значение измеряемой величины A_d :

$$\Delta A = \gamma_{ПР} A_{НОМ} / 100; \quad \gamma_{ИЗМ} = 100 \Delta A / A; \quad A_d = A \pm \Delta A.$$

Нетрудно сделать вывод, что относительная погрешность измерения тем больше, чем меньше измеряемая величина по сравнению с номинальным значением прибора. Поэтому желательно не пользоваться при измерении начальной частью шкалы стрелочного прибора.

Для обеспечения малой методической погрешности измерения необходимо, чтобы сопротивление амперметра было значительно меньше сопротивления нагрузки, а сопротивление вольтметра было значительно больше сопротивления исследуемого участка.

При проведении измерений в электрических цепях широкое применение получили цифровые мультиметры – комбинированные цифровые измерительные приборы, позволяющие измерять постоянное и переменное напряжение, постоянный и переменный ток, сопротивления, проверять диоды и транзисторы. Для проведения конкретного измерения необходимо установить переключателем предполагаемый предел измерений измеряемой величины (ток, напряжение, сопротивление) с учетом рода тока (постоянный или переменный). Представление результата измерения происходит на цифровом отсчетном устройстве в виде обычных удобных для считывания десятичных чисел. Наибольшее распространение в цифровых отсчетных устройствах мультиметров получили жидкокристаллические, газоразрядные и светодиодные индикаторы. На передней панели такого прибора находится переключатель функций и диапазонов. Этот переключатель используется как для выбора функций и желаемого предела измерений, так и для выключения прибора. Для продления срока службы источника электропитания прибора переключатель должен находиться в положении «OFF» в тех случаях, когда прибор не используется.

К основным техническим характеристикам цифровых приборов, которые необходимо учитывать при выборе относятся:

- диапазон измерений (обычно прибор имеет несколько поддиапазонов);
- разрешающая способность, под которой часто понимают значение измеряемой величины, приходящееся на единицу дискретности, то есть один квант;
- входное сопротивление, характеризующее собственное потребление прибором энергии от источника измерительной информации;
- погрешность измерения, часто определяемая как $\pm(\% \text{ от считываемых данных} + \text{количество единиц младшего разряда})$.

Мультиметр часто имеет батарейное питание 9 В, поэтому перед использованием прибора необходимо проверить батарею электропитания путем включения прибора. Если батарея разряжена, то на дисплее возникнет условное изображение батареи. Используемые в стенде «Электротехника» мультиметры питаются от выпрямительного устройства, вмонтированного в модуль. Для

использования приборов необходимо подключить с тыльной стороны кабель питания к источнику переменного напряжения 220 В. Перед проведением измерения необходимо переключатель пределов установить на требуемый диапазон измерений. Для предотвращения повреждения схемы прибора входные токи и напряжения не должны превышать указанных величин. *Если предел измеряемого тока или напряжения заранее неизвестен, следует устанавливать переключатель пределов на максимум и затем переключать его вниз по мере необходимости.*

Используемые в данном стенде мультиметры, имеют режим автоматического выбора поддиапазона измерений. С помощью кнопочного переключателя «R-N» можно устанавливать поддиапазон измерения вручную.

Для измерения **напряжения** подключите один щуп к разъему COM, а другой – к разъему «V/Ω», установите переключатель функций в положение «V» и с помощью кнопочного переключателя установите режим измерения постоянного (DC) или переменного (AC) напряжения. Подсоедините концы щупов к измеряемому источнику напряжения. При измерении постоянного напряжения полярность напряжения на дисплее будет соответствовать полярности напряжения на втором щупе. Некоторые характеристики используемого мультиметра при измерении постоянного напряжения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поддиапазон измерений	Погрешность измерения	Разрешающая способность
4 В	$\pm 0.5\% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	1 мВ
40 В	$\pm 0.5\% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	10 мВ
400 В	$\pm 0.5\% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	0,1 В
1000 В	$\pm 0.8\% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	1 В

Некоторые характеристики используемого мультиметра при измерении переменного напряжения представлены в табл. 2.

Для измерения **сопротивлений** подключите один щуп к разъему «COM», а второй – к разъему «V/Ω», установите переключатель функций на «Ω» и подсоедините концы щупов к измеряемому сопротивлению.

Таблица 2

Поддиапазон измерений	Погрешность измерения	Разрешающая способность
4 В	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 5 \text{ digits}$	1 мВ
40 В	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 5 \text{ digits}$	10 мВ
400 В	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 5 \text{ digits}$	0,1 В
750 В	$\pm 1,5 \% \text{ of rdg} \pm 5 \text{ digits}$	1 В

Когда цепь разомкнута, на индикаторе будет индизироваться «0L».

Перед измерением сопротивлений в схеме убедитесь, что схема обесточена и все конденсаторы разряжены.

Некоторые характеристики используемого мультиметра при измерении сопротивлений представлены в табл. 3

Таблица 3

Поддиапазон измерений	Погрешность измерения	Разрешающая способность
400 Ом	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	0.1 Ом
4 кОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	1 Ом
40 кОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	10 Ом
400 кОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	100 Ом
4 МОм	$\pm 1,2 \% \text{ of rdg} \pm 3 \text{ digits}$	1 кОм
40 МОм	$\pm 3,0 \% \text{ of rdg} \pm 5 \text{ digits}$	10 кОм

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучение паспортных характеристик стрелочных электроизмерительных приборов. Для этого внимательно рассмотреть лицевые панели стрелочных амперметров и заполнить табл. 4.

Таблица 4

Характеристика электроизмерительного прибора			
Наименование прибора	Амперметр	Вольтметр	Ваттметр
Система измерительного механизма			
Предсл измерения			
Число делений шкалы			
Цена деления			
Минимальное значение измеряемой величины			
Класс точности			
Допустимая максимальная абсолютная погрешность			
Род тока			
Нормальное положение шкалы			
Прочие характеристики			

3.2. Построить график зависимости относительной погрешности измерения от измеряемой величины $\gamma_{\text{изм}} = f(A_{\text{изм}})$ для прибора, указанного преподавателем. Сделать вывод о величине относительной погрешности измерения в начальной и конечной части шкалы, о характере изменения погрешности вдоль шкалы прибора.

3.3. Ознакомиться с лицевой панелью мультиметра и зарисовать её.

3.4. Подготовить мультиметр для измерения постоянного напряжения. Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF модуля питания) и источник постоянного напряжения. Измерить значения выходных напряжений модуля питания на клеммах «+5 В», «+12 В» и «-12 В» относительно общей клеммы. Результаты измерений занести в табл. 5. Выключить источник постоянного напряжения.

Таблица 5

Клеммы	+5 В	+12 В	-12 В	~12 В	~220 В
Измерено					

3.5. Подготовить мультиметр для измерения переменного напряжения. Включить источник питания и мультиметром измерить значения выходных напряжений на клеммах «~12 В» и «~220 В». Результаты измерений занести в табл. 5. Выключить источник трехфазного напряжения.

3.6. Подготовить мультиметр для измерения сопротивлений резисторов. Измерить значения сопротивлений резисторов, указанных преподавателем. Результаты занести в табл. 6.

Таблица 6

Резистор	R1	R2	R3	R4
Номинальное значение сопротивления, Ом	5	10	20	30
Измерено, Ом				

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные измерительных приборов;
- в) график зависимости относительной погрешности измерений $\gamma_{\text{изм}} = f(A_{\text{изм}})$;
- г) результаты измерений;
- д) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем?
2. Что такое предел измерения?
3. Как определяется цена деления прибора?
4. Что такое абсолютная и относительная погрешности измерения?
5. Что характеризует класс точности прибора?
6. В какой части шкалы прибора измерение точнее и почему?
7. Каковы основные достоинства цифровых измерительных приборов?

Работа № 2. ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Получение навыков сборки простых электрических цепей, включения в электрическую цепь измерительных приборов. Научиться измерять токи и напряжения, убедиться в соблюдении законов Ома и Кирхгофа в линейной электрической цепи.

2. Пояснения к работе

Электрическая цепь, состоящая из элементов, вольтамперные характеристики которых являются прямыми линиями, называется линейной электрической цепью, а элементы, из которых состоит цепь, – линейными элементами.

Соединение в электрической цепи, при котором через все элементы протекает один и тот же ток, называется последовательным соединением. Эквивалентное сопротивление R_{Σ} последовательной цепи постоянного тока равно сумме сопротивлений отдельных участков: $R_{\Sigma} = R_1 + R_2$.

Напряжение на отдельном участке в соответствии с законом Ома пропорционально сопротивлению этого участка: $U_1 = I R_1$; $U_2 = I R_2$.

Напряжение U на входе последовательной цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа равно сумме напряжений на отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2.$$

При параллельном соединении двух или нескольких элементов напряжение на них одно и то же, так как выводы этих элементов подключены к одним и тем же узлам. Токи в отдельных элементах определяются по закону Ома: $I_1 = U / R_1$; $I_2 = U / R_2$.

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток I в неразветвленной части цепи равен сумме токов всех параллельных ветвей: $I = I_1 + I_2$.

Проводимость параллельного соединения равна сумме проводимостей отдельных участков: $1/R_{\Sigma} = 1/R_1 + 1/R_2$.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль измерительный, модуль мультиметров, измеритель мощности) и собрать линейную электрическую цепь с последовательным соединением резисторов (рис. 1). Установить заданные преподавателем значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 . Представить схему для проверки преподавателю.

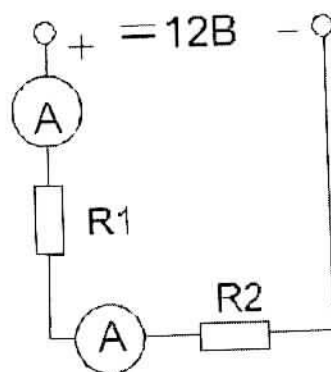


Рис. 1

3.2. Включить электропитание стенда (автоматический выключатель QF1 модуля питания и выключатель SA2 этого же модуля). Измерить ток в цепи, величину напряжения питания и напряжения на резисторах R_1 и R_2 в схеме с последовательным соединением резисторов R_1 и R_2 . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить питание.

3.3. Собрать линейную цепь со смешанным соединением резисторов (рис. 2). Установить заданные значения резисторов R_1 , R_2 и R_3 . Включить питание и измерить напряжения и токи на всех участках цепи, мощность, потребляемую цепью. Результаты занести в табл. 1.

3.5. Выключить источник электропитания, и используя мультиметр в режиме измерения сопротивления измерить значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 . Результаты измерений занести в табл. 2.

3.6. Используя закон Ома, вычислить значения сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 , значения которых занести в табл. 2.

3.7. Проверить выполнение баланса мощностей.

Сделать выводы о выполнении 1-го и 2-го законов Кирхгофа и о применении закона Ома в линейной цепи постоянного тока.

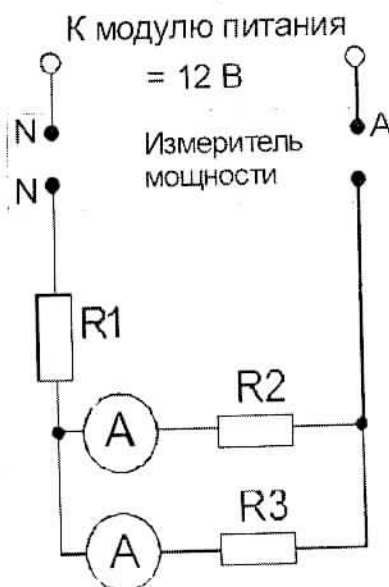


Рис.2

Таблица 1

U, В	Последовательное соединение				Смешанное соединение						
	U1, В	U2, В	I1, А	I2, А	U1, В	U2, В	U3, В	I1, А	I2, А	I3, А	P, Вт

Таблица 2

	Измерено омметром	Вычислено
R_1 , Ом		
R_2 , Ом		
R_3 , Ом		

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование работы и цель работы;
- технические данные измерительных приборов;
- схемы экспериментов и таблицы полученных экспериментальных данных;
- результаты расчетов;
- выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- Что такое «линейный элемент» в электрической цепи?
- Привести примеры линейных элементов электрических цепей.
- На основании какого закона по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи постоянного тока?
- В каких единицах измеряются сила тока, напряжение и сопротивление?
- Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.
- Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.

Работа № 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Приобретение навыков определения параметров элементов в цепях переменного тока по результатам измерений, включения в цепь вольтметра и амперметра, измерения тока и напряжения, применения закона Ома в цепи переменного тока.

2. Пояснения к работе

При расчете цепей переменного тока, в отличие от цепей постоянного тока, необходимо учитывать не один, а три простейших пассивных элемента: резистивный, индуктивный и емкостной, которые характеризуются соответственно параметрами: активным сопротивлением R , индуктивностью L (индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$) и емкостью C (емкостным сопротивлением $X_C = 1/\omega C$), где ω – угловая частота.

В реальной цепи сопротивлением обладают не только резистор или реостат как устройства, предназначенные для использования их электрических сопротивлений, но и любой проводник, катушка, конденсатор, обмотка любого электромагнитного элемента и др. Общим свойством всех устройств, обладающих электрическим сопротивлением, является необратимое преобразование электрической энергии в тепловую энергию. При токе i в резисторе, обладающим сопротивлением r за время dt в соответствии с законом Джоуля – Ленца выделяется энергия $dw = ri^2 dt$.

Тепловая энергия, выделяемая в сопротивлении, полезно используется или рассеивается в пространстве. Но поскольку преобразование электрической энергии в тепловую энергию в пассивном элементе носит необратимый характер, то в схеме замещения во всех случаях, когда необходимо учесть необратимое преобразование энергии, включается сопротивление. В реальном устройстве, например, в электромагните, электрическая энергия может быть преобразована в механическую энергию (притяжение якоря), но в схеме замещения это устройство заменяется сопротивлением, в котором выделяется эквивалентное количество тепловой энергии. И при анализе схемы нам уже безразлично, что в действительности является потребителем энергии электромагнит или электроплитка.

В цепях переменного тока сопротивление называют активным, которое из-за явления поверхностного эффекта больше, чем электрическое сопротивление постоянному току. Однако при низких частотах этой разницей обычно пренебрегают.

Напряжение, подведенное к активному сопротивлению, по фазе совпадает с током, то есть напряжение и ток одновременно достигают максимальных значений и одновременно переходят через нуль. Если мгновенное значение тока имеет вид $i(t) = I_M \sin 2\pi ft$, то мгновенное значение напряжения будет $u_R(t) = U_M \sin 2\pi ft$.

Индуктивность L характеризует свойство участка цепи или катушки накапливать энергию магнитного поля. В реальной цепи индуктивностью обладают не только индуктивные катушки как элементы цепи, предназначенные

для использования их индуктивности, но и провода, и выводы конденсаторов, и реостаты. В целях упрощения обычно считают, что энергия магнитного поля сосредотачивается только в катушках.

При протекании переменного тока $i(t)$ через катушку индуктивности, состоящей из w витков, возбуждается переменный магнитный поток $\Phi(t)$, который в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в ней же э.д.с. самоиндукции $e_L = -w d\Phi/dt = -L di/dt$. Следовательно, индуктивность в цепи переменного тока влияет на величину протекающего тока как сопротивление. Соответствующая расчетная величина называется индуктивным сопротивлением и обозначается X_L и измеряется так же, как и активное сопротивление — в Омах.

Чем выше частота переменного тока, тем больше э.д.с. самоиндукции и тем больше индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi f L$. Величина $\omega = 2\pi f$ называется угловой частотой переменного тока.

В цепи постоянного тока в установившемся режиме индуктивность не влияет на режим работы цепи, так как э.д.с. самоиндукции равна нулю.

Поскольку э.д.с. самоиндукции возникает только при изменении тока, то и максимальные значения э.д.с. наступают при максимальной скорости изменения тока в катушке, то есть при прохождении тока через нуль. Поэтому на участке цепи с индуктивностью э.д.с. самоиндукции по времени отстает от тока на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Напряжение на индуктивности, будучи противоположным по направлению э.д.с., наоборот, опережает ток на четверть периода или на $\pi/2$ электрических радиана. Если по катушке проходит ток, мгновенное значение которого $i(t) = I_M \sin 2\pi f t$, то мгновенное значение напряжения на индуктивности $u_L(t) = U_M \sin (2\pi f t + \pi/2) = X_L I_M \sin (2\pi f t + \pi/2)$. Когда напряжение, изменяясь синусоидально, достигает максимума, ток в это мгновение равен нулю. Если напряжение на зажимах элемента цепи опережает ток на $\pi/2$ радиана, то говорят, что такой элемент представляет собой идеальную катушку индуктивности или чисто реактивное индуктивное сопротивление X_L . Это сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение магнитного поля в индуктивности и является линейной функцией частоты.

При включении в цепь переменного тока реальной катушки (рис. 1), обладающей кроме индуктивности L и некоторым значением активного сопротивления R , ток отстает по фазе от напряжения на некоторый угол $\varphi < \pi/2$, который легко определяется из треугольника сопротивлений (рис. 3): $\operatorname{tg} \varphi = X_L / R$. Для такого участка электрической цепи уравнение на основании второго закона Кирхгофа имеет вид:

$$u = u_R + u_L = Ri + L di/dt.$$

В напряжении, подведенном к реальной катушке, условно можно выделить две составляющих: падение напряжения Ri на активном сопротивлении, обычно называемое активной составляющей приложенного напряжения, и напряжение на идеальной индуктивности $u_L = L di/dt$, называемое реактивной составляющей приложенного напряжения. Фазовые соотношения между этими составляющими обычно иллюстрируют векторной диаграммой для их действующих значений (рис. 2).

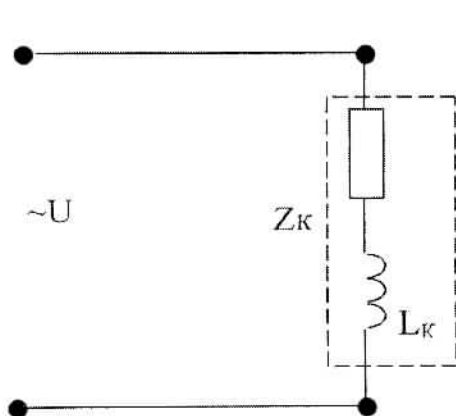


Рис. 1

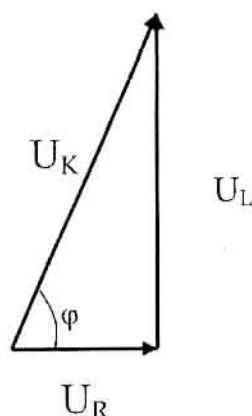


Рис. 2

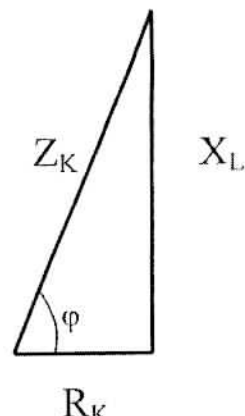


Рис. 3

Из векторной диаграммы видно, что

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = I Z,$$

где $Z = U_M / I_M = U / I = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ — полное электрическое сопротивление реальной катушки. Из треугольника сопротивлений (рис. 3) следует, что

$$R = Z \cos \varphi, X_L = Z \sin \varphi, \varphi = \arctg X_L / R.$$

Закон Ома для цепи, по которой протекает переменный ток, записывается в виде $I = U / Z$.

Из рассмотренного следует важный вывод: **сопротивления в цепи переменного тока складываются в общем случае геометрически**. Например, если у катушки $R=3$ Ома и $X_L=4$ Ома, то $Z=5$ Ом.

Емкость, измеряемая в фарадах (Ф), характеризует способность элемента электрической цепи или конденсатора накапливать энергию электрического поля. В реальной цепи емкость существует не только в конденсаторах, как элементах предназначенных специально для использования их емкости, ноли между проводниками, между витками катушек (межвитковая емкость), между проводом и землей или каркасом электротехнического устройства. Однако в схемах замещения принято, что емкостью обладают только конденсаторы.

В конденсаторе, точнее в диэлектрике, разделяющем пластины или проводники конденсатора, может существовать ток электрического смещения, в точности равный току проводимости в проводниках, присоединенных к обкладкам конденсатора: $i = dq / dt$, где q — заряд на обкладках конденсатора, измеряемый в кулонах и пропорциональный напряжению на конденсаторе U_C :

$$q = C U_C, \text{ и при } C = \text{const} \quad dq = C dU_C.$$

Тогда ток, проходящий через конденсатор, $i = C dU_C / dt$, а энергия электрического поля, запасаемая в конденсаторе при возрастании напряжения, $W = C U_C^2 / 2$.

Очевидно, что при постоянном напряжении $dU_C / dt = 0$ и постоянный ток через конденсатор проходить не может. При изменении напряжения на обкладках конденсатора через него протекает емкостной ток. Чем быстрее изменяется напряжение, тем больше величина емкостного тока. Если приложить к конденсатору переменное синусоидальное напряжение, то через конденсатор потечет переменный синусоидальный ток, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ по отношению к напряжению. Это происходит потому, что емкостной ток достигает максимального значения при максимальном изменении напряжения, т.е. при

прохождении напряжения через нуль. Ток при этом опережает напряжение по фазе на $\pi/2$. Если мгновенное значение тока, протекаемого через конденсатор $i(t) = I_M \sin 2\pi ft$, то мгновенное значение напряжения на нем

$$u_C(t) = U_M \sin(2\pi ft - \pi/2) = X_C I_M \sin(2\pi ft - \pi/2),$$

где X_C – реактивное емкостное сопротивление. Векторная диаграмма для участка электрической цепи, содержащей конденсатор, изображена на рис. 4.

Величина $X_C = 1/2\pi fC = 1/\omega C = U_{Cm} / I_m = U_C / I$ называется реактивным емкостным сопротивлением. Это сопротивление учитывает реакцию электрической цепи на изменение электрического поля в конденсаторе и является обратно пропорциональной функцией частоты.

Закон Ома для участка электрической цепи с конденсатором $I = U_C / X_C$, где I – действующее значение тока, протекаемого через конденсатор, U_C – действующее значение напряжения на конденсаторе.

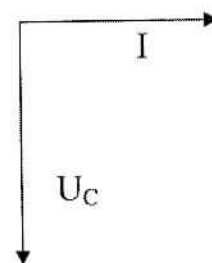


Рис. 4

Электрическая цепь переменного тока характеризуется активной, реактивной и полной мощностью. Активная мощность P , измеряемая в ваттах (Вт), равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение ток I и на $\cos \varphi$, называемый коэффициентом мощности, или произведению квадрата действующего значения тока на активное сопротивление:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R.$$

Реактивная мощность Q , измеряемая в вольт-амперах реактивных (Вар), равна произведению действующего значения напряжения U на действующее значение тока I и на $\sin \varphi$ или произведению квадрата действующего значения тока на реактивное сопротивление:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X.$$

Полная мощность S , измеряемая в вольт-амперах (ВА), равна произведению действующего значения тока I на действующее значение напряжения U :

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

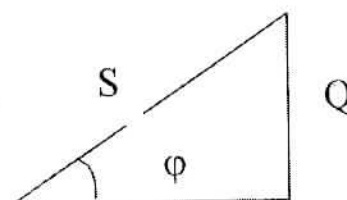


Рис. 5

Соотношения этих мощностей иллюстрируются треугольником мощностей (рис. 5).

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль амперметров переменного тока).

3.2. Установить на мультиметре режим измерения сопротивления, подключить его выводы параллельно резистору R_1 модуля резисторов и провести измерение значений его сопротивлений. Результат записать в табл. 1.

Таблица 1

Установлено	5 Ом	10 Ом	20 Ом	30 Ом	40 Ом	50 Ом
Измерено						

3.3. Аналогично п. 3.2 провести измерение активного сопротивления R_K реальной катушки индуктивности Z_K . Результат записать в табл. 2.

Таблица 2

$R_K, \text{Ом}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$Z_K = U/I, \text{Ом}$	$X_K, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$

3.4. Собрать электрическую цепь для определения полного сопротивления катушки (рис. 6), используя мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.5. Включить цепь и записать в табл. 2 показания амперметра и вольтметра (мультиметра).

3.6. Собрать электрическую цепь для определения емкостного сопротивления (рис. 7), используя мультиметр в режиме измерения переменного напряжения. Установить с помощью переключателя SA1 модуля реактивных элементов заданное преподавателем значение емкости конденсатора. Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.7. Включить цепь и записать в табл. 3 показания амперметра и вольтметра, устанавливая поочередно заданные значения емкостей $C1$, $C2$ и $C3$.

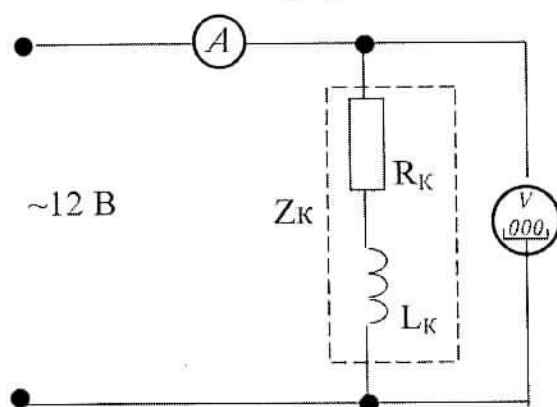


Рис. 6

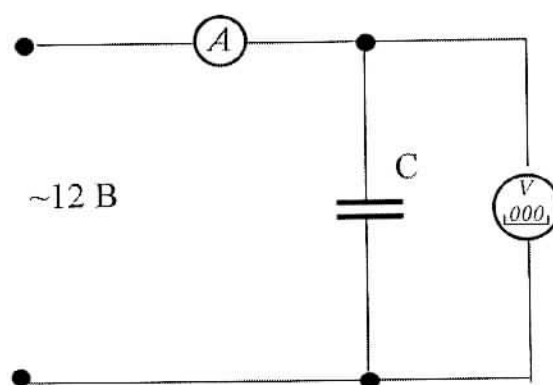


Рис. 7

Таблица 3

Включено	$C1$	$C2$	$C3$
$U, \text{В}$			
$I, \text{А}$			
$X_C, \text{Ом}$			
$C, \text{мкФ}$			

3.8. Рассчитать, используя закон Ома, полное сопротивление реальной индуктивности Z_K .

3.9. Рассчитать, используя закон Ома, емкостные сопротивления X_C . Результаты записать в табл. 2.

3.10. Считая, что частота сети $f = 50 \text{ Гц}$, определить величину индуктивности реальной катушки L и емкостей конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$. Результаты занести в соответствующие таблицы.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы опытов;
- в) таблицы с результатами опытов и вычислений;
- г) расчетные соотношения;
- д) векторные диаграммы для резистора, реальной катушки и конденсатора;
- е) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- 1. В каких единицах измеряется ток, напряжение, сопротивление?
- 2. Что такое Ом, Ампер, Вольт?
- 3. Что такое «полное сопротивление»?
- 4. Что такое «активное сопротивление»?
- 5. Что такое «реактивное индуктивное сопротивление» и как оно определяется?
- 6. Что такое «реактивное емкостное сопротивление» и как оно определяется?
- 7. Какая связь между полным, активным и реактивным сопротивлениями цепи переменного тока?
- 8. Как формулируется закон Ома для цепи переменного тока?
- 9. Может ли через конденсатор протекать постоянный ток?

Работа № 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

Приобретение навыков сборки простых электрических цепей, измерение напряжений на отдельных участках цепи, изучение свойств цепей при последовательном соединении активных и реактивных элементов, знакомство с явлением резонанса напряжений, построение векторных диаграмм.

2. Пояснения к работе

Электрическая цепь синусоидального переменного тока с последовательным соединением резистора с активным сопротивлением R , реальной катушки индуктивности с полным сопротивлением Z_K (R_K, X_K) и конденсатора с емкостным сопротивлением X_C (рис. 1) описывается уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений напряжений на этих элементах:

$$u_R + u_K + u_C = u(t)$$

или в геометрической форме для векторов действующих значений этих напряжений

$$\bar{U}_R + \bar{U}_K + \bar{U}_C = \bar{U}.$$

Последнее соотношение говорит о том, что вектор действующего значения напряжения, приложенного к такой цепи, равен геометрической сумме векторов напряжений на отдельных её участках (рис. 2).

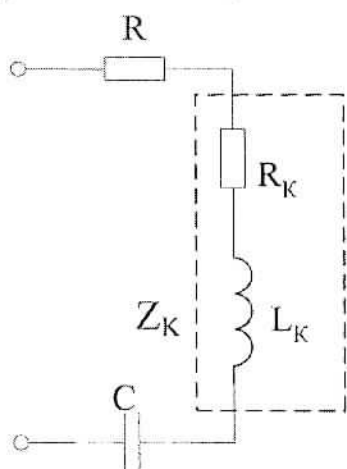


Рис. 1

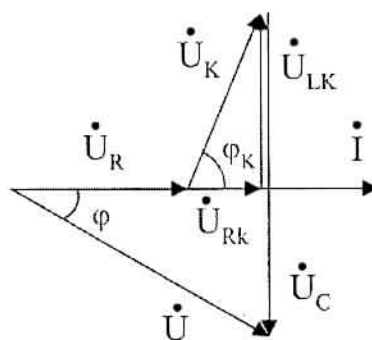


Рис. 2

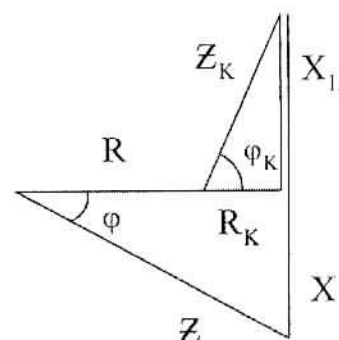


Рис. 3

Из анализа векторной диаграммы для такой цепи следует, что величина входного напряжения

$$U = \sqrt{(U_R + U_{RK})^2 + (U_{LK} - U_C)^2} = \sqrt{(IR + IR_K)^2 + (IX_L - IX_C)^2} = I \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где U_{RK} , U_{LK} – соответственно активная и реактивная составляющие напряжения на катушке, R_K , X_L – активное и реактивное индуктивное сопротивление катушки индуктивности.

Следовательно, действующее значение тока в этой цепи на основании закона Ома можно определить как

$$I = U / Z = U / \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где $Z = \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R + R_K)^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ – полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки индуктивности и конденсатора, которое легко определяется из многоугольника сопротивлений (рис. 3).

Угол сдвига фаз между входным синусоидальным напряжением U и потребляемым такой цепью током I определяется из треугольника сопротивлений

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1/\omega C) / (R + R_K).$$

Если $\omega L > 1/\omega C$ и угол $\varphi > 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и идеальной индуктивностью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-индуктивный характер.

Если $\omega L < 1/\omega C$ и угол $\varphi < 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и емкостью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-емкостной характер.

Если в цепи реактивные сопротивления равны ($\omega L = 1/\omega C$), то угол $\varphi = 0$. При этом реактивная составляющая напряжения на индуктивности и напряжение на конденсаторе полностью себя компенсируют. Цепь ведет себя, как будто реактивные сопротивления в ней отсутствуют и ток достигает наибольшего значения, поскольку ток ограничивается только эквивалентным активным сопротивлением цепи

$$R_{\Sigma} = R + R_K.$$

Это означает, что в цепи имеет место резонанс, называемый в данном случае *резонансом напряжений*. Резонанс напряжений можно получить либо изменением частоты источника питания, либо подбором значения величины $C = 1/\omega_0^2 L$, где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота цепи.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль амперметров переменного тока, ваттметр).

3.2. Собрать электрическую цепь (рис. 4), установив заданные преподавателем значений сопротивления резистора и емкости конденсатора. Подключить собранную цепь к источнику питания ~12 В (модуль питания).

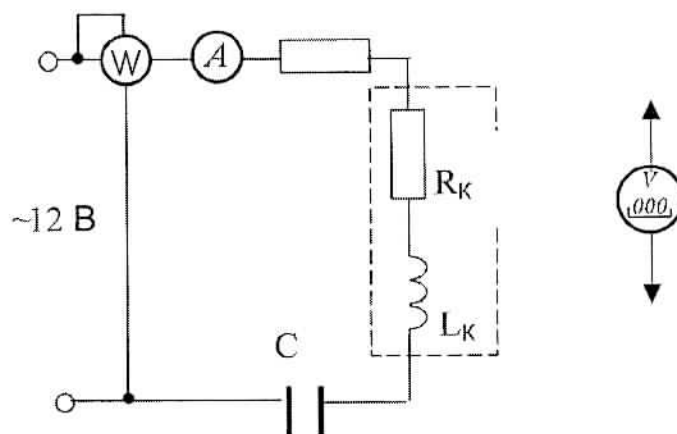


Рис. 4.

3.3. Подсоединить параллельно конденсатору дополнительный проводник (исключив этим конденсатор из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.4. Включить питание стенда и произвести измерения указанных в таблице величин в цепи с последовательным соединением резистора R и катушки Z_K . Перед измерением напряжения перевести мультиметр в режим измерения переменного напряжения. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Схема	$U, В$	$I, А$	$U_R, В$	$U_K, В$	$U_C, В$	$P, Вт$
Z_K, R						
R, X_C						
R, Z_K, X_C1						
R, Z_K, X_C2						
R, Z_K, X_C3						

3.5. Выключить электропитание, подсоединить параллельно катушке дополнительный проводник (исключив этим катушку из цепи). Предъявить схему для проверки преподавателю.

3.6. Включить источник электропитания и произвести измерения указанных в таблице величин для цепи с последовательным соединением резистора R и конденсатора X_C . Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание, убрать дополнительный проводник.

3.7. В цепи с последовательным соединением резистора, катушки и конденсатора изменяя величину емкости конденсатора с помощью переключателя $SA1$ модуля реактивных элементов, добиться наибольшего показания амперметра, т.е. обеспечить состояние цепи близкое к резонансу напряжений. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.8. Уменьшая и увеличивая величину емкости конденсатора (от резонансного значения) провести измерения указанных в таблице величин для двух состояний цепи. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.9. Для цепи с последовательным соединением трех элементов (R, Z_K, C) по результатам измерений определить полную мощность цепи S и отдельных участков S_R, S_K, S_C . Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

$S, ВА$	$S_R, ВА$	$S_K, ВА$	$S_C, ВА$	$P_R, Вт$	$P_K, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_K, ВАр$	$Q_C, ВАр$	$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$

3.10. Учитывая значения параметров катушки, полученные в предшествующей лабораторной работе, определить активные и реактивные мощности отдельных участков, а также полное, активное и реактивное сопротивление всей цепи для одного из опытов. Результаты занести в табл. 2.

3.11. Проверить баланс активных мощностей в цепи.

3.12. По результатам измерений построить для исследованных цепей в масштабе векторные диаграммы.

Следовательно, действующее значение тока в этой цепи на основании закона Ома можно определить как

$$I = U / Z = U / \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где $Z = \sqrt{(R + R_K)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R + R_K)^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ – полное сопротивление цепи с последовательным соединением резистора, реальной катушки индуктивности и конденсатора, которое легко определяется из многоугольника сопротивлений (рис. 3).

Угол сдвига фаз между входным синусоидальным напряжением U и потребляемым такой цепью током I определяется из треугольника сопротивлений

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1/\omega C) / (R + R_K).$$

Если $\omega L > 1/\omega C$ и угол $\varphi > 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и идеальной индуктивностью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-индуктивный характер.

Если $\omega L < 1/\omega C$ и угол $\varphi < 0$, вся цепь ведет себя как цепь с активным сопротивлением и емкостью. Говорят, что в этом случае цепь носит активно-емкостной характер.

Если в цепи реактивные сопротивления равны ($\omega L = 1/\omega C$), то угол $\varphi = 0$. При этом реактивная составляющая напряжения на индуктивности и напряжение на конденсаторе полностью себя компенсируют. Цепь ведет себя, как будто реактивные сопротивления в ней отсутствуют и ток достигает наибольшего значения, поскольку ток ограничивается только эквивалентным активным сопротивлением цепи

$$R_{\Sigma} = R + R_K.$$

Это означает, что в цепи имеет место резонанс, называемый в данном случае *резонансом напряжений*. Резонанс напряжений можно получить либо изменением частоты источника питания, либо подбором значения величины $C = 1/\omega_0^2 L$, где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота цепи.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль измерительный с амперметрами переменного тока, измеритель мощности).

3.2. Собрать электрическую цепь (рис. 4), установив заданные значения сопротивления резистора и емкости конденсатора. Подключить собранную цепь к источнику питания ~12 В (модуль питания).

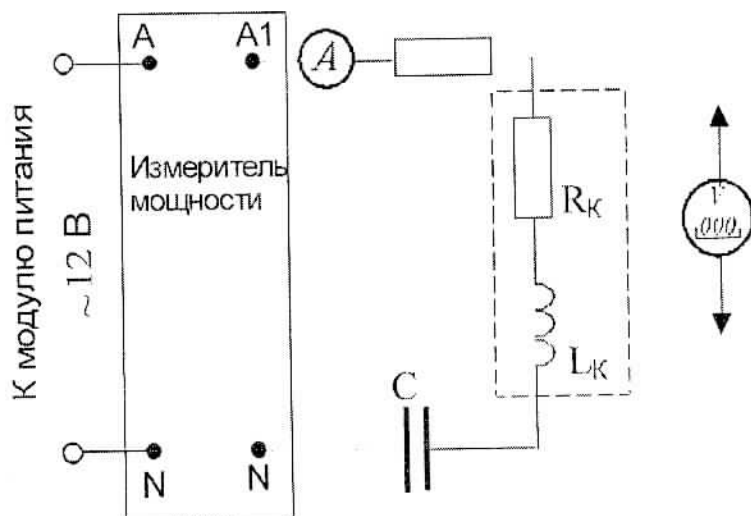


Рис. 4.

Работа № 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Цель работы

Ознакомиться с особенностями параллельного соединения активных и реактивных элементов в цепи переменного тока, явлением резонанса токов, повышением коэффициента мощности, применением 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

2. Пояснения к работе

При параллельном соединении элементов получают разветвленную цепь (рис. 1). При параллельном соединении элементов токи в отдельных ветвях, зависят только от напряжения источника питания и полного сопротивления каждой ветви. При этом ток в ветви с резистором I_R совпадает по фазе с напряжением источника, ток в ветви с катушкой I_K отстает по фазе от напряжения источника питания на угол φ , зависящий от активного и реактивного сопротивления реальной катушки индуктивности. Ток в ветви с конденсатором I_C опережает напряжение источника питания на 90° (рис. 2). В соответствии с первым законом Кирхгофа общий ток I , потребляемый такой цепью от источника питания, определяется геометрической суммой токов отдельных ветвей:

$$\vec{I} = \vec{I}_R + \vec{I}_K + \vec{I}_C.$$

Геометрическое построение для определения величины и фазы общего тока представлено на рис. 2, где обозначено

I_{KA}, I_A — активные составляющие тока в ветви с катушкой и общего тока;

I_{KP}, I_P — реактивные составляющие тока в ветви с катушкой и общего тока.

Под активной составляющей тока понимают условную составляющую этого тока, совпадающую по фазе с приложенным к этому участку напряжением. Под реактивной составляющей тока — составляющую, расположенную под 90° к приложенному напряжению. Следует помнить, что активная и реактивная составляющие тока — это условные величины, не имеющие физического смысла в последовательной схеме замещения.

Из векторной диаграммы следует, что

$$I_A = I_R + I_{KA}, \quad I_P = I_{KP} - I_C.$$

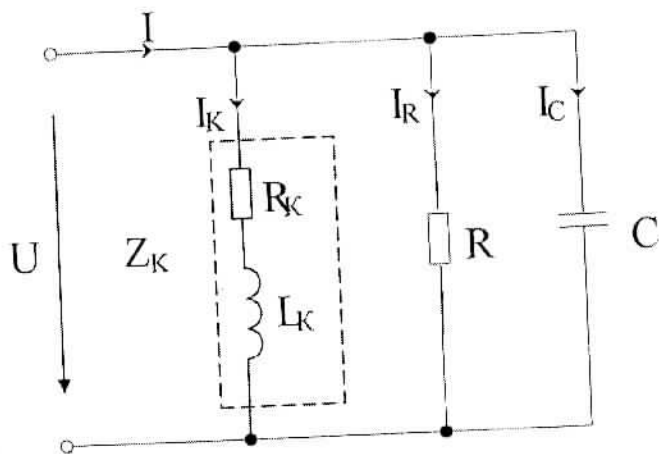


Рис. 1

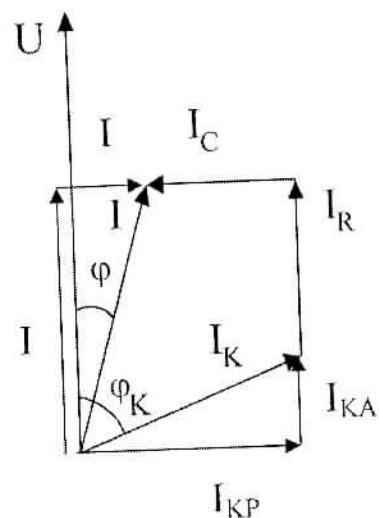


Рис. 2

Следовательно, величина общего тока

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_P^2},$$

а угол сдвига фаз между общим током и приложенным напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = I_P / I_A = (I_{KP} - I_C) / (I_R + I_{KA}).$$

Данная векторная диаграмма построена в предположении, что емкостной ток I_C оказался меньше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} . Поэтому общий ток отстает по фазе от напряжения. Такая цепь носит активно-индуктивный характер. Если бы емкостной ток I_C был больше реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} , то ток, потребляемый цепью из сети опережал по фазе приложенное напряжение и цепь носила бы активно-емкостной характер.

При равенстве реактивной индуктивной составляющей тока в катушке I_{KP} и емкостного тока I_C вектор общего тока совпадает по фазе с вектором приложенного напряжения, а его величина определяется только активными составляющими токов $I_A = I_R + I_{KA}$. При этом в цепи наступает явление резонанса токов, так как цепь, содержащая реактивные элементы, ведет себя как цепь с чисто активным сопротивлением. При резонансе токов токи в ветвях с реактивными элементами могут значительно превышать ток, потребляемый от источника питания.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль резисторов, модуль реактивных элементов, модуль измерительный с амперметрами переменного тока, измеритель мощности).

3.2. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора, катушки и конденсатора (рис. 3), установив при этом заданные преподавателем значения сопротивления резистора и емкости конденсатора. Включение отдельных ветвей осуществлять с помощью соответствующих проводников. Схему предъявить для проверки преподавателю.

3.3. Включив электропитание (автоматический выключатель QF модуля питания) исследовать цепь. Для этого измерить напряжение на входе цепи, активную мощность цепи, токи в ветвях и ток, потребляемый от источника питания. Результаты измерений занести в табл. 1.

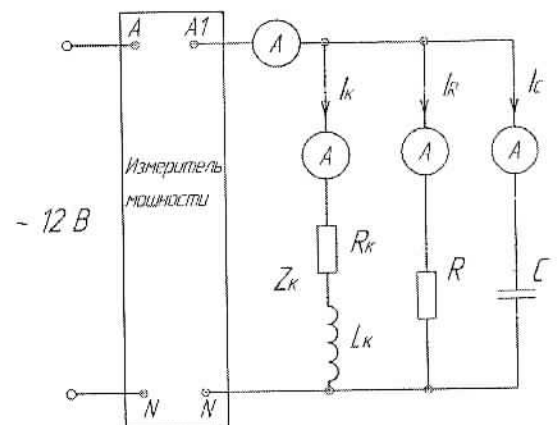


Рис. 3

3.4. Исследовать влияние емкости, включенной параллельно индуктивной катушке, на величину потребляемого от источника питания тока. Для этого подключить параллельно катушке конденсатор C . Установить такое значение емкости, при котором от источника потребляется минимальный ток (резонанс

токов). Измерить при этом токи в ветвях и ток, потребляемый из сети. Результаты занести в табл. 1.

Изменить значение емкости конденсатора и измерить токи, напряжение и активную мощность. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Включены ветви	U, В	I, А	I_R , А	I_C , А	I_K , А	P, Вт	φ
R				-----	-----		
C			-----		-----		
Z_k			-----	-----			
R, C				-----			
R, Z_k							
R, Z_k , C,							
Z_k , C1			-----				
Z_k , C2			-----				
Z_k , C3			-----				

3.5. По опытным данным построить в масштабе векторные диаграммы для каждого опыта, определить для каждого случая угол сдвига фаз φ между напряжением и потребляемым током.

3.6. Сделать выводы

- о применении 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.
- о влиянии параллельно включенных потребителей друг на друга,
- о влиянии емкости конденсатора на величину тока, потребляемого из сети.

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) схему эксперимента и таблицу полученных результатов;
- в) векторные диаграммы;
- г) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Как при параллельном включении потребителей определить величину тока, потребляемого из сети?
2. С какой целью повышают коэффициент мощности цепи?
3. Как можно определить коэффициент мощности цепи?
4. Как изменятся величина тока, потребляемого из сети, и активная мощность цепи, если параллельно активно-индуктивному потребителю включить конденсатор?
5. Почему уменьшается ток, потребляемый из сети, при подключении параллельно индуктивной катушке конденсатора?
6. Как применяется 1-й закон Кирхгофа в цепях переменного тока?
7. Как построить векторную диаграмму для цепи, содержащей параллельно включенные индуктивную катушку и конденсатор?
8. Что такое «резонанс токов»?

Работа № 6. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

1. Цель работы

Ознакомиться с трехфазными системами, измерением фазных и линейных токов и напряжений. Проверить основные соотношения между токами и напряжениями симметричного и несимметричного трехфазного потребителя. Выяснить роль нейтрального провода в четырехпроводной трехфазной системе. Научиться строить векторные диаграммы напряжений и токов.

2. Пояснения к работе

Трехфазная система переменного тока получила широкое применение, т. к. имеет ряд преимуществ по сравнению с системой однофазного переменного тока. Поэтому чаще всего электрическая энергия вырабатывается, передается и распределяется между потребителями трехфазными системами. Подавляющее большинство электродвигателей является двигателями трехфазного переменного тока.

Чтобы в трехфазной системе можно было одновременно пользоваться двумя различными напряжениями (например, 380 В – для питания электродвигателей и 220 В – для питания электрических ламп и других однофазных потребителей) применяют четырехпроводную систему электроснабжения. Четырехпроводная линия трехфазной системы имеет четыре провода: три линейных, по которым протекают линейные токи I_A , I_B , I_C и один нулевой (нейтральный) провод, предназначенный для поддержания одинаковых значений фазных напряжений на всех трех фазах потребителя. По нулевому проводу может протекать уравнивающий ток I_0 , называемый нулевым или нейтральным током. Такая система соединения обмоток трехфазного генератора и приемников (потребителей) называется «звездой» и показана на рис. 1.

При соединении в звезду фазный ток I_ϕ и линейный ток I_L есть оно и тоже:

$$I_\phi = I_L.$$

Напряжение между линейными проводами, называемое линейным напряжением (например, U_{AB}), оказывается в $\sqrt{3}$ раз больше, чем фазное напряжение источника питания U_A , U_B или U_C :

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi.$$

Если трехфазная система симметричная (все сопротивления и мощности фазных потребителей одинаковы), то по всем трем фазам протекают одинаковые по величине токи, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120° . Ток в нейтральном проводе при этом равен нулю. Напряжения на всех фазах потребителя также отличаются друг от друга только по начальной фазе на 120° (рис. 2).

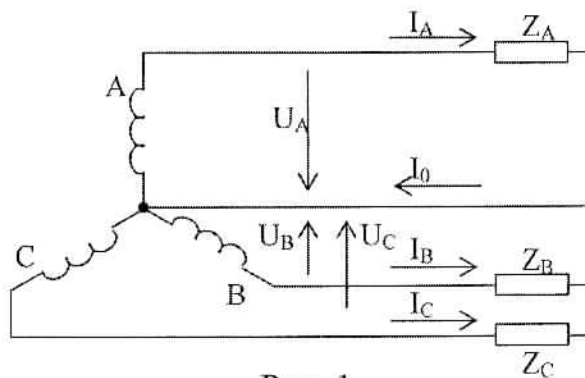
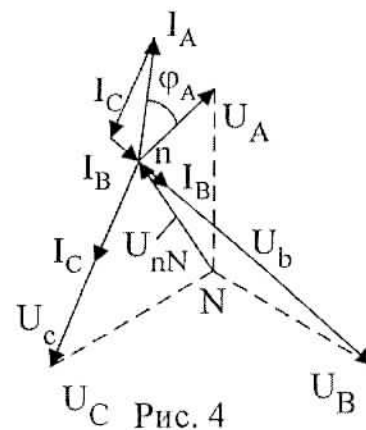
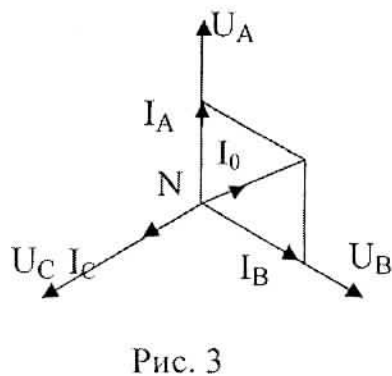
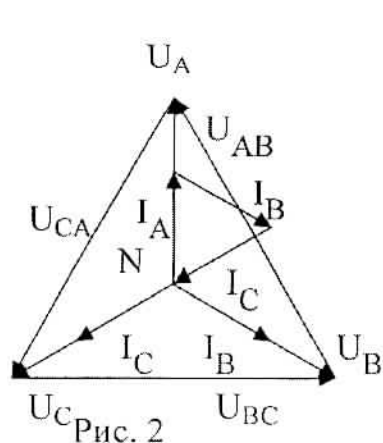


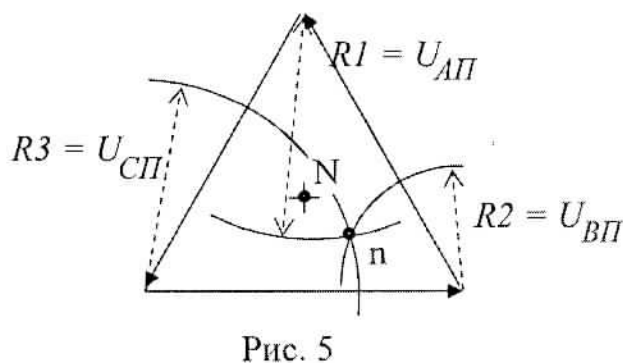
Рис. 1.



При включении в разных фазах различных по мощности потребителей (несимметричная нагрузка), токи каждой фазы (в каждом линейном проводе) отличаются друг от друга не только начальной фазой, но и величиной. По нейтральному проводу при этом протекает ток, вектор которого на основании первого закона Кирхгофа равен геометрической сумме векторов фазных токов (рис. 3)

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_0.$$

Обрыв нейтрального провода (трехпроводная система) при несимметричной нагрузке приводит к изменению напряжений на всех фазах потребителей и появлению напряжения смещения нейтрали U_{Nn} (рис. 4). Положение точки «п» на векторной диаграмме при измеренных значениях напряжений на фазах потребителей U_{Ap} , U_{Bp} и U_{Cp} может быть определено методом засечек (рис. 5) или рассчитано аналитически.



3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль трехфазного напряжения, модуль трехфазного трансформатора, модуль резисторов, модуль амперметров переменного тока, модуль мультиметров или модуль измерительный).

3.2. Установить на модуле трехфазного напряжения частоту питающего напряжения 50 Гц (переключатель SA2). Включить модуль питания стенда (выключатель QF1), модуль трехфазного напряжения (выключатель SA1 и тумблер SA3) и модуль трехфазного трансформатора (выключатель QF1). Измерить линейные и фазные напряжения трехфазного источника питания (трехфазного трансформатора) на холостом ходу. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить модуль трехфазного напряжения (кнопка SB1, выключатели SA1 и SA2).

Таблица 1

Линейные напряжения			Фазные напряжения			Вычислено		
U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_L , В	U_ϕ , В	U_L / U_ϕ

3.3. Собрать электрическую цепь (рис. 6). В качестве нагрузки использовать резисторы модуля резисторов. В качестве источника трехфазного напряжения использовать модуль трехфазного трансформатора.

3.4. Включить в фазах потребителя по указанию преподавателя одинаковые сопротивления резисторов (симметричную нагрузку). Измерить токи, фазные и линейные напряжения при включенном нейтральном проводе. Результаты занести в табл. 2. Проверить соотношение между линейными и фазными напряжениями потребителей.

3.5. Повторить те же измерения при отключенном нейтральном проводе. Результаты занести в табл. 2.

3.6. По указанию преподавателя изменить нагрузку в фазах потребителя так, чтобы в каждой фазе были включены различные сопротивления.

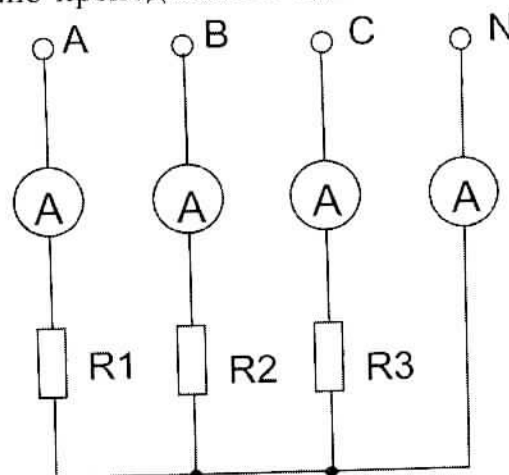


Рис. 6.

Измерить токи, линейные и фазные напряжения в каждой фазе потребителя при наличии нейтрального провода. Результаты записать в табл. 2.

3.7. Отключить нейтральный провод и вновь измерить токи и напряжения. Результаты записать в табл. 2.

3.8. По результатам измерений вычислить активную мощность трехфазной цепи для каждого опыта.

3.9. Для всех проведенных опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

3.10. Сравнить влияние нейтрального провода на работу трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузке.

Таблица 2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, А				Напряжение на потребителях, В					
	I_A	I_B	I_C	I_0	Фазные			Линейные		
					$U_{АП}$	$U_{ВП}$	$U_{СП}$	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Нейтральный провод включен, нагрузка симметричная										
Нейтральный провод выключен, нагрузка симметричная										
Нейтральный провод включен, нагрузка несимметричная										
Нейтральный провод выключен, нагрузка несимметричная										

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные электроизмерительных приборов;
- в) схему эксперимента с включенными измерительными приборами;
- г) таблицы с результатами эксперимента;
- д) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- е) вывод о роли нейтрального провода в трехфазной цепи при соединении потребителя по схеме звезда.

5 Контрольные вопросы

1. Какое соединение называется звездой?
2. Каково соотношение между фазным и линейным напряжениями трехфазного источника питания при соединении его обмоток по схеме звезда?
3. Какое соотношение между фазными и линейными токами при соединении в звезду?
4. Как определить величину тока в нейтральном проводе, если известны токи потребителя?
5. Для чего применяют нейтральный провод?
6. К каким зажимам следует подключить вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжение?
7. Какая трехфазная нагрузка называется симметричной?
8. Почему при несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода является аварийным режимом?

Работа № 7. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

1. Цель работы

Исследовать особенности работы трехфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.

2. Пояснения к работе

Потребители электрической энергии при питании от трехфазного источника, как и источники электрической энергии, могут быть соединены в треугольник

(рис. 1). Следует помнить, что схема включения обмоток трехфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в звезду нагрузка может быть соединена в звезду с нейтральным проводом, в звезду без нейтрального провода или в треугольник.

При соединении в треугольник симметричной трехфазной нагрузки линейные напряжения оказываются равными фазным напряжениям $U_\phi = U_\Delta$, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше, чем токи в фазах потребителя:

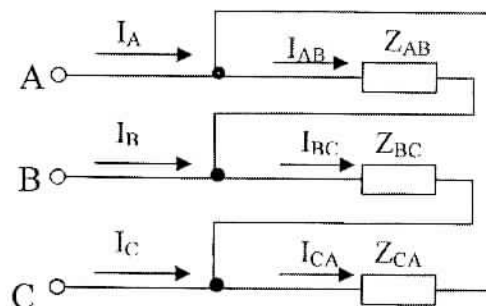
$$I_\Delta = \sqrt{3} I_\phi.$$

При этом все фазные токи равны по величине и отличаются друг от друга по фазе на 120° . То же самое относится и к линейным токам (рис. 2).

При несимметричной нагрузке связь между линейными и фазными токами выражается уравнениями, записанными на основании первого закона Кирхгофа в комплексной или векторной форме:

$$I_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

При соединении в треугольник нулевой провод отсутствует, но все фазные потребители в этом случае должны быть рассчитаны на номинальное линейное напряжение.



№

Рис. 1

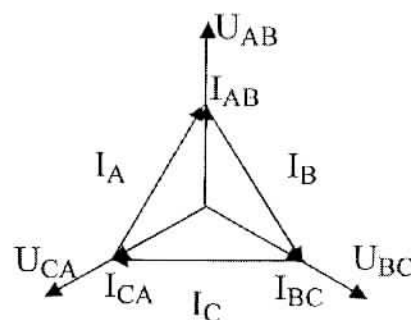


Рис. 2

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модули трехфазного напряжения и трехфазного трансформатора, модуль резисторов, модуль амперметров переменного тока, модуль мультиметров или модуль измерительный).

Установить на модуле трехфазного напряжения частоту питающего напряжения 50 Гц (переключатель SA2).

3.2. Включить модуль питания стенда (выключатель $QF1$), модуль трехфазного напряжения (выключатель $SA1$ и тумблер $SA3$) и модуль трехфазного трансформатора (выключатель $QF1$).

3.3. Измерить на модуле трехфазного трансформатора линейные напряжения источника питания в режиме холостого хода (при разомкнутой цепи). Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$

3.4. В соответствии с рис. 3. собрать схему соединений потребителей в треугольник. Предъявить схему для проверки. Установить в фазах потребителя по указанию преподавателя одинаковые значения сопротивлений резисторов (симметричную нагрузку). Измерить фазные и линейные токи. Результаты занести в табл. 2.

3.5. Разомкнуть поочередно линейный провод фазы «А» и фазы «В» и провести измерения фазного и линейных токов. Результаты занести в табл. 2.

3.6. Выключить нагрузку в фазе потребителя «АВ» и провести измерения фазного и линейных токов. Результаты занести в табл. 2.

3.7. По указанию преподавателя изменить нагрузку в фазах потребителя так, чтобы в каждой

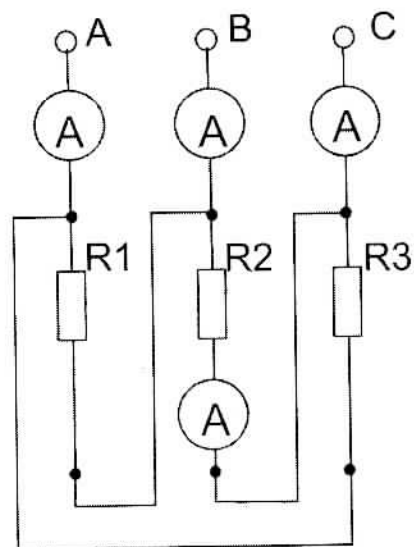


Рис. 3

фазе были включены различные значения сопротивлений. Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, А					
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
Симметричная нагрузка						
Обрыв линейного провода «А»						
Обрыв линейного провода «В»						
Обрыв фазы потребителя «АВ»						
Несимметричная нагрузка						

3.8. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

3.9. Сравнить результаты измерений линейных и фазных токов при соединении в треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.

3.10. Проанализировать влияние обрыва линейного провода на режим работы потребителей.

3.11. Сравнить режимы работы при включении потребителей в звезду и треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) технические данные электроизмерительных приборов;
- в) схему эксперимента с включенными измерительными приборами;
- г) таблицы с результатами эксперимента;
- д) векторные диаграммы для всех проведенных опытов;
- е) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?
2. Куда следует подключать вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжения трехфазного потребителя?
3. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
4. Какое соотношение между фазными и линейными токами симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
5. Всегда ли справедливы при соединении в треугольник соотношения
$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}, \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$
6. Всегда ли при соединении в треугольник справедливо соотношение
$$I_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0?$$
7. Как отразится отключение одной фазы потребителя на режим работы других фаз и на режим работы всей трехфазной цепи, соединенной в треугольник?

Работа № 8. НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1 Цель работы

Экспериментальное получение вольтамперных характеристик нелинейных резистивных элементов, графический расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

2 Пояснения к работе

Под нелинейной электрической цепью понимают электрическую цепь, содержащую нелинейные элементы (нелинейные сопротивления, нелинейные индуктивности, нелинейные емкости). Нелинейным элементом называют такой элемент электрической цепи, параметры которого зависят от электрического напряжения, электрического заряда, электрического тока или магнитного потока. Схема замещения цепи постоянного тока содержит только нелинейные резистивные элементы. Нелинейные элементы в отличие от линейных обладают нелинейными вольтамперными характеристиками.

Основной характеристикой нелинейного элемента является его вольтамперная характеристика $U=f(I)$ (рис. 1), из которой видно, что каждому значению постоянного тока (напряжения) соответствует определенное значение постоянного напряжения (тока). У нелинейных цепей различают статическое и динамическое сопротивления. По вольтамперной характеристике определяют статическое сопротивление нелинейного элемента в данной точке A $R_{СТ} = U/I$ и его дифференциальное (динамическое) сопротивление как отношение бесконечно малых приращений напряжения dU и тока dI $R_{Д} = dU/dI$. Динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона β касательной к вольтамперной характеристике в данной точке. Для экспериментального получения вольтамперной характеристики нелинейного элемента необходимо измерить ряд значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи с данным нелинейным элементом (рис. 2).

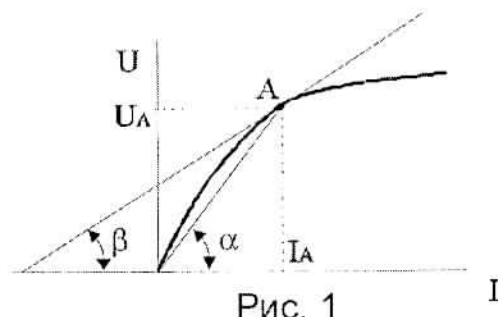


Рис. 1

Математическая модель нелинейной цепи постоянного тока состоит из уравнений Кирхгофа и уравнений характеристик нелинейных резистивных элементов. Так как модель становится нелинейной, то не может быть решена методами линейной алгебры. К нелинейным цепям применимы законы Кирхгофа, хотя методы анализа, основанные на методе наложения (на постоянстве параметров элементов цепи) чаще всего неприменимы. В таких цепях сопротивление и проводимость нелинейного элемента являются нелинейной функцией мгновенного значения тока (напряжения) на этом элементе. Следовательно, они представляют собой переменные величины, а поэтому для расчета мало пригодны.

Так как характеристики нелинейных элементов $U=f(I)$ или $I=f(U)$ часто определяются экспериментально и задаются обычно в виде таблиц или графиков, то широкое применение получили графические (графоаналитические) методы расчета. При этом последовательность операций сохраняется примерно той же,

что и при расчетах линейных цепей, только вместо сложения и вычитания напряжений и токов в соответствии с законами Кирхгофа производится сложение или вычитание абсцисс или ординат соответствующих вольтамперных характеристик. Расчет сводится к построению эквивалентной вольтамперной характеристики цепи. В соответствии с законами Кирхгофа при последовательном соединении элементов характеристики складывают при одинаковых значениях тока, при параллельном соединении – при одинаковых значениях напряжения. В лабораторной работе исследуется электрическая цепь (рис. 3) с двумя нелинейными элементами, одним из которых является лампа накаливания HL , и одним линейным элементом (резистором). Эквивалентная вольтамперная характеристика параллельного соединения $U_{23}=f(I_1)$ при графическом методе расчета получается суммированием вольтамперных характеристик лампы накаливания HL и резистора R при одинаковых значениях напряжения. Вольтамперная характеристика всей цепи $U=f(I_1)$ получается суммированием характеристики нелинейного сопротивления $R1$ и характеристики параллельного соединения $U_{23}=f(I_1)$ при одинаковых значениях тока.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль нелинейных элементов, модуль автотрансформатора, модуль мультиметров, модуль измерительный).

3.2. Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперных характеристик элементов цепи (рис. 2) и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать выход пониженного постоянного напряжения автотрансформатора = 0...12 В (модуль автотрансформатора).

В качестве амперметра использовать мультиметр в режиме измерения постоянного тока. В качестве вольтметра использовать магнитоэлектрический вольтметр с пределом измерения 15 В модуля измерительного.

Обратить внимание на полярность напряжения на нелинейном элементе $R1$.

3.3. Снять

вольтамперную характеристику нелинейного элемента $R1$. Для этого установить регулятор напряжения автотрансформатора в крайнее левое положение, включить последовательно модули питания (выключатель $QF1$), мультиметров и автотрансформатора. Увеличивая плавно напряжение питания провести необходимые измерения при изменении тока от 0 до 80...100 мА. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить электропитание стенда.

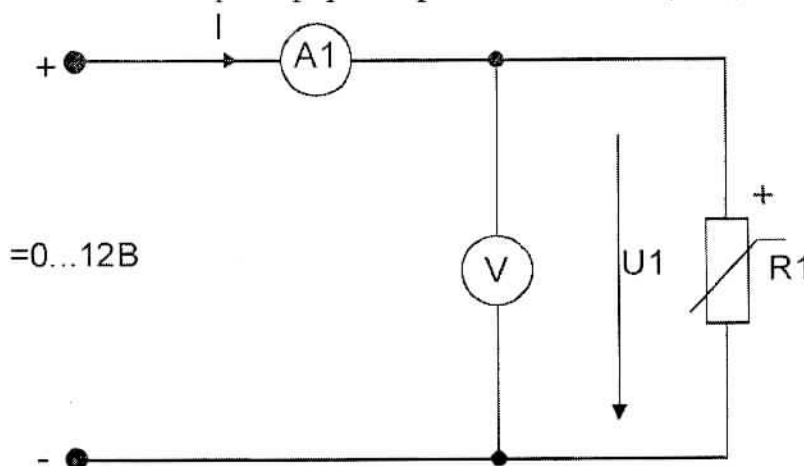


Рис. 2

Таблица 1

U, В	0									
I, А	0									

3.4. Собрать цепь с последовательным соединением лампы накаливания HL и резистора $R2$. Снять вольтамперную характеристику лампы накаливания и резистора $R2$. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

I, А	0									
U _л , В	0									
U _р , В	0									

3.6. Собрать разветвленную электрическую цепь по рис. 3 и предъявить её для проверки преподавателю.

3.7. Включить электропитание стенда и снять вольтамперную характеристику всей цепи $U_{эксн}=f(I_1)$. Выполнять аналогично п. 3.3. Результаты измерений занести в табл. 4. Выключить электропитание.

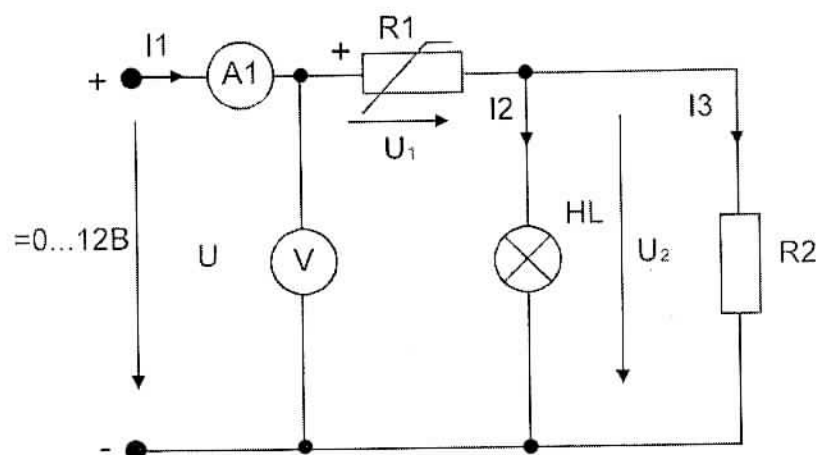


Рис. 3

Таблица 4

U, В	0									
I ₁ , А	0									

3.8. Построить по экспериментальным данным вольтамперные характеристики отдельных элементов цепи.

3.9. Записать уравнения законов Кирхгофа для исследуемой цепи. Используя результаты эксперимента, построить расчетную вольтамперную характеристику всей цепи $U_{расч}=f(I_1)$. Здесь же нарисовать полученную экспериментальную вольтамперную характеристику цепи $U_{эксн}=f(I_1)$ и сравнить их.

3.10. Для указанного преподавателем значения входного напряжения выполнить графический расчет токов ветвей и напряжений на отдельных участках цепи по рис. 3. Результаты расчета занести в табл. 5.

Таблица 5

	U, В	U ₁ , В	U ₂ , В	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ =I ₁ -I ₂ , А
Расчет						
Эксперимент						

3.11. Для проверки расчета нелинейной цепи собрать электрическую цепь по рис. 4 и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве амперметров

использовать мультиметры в режиме измерения постоянного тока. После проверки схемы включить электропитание и установить заданное значение входного напряжения U . Измерить токи I_1 и I_2 , стрелочным вольтметром измерить напряжения U_1 и U_2 на отдельных участках цепи. Определить величину тока I_3 . Результаты занести в табл. 5.

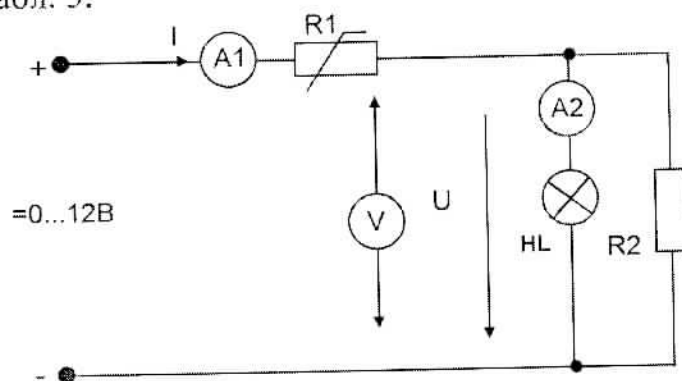


Рис 4

3.12. Сделать вывод об особенностях применения законов Кирхгофа в нелинейной цепи постоянного тока.

3.13. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления при указанном преподавателем значении напряжения.

6. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- выводы.

7. Контрольные вопросы

5.1. Что такое «нелинейный элемент» в электрической цепи?

5.2. Привести примеры нелинейных элементов электрических цепей и их вольтамперных характеристик.

5.3. Почему для нелинейной цепи удобен графический способ анализа?

5.4. Справедливы ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа?

5.5. Как построить вольтамперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?

5.6. Как построить вольтамперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?

5.7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

5.8. Как определяется динамическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для разных точек вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

Работа № 9 НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Экспериментальное исследование вольтамперных характеристик катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Изучение формы кривой тока в катушке с сердечником. Сравнение экспериментальных результатов с расчетными данными. Знакомство с работой двустороннего ограничителя уровня напряжения.

2. Пояснения к работе

Важным элементом конструкции различных электрических машин и аппаратов, устройств электроавтоматики является катушка индуктивности. При протекании тока по виткам катушки создается магнитное поле, интенсивность которого характеризуется магнитной индукцией B и магнитным потоком Φ , который пропорционален намагничивающей (магнитодвижущей) силе $F = I\omega$, где I – ток катушки, ω – число её витков. Зависимость $\Phi(I)$ при отсутствии ферромагнитного магнитопровода (сердечника) является линейной.

При наличии сердечника магнитный поток, создаваемый такой катушкой при прочих равных условиях значительно возрастает, так как в этом случае магнитный поток создается не только проводниками с током (источником внешнего магнитного поля), но и соответствующим ферромагнитным веществом магнитопровода (источником внутреннего магнитного поля).

Магнитная индукция B катушки индуктивности связана с напряженностью H магнитного поля и магнитной проницаемостью μ известным соотношением $B = \mu H$, магнитный поток $\Phi = Bs = \mu Hs$, где s – поперечное сечение катушки.

Отсюда следует, что магнитный поток пропорционален магнитной проницаемости среды μ , которая для ферромагнитных материалов значительно больше, чем магнитная проницаемость других материалов. Поэтому для уменьшения намагничивающей силы F , а следовательно, и для уменьшения тока, необходимого для создания требуемого магнитного потока, катушки индуктивности снабжаются магнитопроводом (сердечником) из ферромагнитного материала, чаще всего из электротехнической стали.

Так как зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов $\mu(H)$ является нелинейной (рис. 1), то и зависимость $\Phi(H)$ или $B(H)$ при наличии магнитопровода оказывается тоже нелинейной. Зависимость $B(H)$ – кривая намагничивания – является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов (рис. 2). Кривая, проходящая через начало координат, является основной кривой намагничивания. Она снимается при одностороннем намагничивании не намагниченого материала.

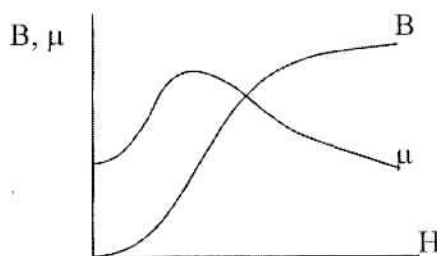


Рис. 1.

При питании катушки переменным током ферромагнитный магнитопровод из-за переменного магнитного потока перемагничивается циклически с частотой тока по кривой гистерезиса (рис. 2). В процессе циклического перемагничивания

за несколько полупериодов переменного тока устанавливается замкнутая симметричная петля гистерезиса.

На циклическое перемагничивание магнитопровода затрачивается мощность, выделяемая в виде теплоты, которая относится к потерям мощности в магнитопроводе. Потери мощности в магнитопроводе, называемые часто потерями мощности в стали $P_{ст}$, включают в себя потери на гистерезис P_H и потери от вихревых токов $P_{вт}$, наводимых переменным магнитным потоком в металле магнитопровода, : $P_{ст} = P_H + P_{вт}$.

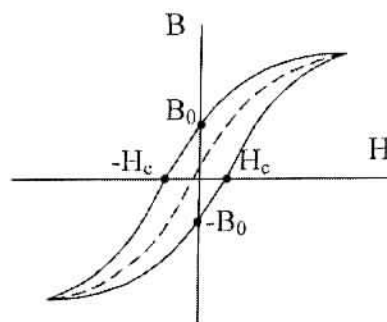


Рис. 2.

Для уменьшения потерь мощности на гистерезис в качестве материала для магнитопровода используют ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса. Уменьшение потерь мощности на вихревые токи достигается применением для магнитопровода металлов с большим удельным электрическим сопротивлением за счет повышенного содержания кремния в металле. При этом магнитопровод собирается из тонких электрически изолированных друг от друга пластин, что способствует уменьшению наводимых в каждой пластине вихревых токов и снижению потерь мощности от этих токов.

При питании синусоидальным напряжением ток в катушке с ферромагнитным сердечником искажает свою форму и является несинусоидальным во времени. На рис. 3 показано построение кривой тока в катушке с ферромагнитным сердечником с учетом магнитного гистерезиса. Из рисунка видно, что начальные фазы магнитного потока и тока не совпадают (угол сдвига δ). В связи с этим первая гармоника тока (или эквивалентный ток) отстает от приложенного напряжения на угол $\varphi < 90^\circ$. Наличие сдвига по фазе между напряжением и током меньшего, чем 90° указывает на то, что активная мощность в цепи не равна нулю даже если активное сопротивление обмотки катушки равно нулю. Поэтому ток катушки из-за потерь на гистерезис имеет активную составляющую I_A , а средняя мощность за период не равна нулю. Эта активная мощность характеризует расход энергии на перемагничивание ферромагнитного сердечника.

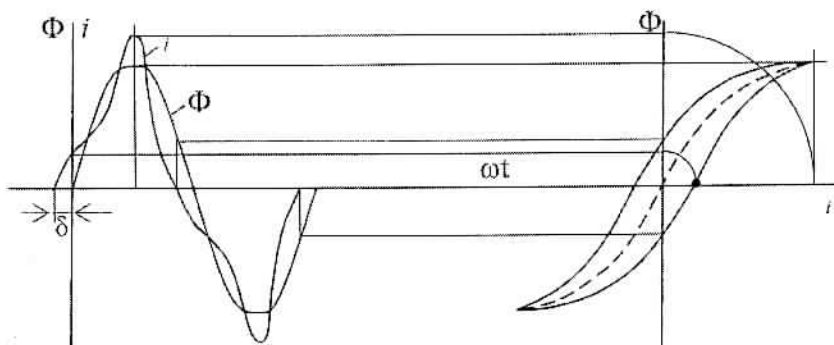


Рис. 3.

При наличии несинусоидальных токов для упрощения расчетов обычно переходят к эквивалентному синусоидальному току $I_{ЭК}$, имеющему одинаковое с соответствующим несинусоидальным током действующее значение при одинаковой частоте и развивающему одинаковую с ним активную мощность при одинаковом значении коэффициента мощности

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = I_{ЭК} = I_{мЭК} / \sqrt{2};$$

$$\cos \varphi = P / UI = \cos \varphi_{ЭК} = P / UI_{ЭК}$$

Полное сопротивление катушки индуктивности с магнитопроводом при расчетах находят по закону Ома

$$Z_{ЭК} = U / I.$$

Эквивалентное активное сопротивление катушки с магнитопроводом определяют при этом по значению активной мощности P , потребляемой катушкой из питающей сети, и её току или по значению потерь мощности в сердечнике $P_{СТ}$ и активному сопротивлению R проводов катушки

$$R_{ЭК} = P / I^2 = P_{СТ} / I^2 + R.$$

Эквивалентное индуктивное сопротивление катушки

$$X_{ЭК} = \sqrt{Z_{ЭК}^2 - R_{ЭК}^2}.$$

При этом индуктивность катушки $L = X_{ЭК} / \omega = X / 2\pi f$.

При увеличении амплитуды напряжения на катушке индуктивности с ферромагнитным сердечником амплитуда и действующее значение тока в ней будут возрастать быстрее. В результате вольтамперная характеристика катушки с ферромагнитным сердечником оказывается нелинейной (рис. 4). По форме она повторяет кривую намагничивания сердечника $B(H)$.

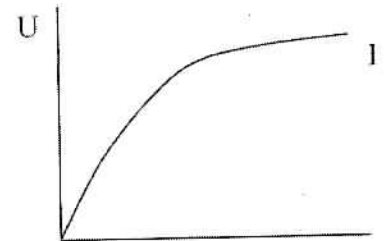


Рис. 4.

В цепях, содержащих катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор, резонансные явления, связанные с нелинейным характером индуктивности, называются феррорезонансом. В отличие от линейной цепи феррорезонанс может наступить в такой цепи при изменении тока в цепи или приложенного напряжения без какой либо регулировки катушки или конденсатора. На рис. 5 показана вольтамперная характеристика последовательной цепи, в которой возможен феррорезонанс напряжений.

Вольтамперная характеристика емкости (2) пересекает вольтамперную характеристику катушки (1). Точка пересечения А является точкой резонанса. В этой точке U_L и U_C одинаковы, а их разность равна нулю. При непрерывном увеличении напряжения источника ток плавно растет до I_2 , затем скачком увеличивается до I_4 и далее плавно растет. При уменьшении напряжения ток плавно уменьшается до I_3 , затем скачком до I_1 и снова плавно падает.

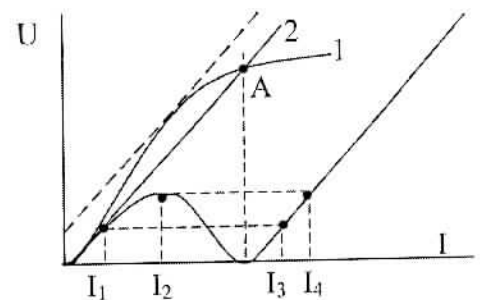


Рис. 5.

Скачкообразное изменение тока сопровождается изменением на 180° фазы тока по отношению к напряжению (опрокидывание фазы). С увеличением активного сопротивления R падающий участок на вольтамперной характеристике исчезает.

Явление резкого изменения тока в цепи при незначительных изменениях напряжения на входе цепи иногда называют триггерным эффектом в последовательной феррорезонансной цепи.

При напряжениях источника, больших напряжения опрокидывания фазы, напряжение на катушке изменяется мало, что связано с переходом по характеристике намагничивания в область магнитного насыщения. Это используется в практике для стабилизации напряжения.

Ограничители амплитуды – это устройства, у которых выходное напряжение изменяется пропорционально входному напряжению до некоторого значения, называемого уровнем ограничения. После этого значение выходного напряжения не зависит от величины входного напряжения и остается постоянным (рис. 6). В низкочастотных устройствах часто используют ограничители на стабилитронах (рис. 7). Вольтамперная характеристика двуханодного стабилитрона показана на рис. 8. С помощью этих устройств легко формировать трапецеидальное напряжение из синусоидального напряжения (рис. 6). Если амплитуда $U_{вх} \gg U_{ст}$ можно получить напряжение, близкое по форме к прямоугольным импульсам.

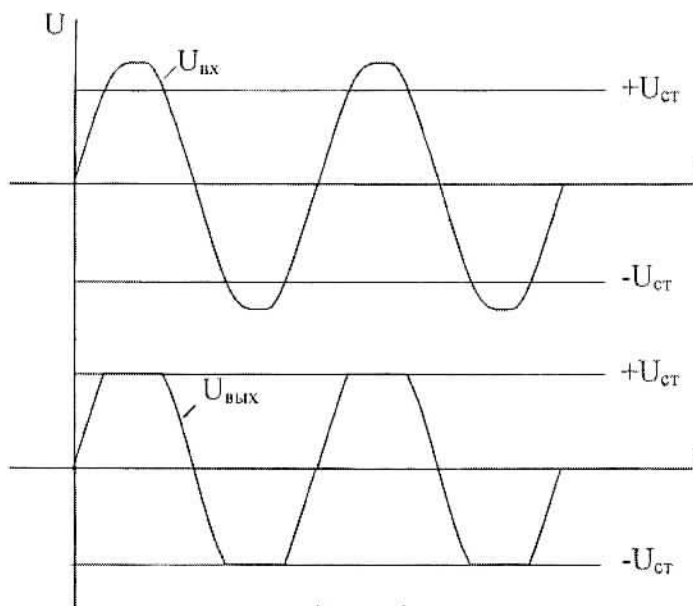


Рис. 6.

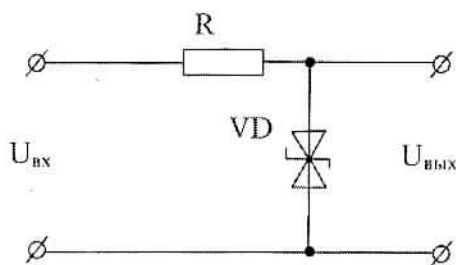


Рис. 7.

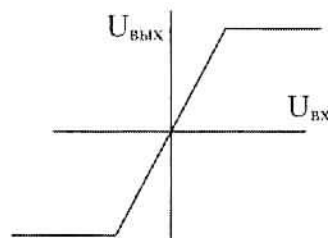


Рис. 8.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль питания, модуль нелинейных элементов, модуль автотрансформатора, модуль реактивных элементов, модуль мультиметров, модуль измерительный, осциллограф).

3.2. Для снятия вольтамперной характеристики катушки с сердечником собрать электрическую цепь по рис. 9. В качестве амперметра и вольтметра использовать мультиметры в соответствующих режимах работы или стрелочные приборы. В качестве регулируемого источника переменного напряжения использовать выход пониженного переменного напряжения

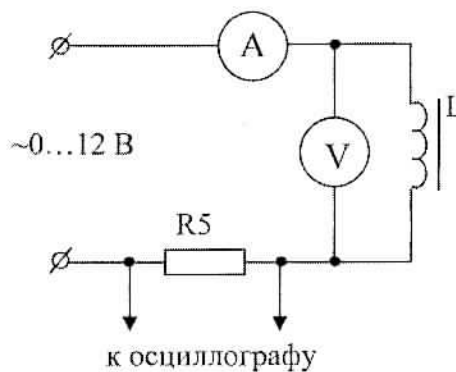


Рис. 9.

автотрансформатора $\sim 0 \dots 12$ В (модуль автотрансформатора). Подключить параллельно добавочному резистору $R5$ выводы осциллографа. Изменяя величину выходного напряжения автотрансформатора от нуля, снять вольтамперную характеристику катушки с ферромагнитным сердечником. При проведении опытов не допускать превышения тока свыше 1 А. Результаты измерений занести в табл. 1. При проведении измерений наблюдать с помощью осциллографа форму кривой тока в цепи. Зарисовать вид кривой тока. Выключить электропитание стенда.

Таблица 1

$U_K, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I, \text{А}$							

3.3. Для снятия вольтамперной характеристики конденсатора подключить к выходу автотрансформатора вместо катушки с сердечником батарею конденсаторов (модуль реактивных элементов). Величину емкости батарей конденсаторов установить по указанию преподавателя (например, 250 мкФ). Снять вольтамперную характеристику конденсатора, изменяя выходное напряжение автотрансформатора от нуля. Результаты измерений занести в табл. 2

Таблица 2

$U_C, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I, \text{А}$							

3.4. Используя полученные экспериментальные результаты, построить в одной системе координат вольтамперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Для случая последовательного соединения катушки с ферромагнитным сердечником и исследованного конденсатора построить вольтамперную характеристику такой цепи и по ней определить величину напряжения, при котором будет наблюдаться триггерный эффект.

3.5. Собрать электрическую цепь с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора (рис. 10). Плавно изменяя величину входного напряжения, снять вольтамперную характеристику всей цепи при увеличении и уменьшении входного напряжения. Обратит внимание на скачок тока при увеличении и уменьшении напряжения. Результаты измерений занести в табл. 3

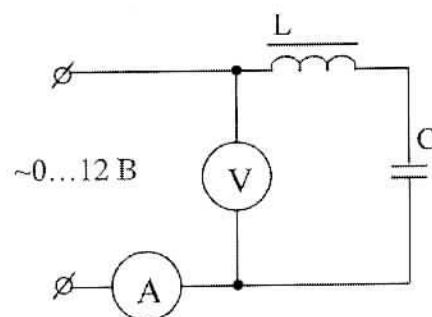


Рис. 10.

Таблица 3

$U_{увел}, \text{В}$	0	2	4	6	8	10	12
$I_{увел}, \text{А}$							
$U_{уменьш}, \text{В}$	12	10	8	6	4	2	0
$I_{уменьш}, \text{А}$							

3.6. По экспериментальным результатам построить ВАХ цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Сравнить полученную характеристику с расчетной характеристикой.

3.7. Ознакомиться с работой ограничителя уровня напряжения. Для этого собрать схему по рис. 11. Подключить параллельно двуханодному стабилитрону VD3 осциллограф.

В качестве амперметра использовать мультиметр в режиме измерения переменного тока. Плавно увеличивая входное напряжение наблюдать по осциллографу форму выходного напряжения. Измерить осциллографом амплитуду выходного напряжения и сравнить ее с паспортными данными

стабилитрона Д815Г. Зарисовать осциллограммы наибольшего входного и соответствующего выходного напряжений.

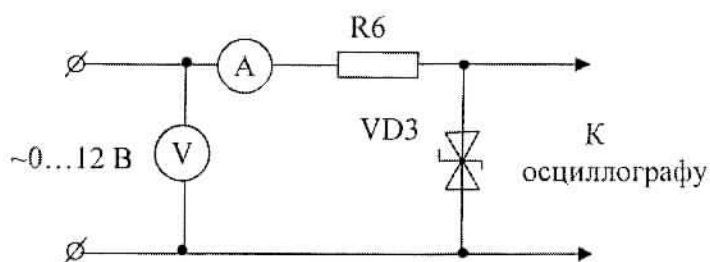


Рис. 11.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы экспериментов и таблицы с результатами измерений;
- в) расчетные и экспериментальные вольтамперные характеристики;
- г) осциллограммы напряжений и токов;
- д) сравнение результатов расчета с экспериментальными данными;
- е) выводы о свойствах исследованных цепей.

5. Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение ферромагнитного сердечника катушки индуктивности.

2. Пояснить влияние сердечника на величину индуктивности катушки.

3. Как изменится вольтамперная характеристика катушки индуктивности при наличии воздушного зазора в сердечнике?

4. Почему сердечник часто выполняется из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали?

5. Объяснить причину искажения синусоидальной формы тока при питании катушки индуктивности синусоидальным напряжением.

6. Как определить параметры схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником?

7. Каким образом в цепи с последовательным соединением линейной катушки индуктивности и конденсатора можно обеспечить возникновение резонанса напряжений?

8. В чем особенности явления феррорезонанса напряжений?

9. Почему с увеличением емкости конденсатора возможно изменение величины питающего напряжения, при котором происходит триггерный эффект?

10. Каково практическое применение феррорезонансных явлений?

11. Объяснить причину изменения формы выходного напряжения ограничителя уровня напряжения.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРОНИКА»

Работа № 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

1. Цель работы

Ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением полупроводниковых диодов – выпрямительного диода, стабилитрона, диода Шоттки и светоизлучающего диода.

2. Описание лабораторного модуля

В лабораторной работе изучаются характеристики выпрямительного диода типа 1N4007, полупроводникового стабилитрона типа КС168А, светоизлучающего диода типа L-5013 и диода Шоттки типа 1N5819. Основные параметры исследуемых полупроводниковых приборов приведены в табл. 1, 2 и 3.

Таблица 1

Тип прибора	1N4007
Прямой выпрямленный ток, А	1
Постоянное обратное напряжение, В	1000
Постоянное прямое напряжение, В	0,6...0,8

Таблица 2

Тип прибора	КС168А
Напряжение стабилизации, $U_{ст}$, В	6,12...7,48
Минимальный ток стабилизации, $I_{ст\ min}$, мА	3
Максимальный ток стабилизации, $I_{ст\ max}$, мА	45
Максимальная рассеиваемая мощность, P_{max} , мВт	300

Таблица 3

Тип прибора	1N5819
Прямой выпрямленный ток, А	1
Постоянное обратное напряжение, В	20...40
Постоянное прямое напряжение, В	0,45...0,6

Передняя панель лабораторного модуля представлена на рис. 1. На ней изображена мнемосхема исследуемых цепей, на которой установлены гнезда для подключения измерительных приборов и соединительных проводников.

Из полупроводниковых диодов наиболее часто используются выпрямительные диоды, использующие свойство односторонней проводимости *pn*-перехода. Полупроводниковым стабилитроном называют диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока. Применяется в стабилизаторах напряжения и тока, источниках опорного напряжения, цепях защиты.

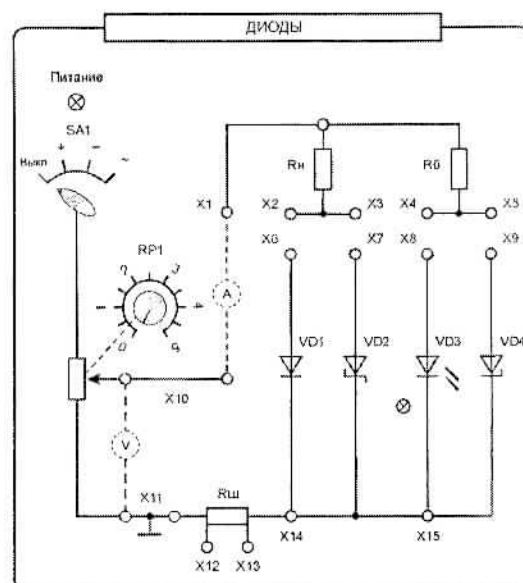


Рис. 1

Нормальным режимом работы стабилитрона является режим с обратным включением pn -переходом, рабочим напряжением – напряжением электрического пробоя перехода, рабочим участком вольтамперной характеристики (областью стабилизации) – участок обратной ветви, который почти параллелелен оси токов (рис. 2). Ограничивая с помощью резистора протекающий через стабилитрон ток, чтобы избежать перегрузки, состояние электрического пробоя в нем можно поддерживать длительное время.

Полупроводниковые стабилитроны изготавливаются на основе кремния с большой концентрацией примесей (на 2 – 3 порядка больше, чем у выпрямительных диодов). Благодаря этому образуется очень тонкий запирающий слой и создаются условия для электрического пробоя при сравнительно небольших значениях приложенного напряжения.

В простейших (параметрических) стабилизаторах стабилизация основана на свойстве стабилитрона сохранять постоянство напряжения при изменении (в определенных пределах) проходящего через них тока. Схема простейшего параметрического стабилизатора на полупроводниковом стабилитроне изображена на рис. 3. Если входное напряжение стабилизатора U_{ax} увеличится при неизменном сопротивлении нагрузки из-за повышения напряжения сети, то в соответствии с вольтамперной характеристикой стабилитрона незначительное увеличение напряжения на нем приведет к значительному увеличению тока I_d , протекающего через стабилитрон. Следовательно, увеличится ток I_b , падение напряжения $I_b R_b$ на балластном сопротивлении R_b , т.е. произойдет перераспределение приращения входного напряжения и выходное напряжение изменится незначительно.

При неизменном входном напряжении и изменении тока нагрузки, например от I_n до I_{nmin} , ток через стабилитрон возрастает на величину $(I_n - I_{nmin})$. При этом выходное напряжение U_n изменится незначительно. Для нормальной работы стабилизатора необходимо обеспечить условия, при которых ток стабилитрона не должен выходить за пределы рабочего диапазона $I_{cm, min} \div I_{cm, max}$. Поэтому величину балластного сопротивления выбирают из условия

$$R_b = \frac{U_{ax} - U_n}{I_n + I_{cm, nom}}, \quad \text{где} \quad I_{cm, nom} = \frac{I_{cm, max} - I_{cm, min}}{2} \quad - \quad \text{номинальный ток}$$

стабилизации ($I_{cm, nom} < 100 \text{ mA}$).

Принцип работы светоизлучающих диодов основан на излучательной рекомбинации в объеме pn -перехода при инжекции не основных носителей заряда

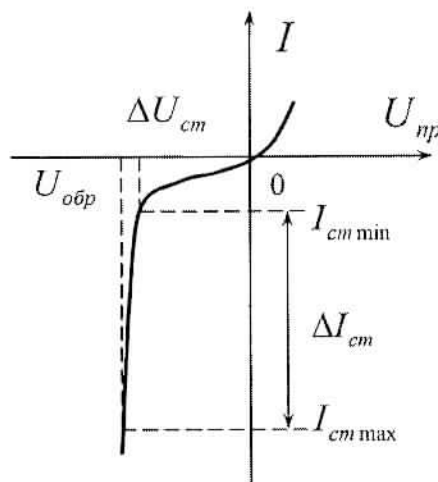


Рис. 2

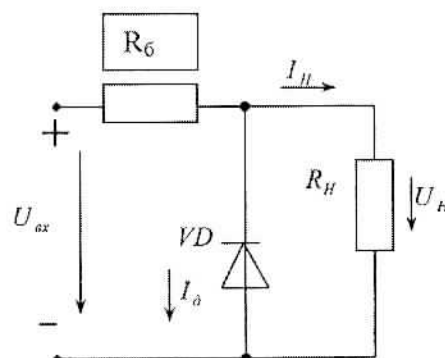


Рис. 3

под действием прямого напряжения. В результате излучательной рекомбинации переход испускает электромагнитные волны, которые могут находиться в световом (видимом) или инфракрасном (невидимом) диапазоне. На полупроводники, излучающие энергию в инфракрасном диапазоне наносят люминофор, который преобразует невидимое излучение в цветное. Цвет свечения зависит от состава люминофора и может быть зеленым, красным, синим и голубым. Важными достоинствами светоизлучающих диодов является малая потребляемая мощность, высокая чистота цвета свечения, стабильность цвета свечения от времени наработки и температуры.

Диоды Шоттки выполняются на основе контакта металл-полупроводник. Образованный на границе между металлом и полупроводником электрический переход является запирающим и обладает свойством односторонней проводимости. Потенциальный барьер на контакте металл-полупроводник часто называют барьером Шоттки. В таком переходе вследствие малой площади и большой ширины запирающего слоя обеспечивается незначительная барьерная емкость (не превышает 1 пФ). Из-за отсутствия инжекции в базу не основных носителей в ней не происходят процессы накопления и рассасывания зарядов. Поэтому длительность переходных процессов, обусловленная в диодах Шоттки только перезарядкой барьерной емкости, составляет десятые доли наносекунды. Эти свойства определили применение диода Шоттки как идеального элемента в импульсных устройствах.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Экспериментальное исследование выпрямительного диода

3.1.1. Собрать схему для исследования выпрямительного диода VD1 на постоянном токе. Соединить перемычкой гнезда X2 и X6. Для измерения анодного тока между гнездами X1 и X10 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мА ($\times 1000$), для измерения анодного напряжения между гнездами X3 и X15 включить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения (рис. 4). Включить электропитание стенда и установить переключатель SA1 в позицию «+».

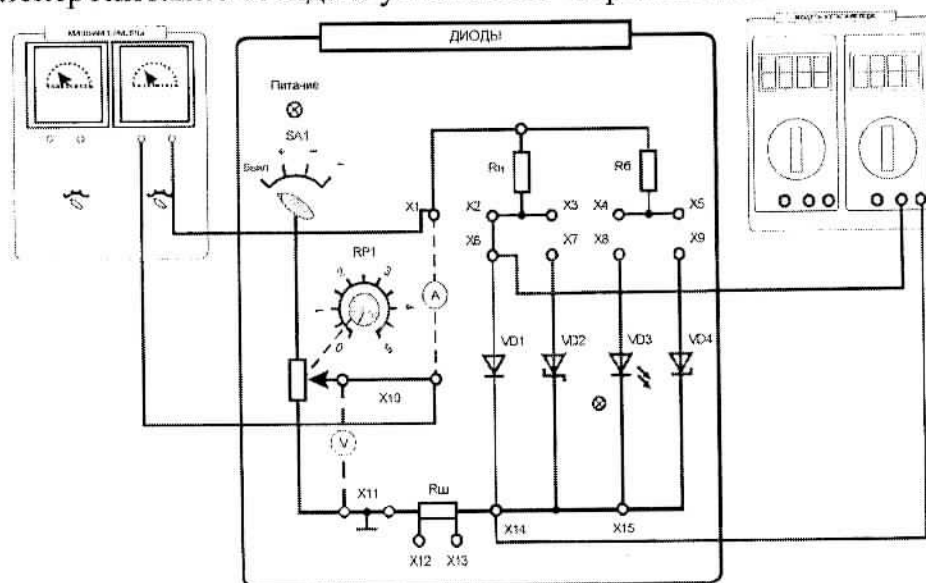


Рис. 4

3.1.2. Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе сначала для прямой, а затем обратной ветви, установив переключатель *SA1* сначала в позицию «+», а затем в позицию «-». Увеличивая входное напряжение с помощью потенциометра *RP1* от 0, измерять ток и напряжение на диоде. Результаты измерений занести в табл. 4 и 5. Выключить электропитание. Установить потенциометр *RP1* в нулевое положение.

Таблица 4

<i>U_{пр}, В</i>										
<i>I_{пр}, мА</i>										

Таблица 5

<i>U_{обр}, В</i>										
<i>I_{обр}, мА</i>										

3.1.3. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на полупроводниковом диоде. Для этого подключить один из входов двухканального осциллографа к шунту *R_ш* (корпус осциллографа «⊥» подключить к гнезду X12), вход второго канала подключить к гнезду X3. Установить синхронизацию от сети. Включить электропитание и перевести переключатель *SA1* в позицию «~». Потенциометр *RP1* установить в крайнее правое положение. Зарисовать осциллограммы анодного тока *i_a* и напряжения на диоде *u_a*, определив масштабы по времени, току и напряжению. При этом учесть, что сопротивление шунта *R_ш* составляет 10 Ом. Определить величину максимального обратного напряжения на диоде. Снять осциллограмму напряжения на нагрузке *u_n*. Для этого корпус осциллографа подключить к гнезду X3, а вход одного из каналов к гнезду X10. Зарисовать осциллограмму напряжения на нагрузке *u_n*, определив масштабы по времени и напряжению. Выключить питание модуля и стенда.

3.2. Экспериментальное исследование диода Шоттки.

Собрать схему для исследования диода Шоттки (*VD2*) на постоянном токе. Выполнить пункты 3.1.1 и 3.1.2 для диода Шоттки. Сравнить вольтамперные характеристики обычного выпрямительного диода и диода Шоттки.

3.3. Экспериментальное исследование стабилитрона

3.3.1. Собрать схему для исследования стабилитрона на постоянном токе (аналогично схеме по рис. 4. Выполнить пункт 3.1.2 для стабилитрона. Построить график зависимости выходного напряжения *U_{ст}* от тока *I_{ст}*. Результаты занести в табл. 6.

Таблица 6

<i>U_{ст}, В</i>				
<i>I_{ст}, мА</i>				

По полученной вольтамперной характеристике определить напряжение стабилизации *U_{ст}* и величину дифференциального сопротивления *r_д*.

3.3.2. Собрать схему параметрического стабилизатора напряжения (рис. 5). Выключить электропитание стенда. Переключатель *SA1* модуля диодов установить в позицию «-»

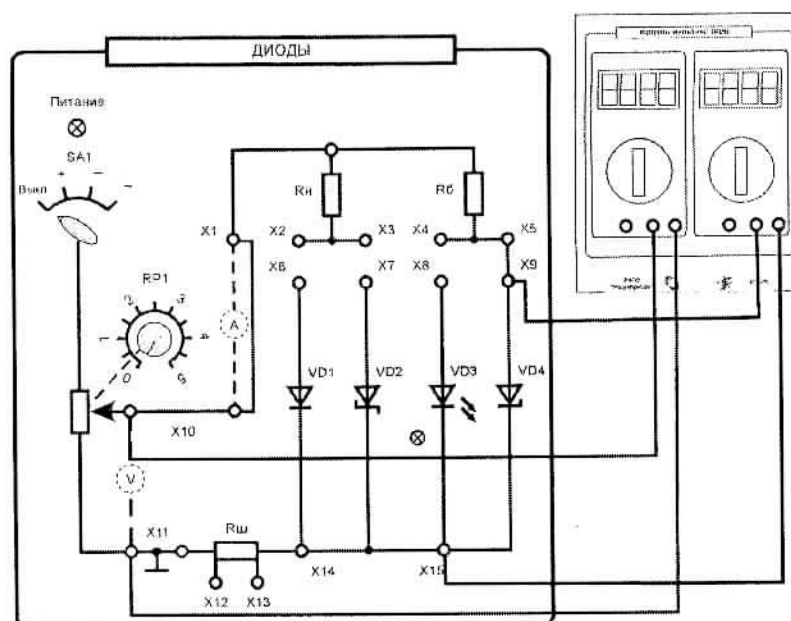


Рис. 5

3.3.3. Изменяя величину входного напряжения с помощью потенциометра *RP1* снять зависимость величины выходного напряжения от величины входного напряжения $U_{ст} = f(U_{вх})$. Результаты занести в табл. 7.

Таблица 7

$U_{ст}, В$								
$U_{вх}, В$								

Определить коэффициент стабилизации стабилизатора $K_{ст}$ на участке стабилизации

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{ст}};$$

3.4. Исследование влияния величины напряжения на светоизлучающем диоде на световую эмиссию.

Собрать схему для исследования светодиода (*VD3*) на постоянном токе (аналогично схеме по рис. 4). Включить питание модуля диодов (выключатель *SA1* в позицию «+») и увеличивая **положительное** входное напряжение от 0 с помощью потенциометра *RP1*, измерять напряжение на светодиоде и ток светодиода. Установить при этом степень светоизлучения (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Результаты занести в табл. 8.

Таблица 8

$U_{сд}, В$	$I_{сд}, мА$	светоизлучение

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы проведенных экспериментов;
- в) таблицы с результатами эксперимента;
- г) экспериментальные характеристики полупроводниковых приборов;
- д) выводы о свойствах исследованных полупроводниковых приборов.

5. Контрольные вопросы

1. Чем отличаются полупроводники типа p и n ?
2. Каковы свойства p - n перехода?
3. Объясните вид ВАХ p - n перехода.
4. Поясните вид ВАХ стабилитрона. Какова полярность напряжения в нормальном режиме работы стабилитрона?
5. В чем отличие ВАХ выпрямительного диода и диода Шоттки ?
6. Как работает неуправляемый выпрямитель?
7. Как и для чего строят временные диаграммы токов и напряжений в схеме выпрямителя?
8. Какими параметрами характеризуется стабилитрон?
9. Как работает параметрический стабилизатор напряжения? Для чего служит балластный резистор?
10. Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при повышении температуры?
11. При каком минимальном напряжении на входе стабилизатора еще возможна стабилизация напряжения?
12. Что такое коэффициент стабилизации, и каков его физический смысл?
13. От чего зависит яркость свечения светодиода?
14. Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде?
15. Каким образом на экране осциллографа получается изображение периодической функции времени?

Работа № 2. БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

1. Цель работы

Ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением биполярного транзистора.

2. Описание лабораторного модуля

В комплект лабораторной установки входят следующие модули: «Транзисторы», «Функциональный генератор», «Миллиамперметры», «Модуль мультиметров», «Модуль измерительный». Для наблюдения осциллограмм приготовить осциллограф.

Передняя панель модуля «Транзисторы» представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: биполярный транзистор $VT1$, полевой транзистор $VT2$, потенциометр $RP1$ для изменения напряжения, подаваемого на базу (затвор), токоограничивающий резистор $R1$, резистор нагрузки $R2$, сопротивление которого изменяется переключателем $SA1$. Величины сопротивлений, соответствующие положениям переключателя приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ позиции	1	2	3	4	5
Сопротивление, кОм	1	1,2	1,5	1,8	2,2

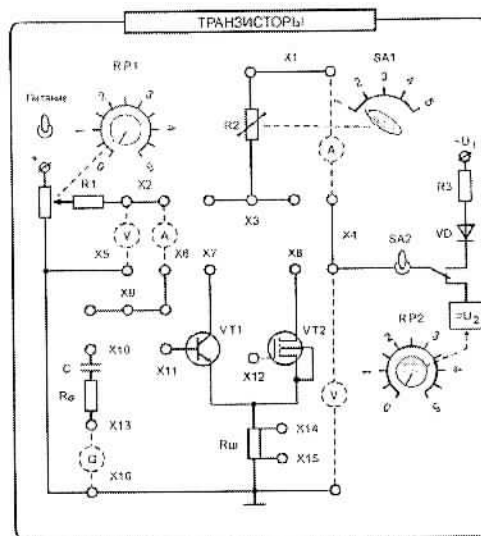


Рис. 1

Величина постоянного напряжения, подаваемого на коллектор (сток) регулируется потенциометром $RP2$. Переключатель $SA2$ предназначен для включения переменного или постоянного напряжения. Для подачи на коллектор (сток) только положительных полуволн переменного напряжения служит диод VD . Ток в этой цепи ограничивает резистор $R3$. Резистор R_G имитирует внутреннее сопротивление источника входного сигнала. Конденсатор C исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на положение рабочей точки покоя. Шунт $R_{ш} = 10 \text{ Ом}$ служит для осциллографирования сигнала,

пропорционального току через транзистор. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений (X1 – X16).

Основные параметры исследуемого биполярного транзистора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип транзистора	BC639
Максимально допустимый ток коллектора $I_{к\max}$, А	0,5
Максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ\max}$, В	80
Максимальная рассеиваемая мощность на коллекторе $P_{к\max}$, Вт	0,63
Статический коэффициент передачи тока h_{21}	40...160
Максимальное напряжение эмиттер-база $U_{эб\max}$, В	3

Основными характеристиками транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, являются статическая характеристика прямой передачи по току $I_k = f(I_б)$ при $U_k = const$, статическая выходная характеристика $I_k = f(U_{кэ})$ при $I_б = const$ (рис. 3), а также статическая входная характеристика $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = const$.

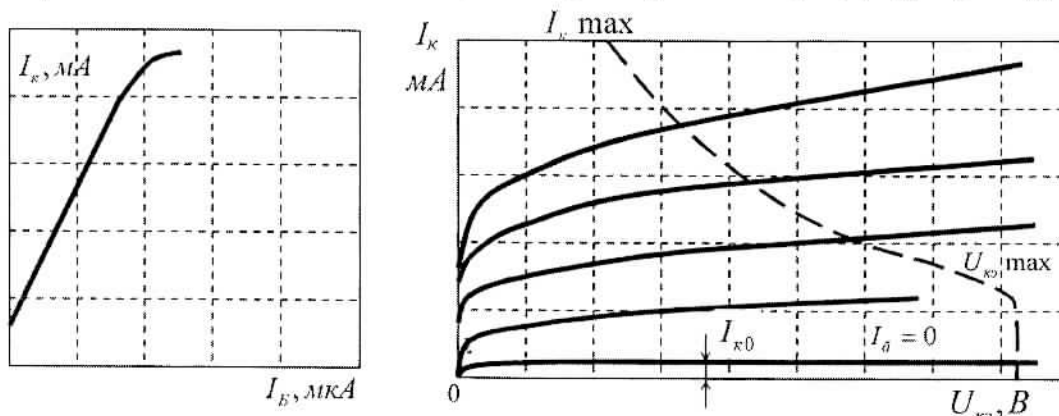


Рис. 3

Статическая выходная характеристика транзистора показывает зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при неизменном значении тока базы. Так как к коллекторному переходу приложено обратное напряжение, выходная характеристика соответствует обратной ветви вольтамперной характеристики $p-n$ -перехода. С увеличением тока базы концентрация не основных носителей заряда базы возрастает за счет инжекции их из эмиттера. При этом через коллекторный переход будет проходить большее количество основных носителей заряда из эмиттера, что ведет к увеличению тока коллектора.

Для того, чтобы форма переменной составляющей сигнала на выходе усилителя на транзисторе совпадала с формой сигнала, подаваемого на вход, зависимость между ними должна быть линейной. Поскольку транзистор является нелинейным элементом, возможны искажения сигнала. Наличие или отсутствие искажений зависит как от амплитуды сигнала, так и от выбора положения начальной рабочей точки на статических характеристиках усилителя. Выбор положения начальной рабочей точки влияет также на КПД усилителя. Если начальная рабочая точка лежит на середине линейного участка, а амплитуда сигнала такова, что рабочая точка, перемещаясь, не выходит за пределы линейного участка входной характеристики, то искажения сигнала почти не происходит. Транзистор работает в активном (усилительном) режиме. Из-за большого тока

покоя КПД в этом режиме низкий, менее 50%. Такой режим работы усилительного каскада называют режимом класса *A*. Режим класса *A* используют в основном в каскадах предварительного усиления.

Более экономичными являются режимы классов *B*, *C*, *D*. В режиме класса *B* начальная рабочая точка выбирается на границе области отсечки. В этом режиме усиливается только один полупериод входного сигнала. Очевидно, что сигнал при этом сильно искажается. Однако КПД усилителя в этом режиме высок (до 80%), так как ток покоя мал. Для усиления сигнала в течение всего периода используют двухтактные схемы, когда одно плечо схемы работает в положительный полупериод входного сигнала, а другое – в отрицательный полупериод входного сигнала. В таком режиме работают каскады мощного усиления (выходная мощность 10 Вт и более). В режиме класса *C* начальная рабочая точка находится в области отсечки. Угол отсечки θ менее 90° . При подаче сигнала ток коллектора протекает в течение времени, меньше полупериода напряжения входного сигнала. Искажения сигнала и КПД больше, чем в режиме класса *B*. Такой режим применяют в генераторах синусоидального напряжения, мощных резонансных усилителях.

Режим класса *D* часто называют ключевым. Активный элемент в этом режиме работы усилителя находится либо в состоянии отсечки, либо в состоянии насыщения. В первом случае ток через активный элемент (транзистор) равен нулю, во втором – равно нулю падение напряжения между его выходными зажимами. КПД в этом режиме близок к единице, так как потери энергии малы. Этот режим используют обычно для усиления прямоугольных сигналов.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторным модулем для исследования транзисторов. Собрать схему для снятия характеристик биполярного транзистора (рис. 3). Между гнездами X2 и X6 включить миллиамперметр на пределе измерения 100 мкА и соединить перемычкой гнезда X9–X11. Между гнездами X1–X4 включить второй миллиамперметр на пределе измерения 10 мА. Соединить перемычкой гнезда X3–X7. Между гнездами X2–X5 и X4–X16 включить мультиметры в режиме измерения постоянного напряжения. Тумблер SA2 установить в нижнее положение.

3.2. Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора.

3.2.1. Снять статическую характеристику прямой передачи по току $I_k = f(I_b)$ при U_k , равном заданному значению E_k и $R_k = 0$. Для этого дополнительно поставить перемычку между гнездами X1–X3. Включить «Модуль питания», включить тумблер «Питание» на модуле «Транзисторы». Экспериментальные результаты записать в табл. 2. При снятии характеристики следить за постоянством напряжения U_k .

$U_k =$							Таблица 2
$I_b, \text{мА}$							
$I_k, \text{мА}$							

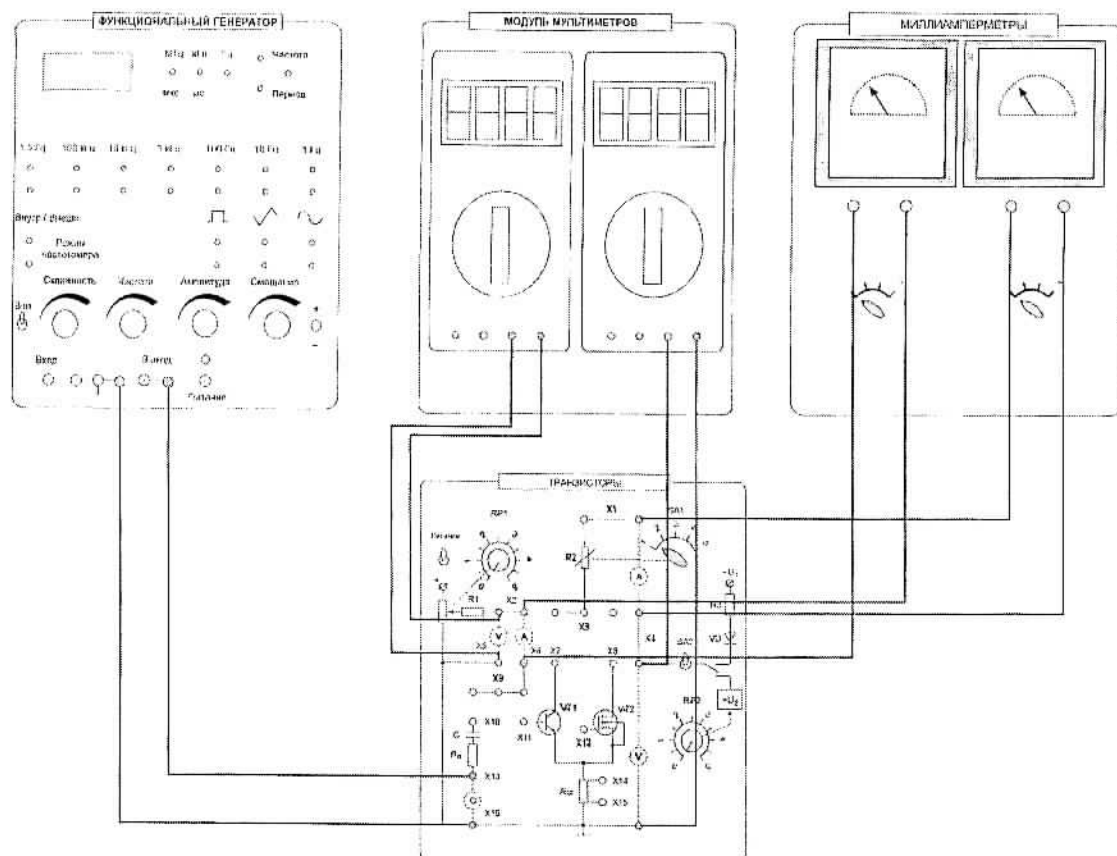


Рис. 3

3.2.2. Снять характеристику прямой передачи по току при наличии нагрузки R_K . Убрать перемычку между гнездами X1, X3. С помощью переключателя SA1 установить заданное значение резистора R2. С помощью потенциометра RP1 установите ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра RP2 установите заданное значение E_K . В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще. Экспериментальные результаты записать в табл. 3. Выключить тумблер «Питание». Построить экспериментальные характеристики.

$U_K =$

Таблица 3

$I_{\bar{b}}$, мА							
I_{K3} , мА							

3.2.3. По построенной в п. 3.2.2 характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток $I_{\bar{b} \max}$, при котором еще обеспечивается линейное усиление.

3.2.4. Снять выходные статические характеристики транзистора $I_K = f(U_{K3})$ при $I_{\bar{b}} = \text{const}$. Для этого дополнительно установить перемычку между гнездами X1–X3.

Включить питание модуля. Изменяя ток базы от 0 снять семейство выходных характеристик и зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений тока базы: $I_{\bar{b}1} = 0$; $I_{\bar{b}2} = 0,5 I_{\bar{b} \max}$; $I_{\bar{b}3} = I_{\bar{b} \max}$. Для этого с помощью потенциометра RP1 устанавливать ток базы $I_{\bar{b}1} = 0$; $I_{\bar{b}2} = 0,5 I_{\bar{b} \max}$; $I_{\bar{b}3} = I_{\bar{b} \max}$. Изменяя напряжение U_{K3} потенциометром RP2 в цепи коллектора напряжение от нулевого значения измерять ток коллектора I_K транзистора. Произвести измерения тока коллектора при нескольких значениях напряжения U_{K3} . Результаты измерений

занести в табл. 4. Произвести аналогичные измерения при двух других значениях тока базы. Перед каждым измерением необходимо подрегулировать ток базы транзистора. Выключить питание модуля.

$I_{б1} =$

Таблица 4

$I_{к0}$ мА					
$U_{кЭ}$ В					

3.3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе

3.3.1. Собрать схему для исследования усилительного каскада. Разомкнуть гнезда Х1–Х3, установить заданное значение сопротивления резистора R2. К гнезду Х13 подключить выходное напряжение функционального генератора, соединив землю генератора с гнездом Х16. Соединить перемычкой гнезда Х9–Х10. Подключить канал СН1 осциллографа ко входу усилителя (гнезда Х9, Х15), а канал СН2 к выходу усилителя (гнездо Х3). Включить временную развертку осциллографа. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал частотой 50...100 Гц, уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды. Переключить входы СН1 осциллографа на положение «вход закорочен». Включить питание стенда. При токе $I_{б} = 0$ установить с помощью потенциометра РР2 заданное значение $E_{к}$ и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра РР2!);

3.3.2. По снятой ранее характеристике прямой передачи по току при наличии нагрузки определить величины тока покоя базы $I_{бп}$ для режима работы транзистора класса А.

3.3.3. Определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{вых\text{ м}}$. Установить постоянный ток базы равным $I_{бп}$. Плавно увеличивать переменный входной сигнал до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратит внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости подрегулировать с помощью потенциометра РР1 положение рабочей точки покоя. Измерить с помощью осциллографа амплитуды неискаженного выходного $U_{вых}$ и входного $U_{вх}$ сигналов. Определить коэффициент усиления каскада по напряжению. Зарисовать осциллограммы выходного сигнала с искажениями и максимального сигнала без искажения.

3.3.4. Исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей тока базы $I'_{бп} = 0,5 I_{бп}$ и $I''_{бп} = 1,5 I_{бп}$, при этом переменный входной сигнал изменять не следует.

3.3.5. Исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите $I_{б} = 0$ и увеличить входное напряжение до перехода транзистора в ключевой режим. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения.

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы проведенных экспериментов;
- в) таблицы с результатами эксперимента и осциллограммы;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; определить по экспериментальным характеристикам прямой передачи по току статический коэффициент передачи тока B и коэффициент усиления каскада по току K_i при заданной нагрузке вблизи рабочей точки покоя для заданного класса усиления:

$$B = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{\theta}}, \quad K_i = \frac{\Delta I'_k}{\Delta I_{\theta}};$$

- д) выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия транзистора?
2. Какие существуют схемы включения транзисторов?
3. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору типа $n-p-n$ при различных схемах включения?
4. Как выглядят выходные и входные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
5. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
6. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току B ?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Как построить линию нагрузки?
9. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, В, D?
10. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером.
11. Каково назначение элементов усилителя?
12. Как определить коэффициент усиления каскада по току и напряжению (графически и экспериментально)?
13. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
14. Что такое ключевой режим, каковы преимущества ключевого режима.

Работа № 3. ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

1. Цель работы

Ознакомиться с работой, основными характеристиками и применением полевого транзистора.

2. Описание лабораторного модуля

В лабораторной установке используются следующие модули: «Транзисторы», «Функциональный генератор», «Миллиамперметры», «Модуль измерительный», «Модуль мультиметров». Для наблюдения осциллограмм приготовить осциллограф.

Передняя панель модуля «Транзисторы» представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: биполярный транзистор $VT1$, полевой транзистор $VT2$, потенциометр $RP1$ для изменения напряжения, подаваемого на затвор, токоограничивающий резистор $R1$, резистор нагрузки $R2$, сопротивление которого изменяется переключателем $SA1$. Величины сопротивлений, соответствующие положениям переключателя, приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ позиции	1	2	3	4	5
Сопротивление, кОм	1	1,2	1,5	1,8	2,2

Величина постоянного напряжения, подаваемого на сток, регулируется потенциометром $RP2$. Переключатель $SA2$ предназначен для включения переменного или постоянного

напряжения. Для подачи на сток только положительных полувольт переменного напряжения служит диод VD . Ток в этой цепи ограничивает резистор $R3$. Резистор имитирует внутреннее сопротивление источника входного сигнала.

Конденсатор C исключает влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала на положение рабочей точки покоя. Шунт $R_{ш}$ $R_{ш} = 10 \text{ Ом}$ служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через транзистор. На передней панели размещены также гнезда для осуществления внешних соединений ($X1 - X16$).

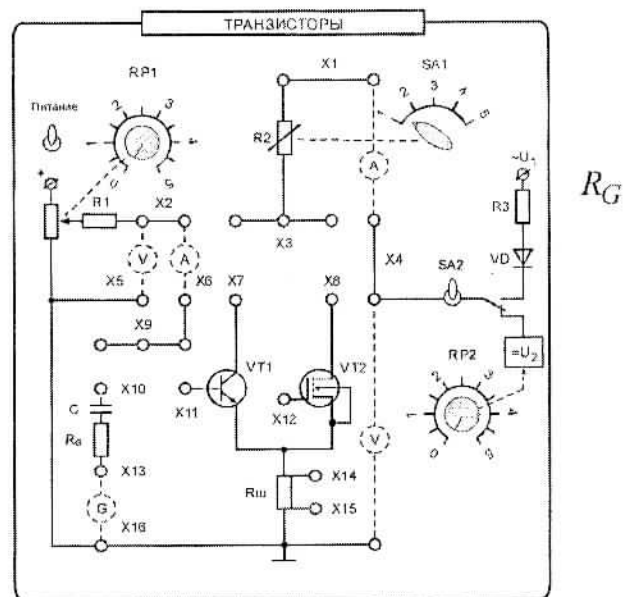


Рис. 1

Полевой транзистор представляет собой полупроводниковый управляемый прибор, ток в котором обусловлен дрейфом носителей одного знака под действием продольного электрического тока. Управление величиной проводимости,

следовательно, и тока осуществляется поперечным полем. Это электрическое поле создается напряжением, приложенным к управляющему электроду - затвору.

В работе исследуется полевой МОП-транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом *n*-типа, параметры которого приведены в табл. 2. Структура такого транзистора показана на рис. 2, а условное графическое обозначение на принципиальных электрических схемах – на рис. 3.

Таблица 2

Тип транзистора	BS170
Максимально допустимый ток стока $I_{C\max}$, мА	300
Максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{СИ\max}$, В	60
Максимальная рассеиваемая мощность $P_{C\max}$ при $t=25^\circ\text{C}$, Вт	0,83
Максимальное напряжение сток-затвор $U_{CЗ\max}$, В	60
Максимальное значение статического сопротивления сток-исток в открытом состоянии, $R_{СИ\text{отк}}$, Ом	5

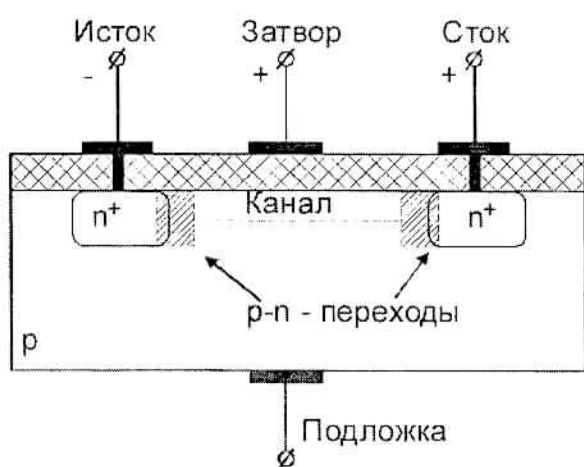


Рис. 2

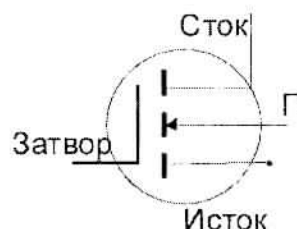


Рис. 3

В полевых транзисторах с изолированным затвором электрод затвора изолирован от полупроводниковой области канала слоем диэлектрика. Если в качестве диэлектрика используются окислы, например, SiO_2 , то транзистор имеет структуру металл-окисел-полупроводник или МОП-структуру. Принцип действия таких транзисторов основан на эффекте изменения проводимости поверхностного слоя полупроводника под действием поперечного электрического поля. Полевые транзисторы – твердотельные аналоги электронных ламп. Они характеризуются аналогичной системой параметров – крутизной характеристики (0,1...400 мА/В), напряжением отсечки (0,5...20 В), входным сопротивлением по постоянному току ($10^{11} \dots 10^{16}$ Ом) и т.д.

При нулевом напряжении $U_{3И} = 0$ канал между истоком и стоком отсутствует. Pn-переходы, направленные встречно, препятствуют движению электронов от истока к стоку, то есть канал отсутствует. При $U_{3И} > 0$ возникающее под затвором электрическое поле будет отталкивать положительные заряды (дырки, являющимися основными носителями в *p*-полупроводнике) вглубь полупроводника. При некотором пороговом значении напряжения между стоком и истоком под затвором накапливается достаточный слой электронов. Создается (индуцируется) проводящий канал, толщина которого может составить 1...2 нанометра, которая далее практически не меняется. Удельная проводимость

канального слоя зависит от концентрации электронов в нем. Изменяя $U_{зи}$, можно менять величину тока стока. Примерный вид стоковых (выходных) вольтамперных характеристик $I_c = f(U_{си})$ при постоянных значениях $U_{зи} = const$ и сток-затворной (передаточной) вольтамперной характеристики $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$ транзистора с индуцированным каналом показан на рис. 4а и рис. 4б. Особенностью характеристик является то, что ток возникает при положительных напряжениях $U_{зи} > U_{зи\text{ пор}}$, где $U_{зи\text{ пор}}$ – напряжение отпирания транзистора. Как видно из рис. 4, все характеристики располагаются при положительных значениях напряжений.

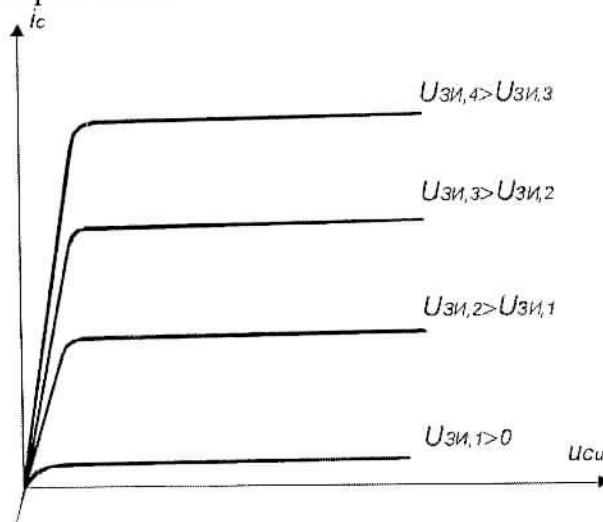


Рис. 4а

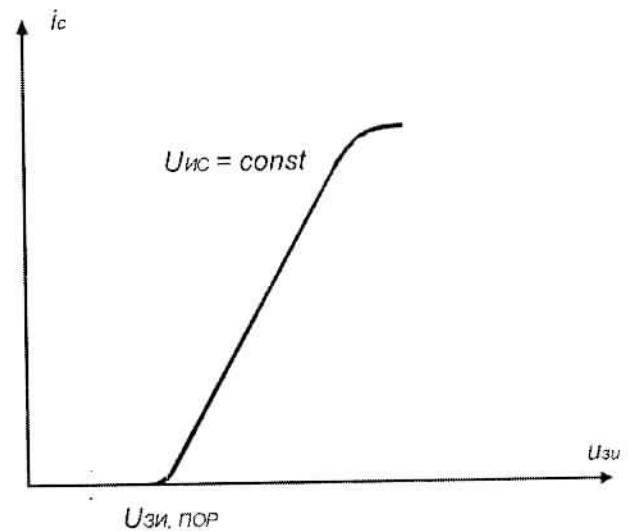


Рис. 4б

Основными параметрами полевых транзисторов с изолированным затвором относят:

- крутизну передаточной характеристики $S = (dI_c/dU_{зи})$ при $U_{си} = const$;
- дифференциальное сопротивление стока на участке насыщения R_c ;
- допустимый ток стока I_{Cmax} ;
- допустимое напряжение U_{Cmax} ;
- допустимая мощность P_{Cmax} .

К неоспоримым достоинствам таких транзисторов отнести:

- минимальную мощность управления и большой коэффициент усиления по току;
- большую скорость переключения;
- возможность простого параллельного включения транзисторов для увеличения выходной мощности;
- устойчивость транзисторов к большим импульсам напряжения;
- возможность применения современных технологий позволяет создавать интегральные микросхемы небольших размеров с малой потребляемой мощностью и содержащие до 10^6 активных элементов.

В отличие от биполярного транзистора, в полевом транзисторе ток управляющего электрода – затвора на низких частотах значительно меньше, чем ток базы биполярного транзистора.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторным модулем для исследования транзисторов. Собрать схему для снятия характеристик полевого транзистора (рис. 5). Соединить перемычками гнезда X2 – X6 и X9–X12. Между гнездами X1–X4 включить миллиамперметр на пределе 100 мкА (или мультиметр в режиме измерения постоянного тока). Соединить перемычкой гнезда X3–X8. Включить вольтметр с пределом 15 В (или мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения) между гнездами X4–X16. Тумблер SA2 установить в нижнее положение.

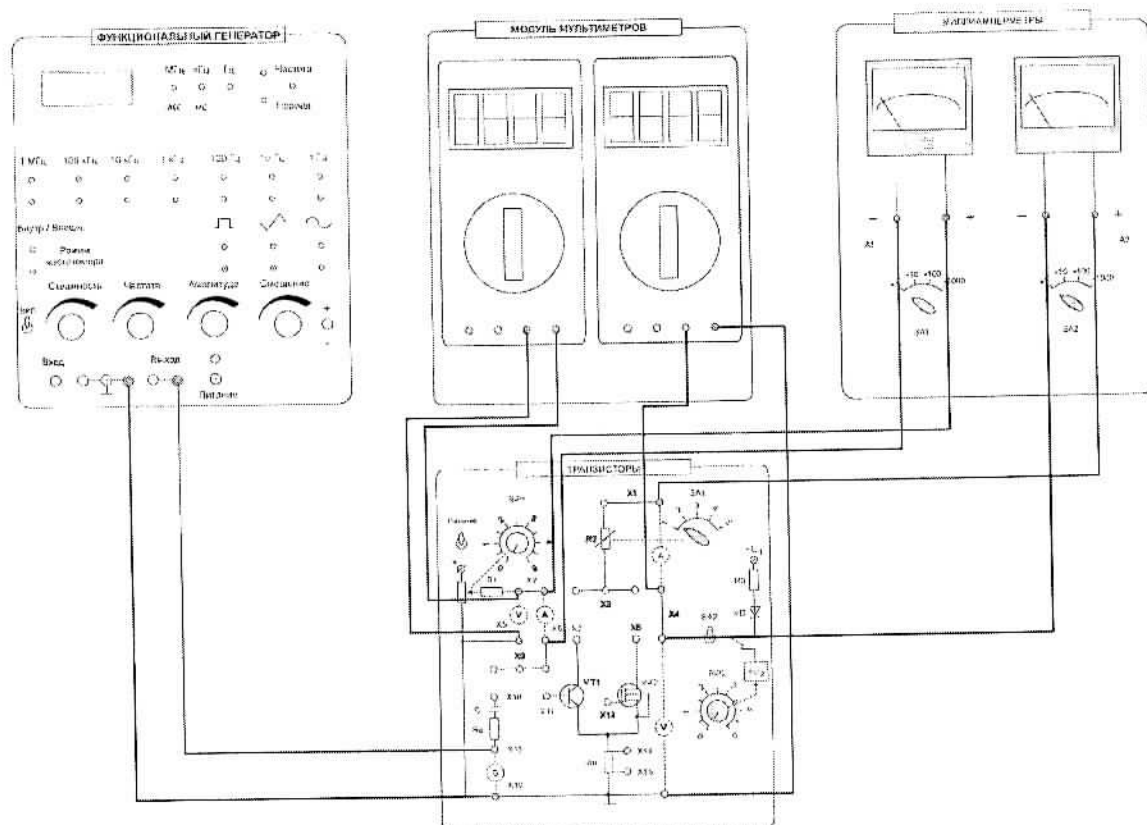


Рис. 5

3.2. Экспериментальное исследование характеристик полевого транзистора

3.2.1. Снять сток-затворную характеристику транзистора $I_C = f(U_{ЗИ})$ при заданном постоянном значении $U_{СИ} = const$ и $R_C = 0$. Для этого дополнительно поставить перемычку между гнездами X1–X3. Включить «Модуль питания», включить тумблер «Питание» на модуле «Транзисторы». С помощью потенциометра RP2 установите заданное значение $U_{СИ}$. Изменяя напряжение $U_{ЗИ}$ от 0 снять характеристику. Экспериментальные результаты записать в табл. 3. При снятии характеристики следить за постоянством напряжения $U_{СИ}$.

$U_{СИ} =$

Таблица 3

$I_C, \text{мА}$							
$U_{ЗИ}, \text{В}$							

3.2.2. Снять сток-затворную характеристику транзистора $I_C = f(U_{ЗИ})$ при заданном постоянном значении $U_{СИ} = const$ при наличии нагрузки R_C . Для этого убрать перемычку между гнездами X1, X3. С помощью переключателя SA1

установить заданное значение резистора $R2$. С помощью потенциометра $RP2$ установите заданное значение U_{CH} . В дальнейшем ручку регулировки $RP2$ не трогать. Изменяя напряжение U_{ZH} от 0 снять характеристику. В области вблизи насыщения точки снимать чаще. Экспериментальные результаты записать в табл. 4. Выключить тумблер «Питание». Построить полученную экспериментальную характеристику.

$U_{CH} =$

Таблица 4

$I_C, \text{мА}$							
$U_{ZH}, \text{В}$							

3.2.3. Снять семейство стоковых характеристик транзистора $I_C = f(U_{CH})$ при заданных постоянных значениях $U_{ZH} = \text{const}$. Включить питание модуля. Изменяя напряжение U_{CH} от 0 снять характеристику. Экспериментальные результаты записать в табл. 5. Выключить питание модуля. Построить полученные экспериментальные характеристики.

$U_{ZH} =$

Таблица 5

$I_C, \text{мкА}$						
$U_{CH}, \text{В}$						

3.3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на полевом транзисторе.

3.3.1. Собрать схему для исследования усилительного каскада. Разомкнуть точки $X1-X3$, установить заданное значение сопротивления резистора $R2$. К гнезду $X13$ подключить выходное напряжение функционального генератора, соединив землю генератора с гнездом $X16$. Соединить перемычкой гнезда $X9-X10$. Подключить канал $CH1$ осциллографа ко входу усилителя (гнезда $X9, X15$), а канал $CH2$ к выходу усилителя (гнездо $X3$). Включить временную развертку осциллографа. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал с заданной частотой и уменьшить амплитуду сигнала до нуля регулятором амплитуды. Включить питание стенда. При напряжении $U_{ZH} = 0$ установить с помощью потенциометра $RP2$ заданное значение U_C и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра $RP2$!);

3.3.3. Определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения $U_{вых \text{ м}}$. Плавно увеличивать переменный входной сигнал до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратить внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости уточнить положение рабочей точки покоя. Измерить с помощью осциллографа амплитуды неискаженного выходного $U_{вых}$ и входного $U_{вх}$ сигналов. Определить коэффициент усиления каскада по напряжению. Зарисовать осциллограммы выходного сигнала с искажениями и максимального сигнала без искажения.

3.3.4. Исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Зарисовать кривые выходного напряжения при увеличении и уменьшении постоянной составляющей напряжения U_{ZH} . При этом переменный входной сигнал изменять не следует.

3.3.5. Исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите $U_{зи} = 0$ и увеличить входное напряжение до перехода транзистора в ключевой режим. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения.

3.4. По полученным экспериментальным характеристикам определить крутизну передаточной (сток-затворной) характеристики $S = (dI_c/dU_з)$ при $U_{си} = const$ и дифференциальное сопротивление стока на участке насыщения R_c .

4. Содержание отчета

- а) наименование работы и цель работы;
- б) электрические схемы проведенных экспериментов;
- в) таблицы с результатами эксперимента и осциллограммы;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) осциллограммы;
- е) выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Какие разновидности полевых транзисторов вы знаете?
2. Каковы основные преимущества и недостатки полевых транзисторов?
3. Какие существуют схемы включения полевых транзисторов?
4. Почему ток транзистора достигает насыщения при изменении напряжения на стоке?
5. Какова полярность напряжений, прикладываемых к полевому транзистору с изолированным затвором и каналами «п» и «р» типов при схеме включения с общим истоком?
6. Как выглядят стоковые вольтамперных характеристик и сток-затворные вольтамперные характеристики транзистора с индуцированным и встроенным каналом?
7. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим истоком. Каково назначение элементов усилителя?

Работа № 4. ОДНОФАЗНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ И СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

1. Цель работы

Ознакомиться с принципом работы и основными свойствами однофазного двухполупериодного выпрямителя, изучить влияние сглаживающих фильтров на работу выпрямительного устройства.

2. Описание лабораторной установки

Лицевая панель лабораторного модуля представлена на рис. 1.

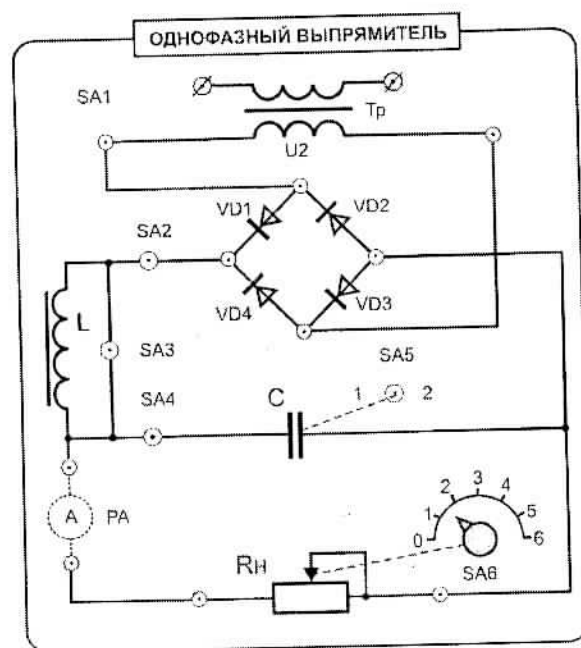


Рис. 1

На лицевой панели изображена электрическая схема однофазного мостового выпрямителя, установлены коммутирующие элементы и клеммы для подключения амперметра, вольтметра и осциллографа.

Выпрямительные устройства служат для преобразования переменных напряжений и токов в постоянные напряжение и ток. Необходимость в таком преобразовании возникает достаточно часто, например, при электропитании разнообразной электронной аппаратуры, электродвигателей постоянного тока, электролизных установок, в устройствах для заряда аккумуляторных батарей, в автомобилях при питании бортовой сети от генератора переменного тока.

Выпрямительные устройства обычно состоят из трансформатора, одного или нескольких электрических вентилей и сглаживающего фильтра. Трансформатор служит для получения требуемого значения выпрямляемого переменного напряжения. Электрические вентили (устройства, обладающие свойством односторонней проводимости электрического тока) служат для непосредственного преобразования переменного напряжения в пульсирующее напряжение одного знака. Чаще всего в качестве электрических вентилей используются полупроводниковые диоды. Сглаживающие фильтры применяются для

уменьшения пульсаций выпрямленного тока и напряжения на выходе выпрямительного устройства.

При выпрямлении переменного напряжения в зависимости от числа фаз выпрямляемого напряжения, характера нагрузки и требований, предъявляемых к выпрямительному току и напряжению, электрические вентили могут соединяться по различным схемам. Наибольшее применение при выпрямлении однофазного напряжения получила двухполупериодная мостовая схема выпрямления.

Мостовая двухполупериодная схема выпрямления содержит две пары диодов, включенных по схеме четырехплечного моста (рис. 2). В течение каждого полупериода ток проходит последовательно через два диода в противоположных плечах моста. В один полупериод входного напряжения ток протекает от клеммы «А» через диод $VD1$, нагрузку R_d , диод $VD3$, к клемме «В». В следующий полупериод полярность выпрямляемого напряжения меняется и ток идет от клеммы «В», через диод $VD2$, нагрузку R_d , диод $VD4$ к клемме «А». Направление

тока через нагрузку все время одного знака, т.е. постоянное. Напряжение на нагрузке U_H пульсирующее (рис. 3). Постоянная составляющая напряжения на нагрузке (среднее значение выпрямленного напряжения)

$$U_d = I_d R_d = 2I_{2m} R_d / \pi = 2U_{2m} / \pi = 2\sqrt{2}U_2 / \pi \approx 0,9U_2.$$

Частота пульсаций (частота основной гармонической составляющей выпрямленного напряжения) в этой схеме равна двойной частоте напряжения источника питания.

Коэффициент пульсаций (отношение амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению этого напряжения) в мостовой схеме $K_H = 0,67$.

Напряжение, воспринимаемое каждым диодом в непроводящий полупериод – обратное напряжение, определяется значением выпрямляемого напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Максимальное значение обратного напряжения на диоде $U_{обр. макс}$ равно амплитудному значению выпрямляемого напряжения U_{2m} : $U_{обр. макс} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2 = 1,11 U_d$.

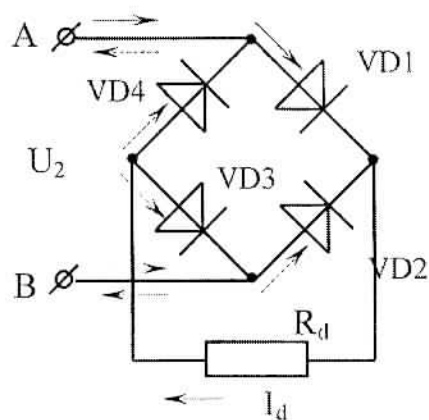


Рис. 2

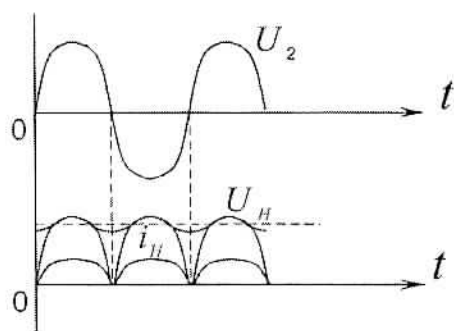


Рис. 3

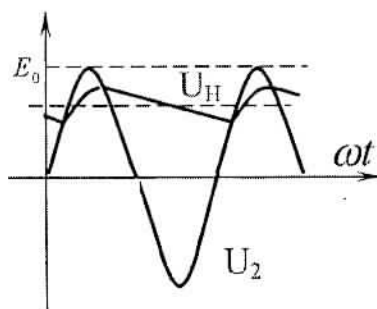
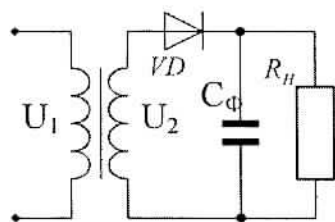


Рис. 4

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения включают электрические сглаживающие фильтры. Простейшими сглаживающими фильтрами являются конденсатор, включаемый параллельно слабotoчной нагрузке (рис. 4) и индуктивный фильтр (дрессель), включаемый последовательно с сильноточной нагрузкой (рис. 5).

При использовании емкостного фильтра сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения и тока происходит за счет периодической зарядки конденсатора и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки R_H . Зарядка конденсатора происходит, когда мгновенное значение вторичного напряжения трансформатора выше напряжения на нагрузке (и на конденсаторе). Когда напряжение трансформатора становится меньше напряжения на конденсаторе, диоды закрываются и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки (рис. 4). Далее процесс повторяется. При включении емкостного фильтра напряжение не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения.

Емкость конденсатора для фильтра выбирают такой величины, чтобы для основной гармоники выпрямленного напряжения емкостное сопротивление конденсатора $X_{C\Phi}$ было значительно меньше сопротивления нагрузки R_H

$$X_{C\Phi} = 1/2\pi f_{ог} C_{\Phi} \leq 10 R_H.$$

Отсюда видно, что применение емкостного фильтра более эффективно при высокоомной нагрузке с малыми значениями выпрямленного тока, так как при этом возрастает эффективность сглаживания.

Эффективность фильтров оценивают коэффициентом сглаживания q , равным отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра:

$$q = K_{Пвх} / K_{Пвых}.$$

При включении индуктивного фильтра последовательно с нагрузкой изменяющееся магнитное поле, возбуждаемое пульсирующим током, наводит электродвижущую силу самоиндукции $e_L = \pm L di/dt$. В соответствии с законом электромагнитной индукции электродвижущая сила направлена так, чтобы сгладить пульсации тока в цепи, следовательно, и пульсации напряжения на нагрузке R_H . Эффективность сглаживания увеличивается при больших значениях выпрямленного тока.

Величину индуктивности фильтра выбирают таким образом, чтобы индуктивное сопротивление фильтра $X_{L\Phi}$ было значительно больше величины сопротивления нагрузки R_H : $X_{L\Phi} = 2\pi f_{ог} L_{\Phi} \geq 10 R_H$.

Большее уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения обеспечивают смешанные фильтры, в которых используются и конденсаторы и индуктивности, например, Г-образные и П-образные сглаживающие фильтры. Более лучшие результаты обеспечивают активные сглаживающие фильтры.

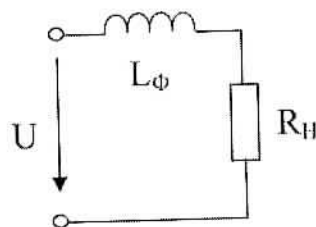


Рис. 5

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Подготовить к работе модуль «Однофазный выпрямитель» и измерительные приборы (модуль амперметров постоянного тока и модуль измерительный). При работе используется осциллограф.

3.2. Присоединить к исследуемому модулю амперметр для измерения выпрямленного тока нагрузки. Мультиметр перевести в режим измерения переменного напряжения. Включить электропитание стенда (модуль питания) и включить осциллограф для наблюдения форм напряжений.

3.3. Включив питание модуля (выключатель $SA1$) При разомкнутом ключе $SA2$ измерить выпрямляемое напряжение U_2 на вторичной обмотке трансформатора. Результат измерения записать в табл. 1.

3.4. Подключить к вторичной обмотке трансформатора вместо мультиметра осциллограф. Получить на экране устойчивое изображение и измерить амплитудное значение выпрямляемого напряжения U_{2m} . Зарисовать в масштабе осциллограмму выпрямляемого напряжения.

3.5. Перевести мультиметр в режим измерения постоянного напряжения, подключить мультиметр к выходным зажимам выпрямительного моста и измерить величину выпрямленного напряжения U_{20} в режиме холостого хода выпрямителя. Результат занести в табл. 1.

Таблица 1

U_{2m}	U_{20}	U_{20} / U_{2m}

3.6. Подключить осциллограф к одному из диодов, получить устойчивое изображение, измерить величину максимального обратного напряжения на диоде $U_{обр. макс.}$, зарисовать в том же масштабе осциллограмму напряжения на диоде.

3.7. Исследовать работу выпрямителя без сглаживающих фильтров. Для этого установить заданную преподавателем величину сопротивления нагрузки R_H . Подключить осциллограф параллельно нагрузке, включить тумблер $SA2$ и зарисовать в прежнем масштабе осциллограмму выпрямленного напряжения на нагрузке U_H при отсутствии сглаживающих фильтров. Определить по осциллограмме двойную амплитуду пульсаций выпрямленного напряжения $2U_{mdnep}$. Измерить с помощью мультиметра постоянную составляющую напряжения на нагрузке U_d . Результаты измерений занести в табл. 2. По результатам измерений определить коэффициент пульсаций $q = U_{mdnep} / U_d$.

Таблица 2

Параметр	Тип фильтра			
	отключен	C_Φ	L_Φ	$L_\Phi C_\Phi$
$2U_{mdnep}$				
U_d				
$q = U_{mdnep} / U_d$				

3.8. Исследовать влияние на выпрямленное напряжение емкостного, индуктивного и индуктивно-емкостного сглаживающих фильтров. Для этого подключить осциллограф параллельно нагрузке и зарисовать в прежнем масштабе осциллограммы выпрямленного напряжения на нагрузке U_H при каждом

включенном фильтре. При этом сравнить эффективность сглаживания емкостного фильтра с различным значением емкости фильтра ($C1$ и $C2$). Для этого измерить с помощью мультиметра постоянные составляющие выпрямленного напряжения U_d и с помощью осциллографа переменные составляющие $U_{dпер}$ выпрямленного напряжения при каждом включенном фильтре. Результаты измерений занести в табл. 2.

3.9. Снять внешние характеристики $U_d = f(I_d)$ выпрямителя при отсутствии фильтра, при емкостном, индуктивном и индуктивно-емкостном фильтре. Для этого, изменяя с помощью переключателя SA6 величину сопротивления нагрузки R_H , измерять величину выпрямленного напряжения U_d и выпрямленного тока I_d при каждом значении сопротивления нагрузки. Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

Тип фильтра	Параметр	Нагрузка						
		0	1	2	3	4	5	6
Отключен	U_d, B I_d, A							
Емкостной	U_d, B I_d, A							
Индуктивный	U_d, B I_d, A							
Индуктивно-емкостной	U_d, B I_d, A							

4. Требования к отчету по работе

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование работы и цель работы;
- б) принципиальную электрическую схему выпрямителя;
- в) результаты экспериментального исследования и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) осциллограммы напряжений;
- д) графики внешних характеристик, построенные по результатам измерений;
- е) вывод о фильтрующих свойствах сглаживающих фильтров и сравнительная оценка внешних характеристик.

5. Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют в выпрямителях силовой трансформатор, блок диодов и сглаживающий фильтр?
2. Изменится ли полярность выходного напряжения выпрямителя при изменении подключения выводов первичной или вторичной обмоток?
3. При каких условиях полупроводниковый диод проводит электрический ток?
4. Почему конденсатор включают параллельно нагрузке, а индуктивность – последовательно с ней?
5. Какой фильтр из исследуемых в лабораторной работе обеспечивает получение наименьшего коэффициента пульсаций и почему?
6. Какие параметры определяют наклон (жесткость) внешних характеристик выпрямителя?

Работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ И УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

1. Цель работы

Изучение характеристик и параметров тиристоров – обычных (асимметричных), симметричных и запираемых. Ознакомление с применением этих приборов в преобразователях электрической энергии.

2. Пояснения к работе

В лабораторной работе используются следующие модули: «Тиристоры», «Миллиамперметры», «Мультиметры». Для проведения лабораторной работы необходим двухканальный осциллограф.

Передняя панель модуля тиристоров представлена на рис. 1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображены: тиристор $VS1$, симметричный тиристор (симистор) $VS2$, запираемый тиристор $VS3$, активное и индуктивное сопротивления нагрузки однополупериодного выпрямителя R_n и L_n . Потенциометр $RP1$ служит для изменения напряжения в цепи управления. Ток управления тиристором ограничен резистором $R_{огр}$. Система управления (CY), формирует управляющие импульсы, сдвигаемые по фазе при изменении входного управляющего напряжения $U_{вх}$. Шунт $RS1 = 10\text{ Ом}$ служит для осциллографирования сигнала, пропорционального току через тиристор, а $RS2 = 10\text{ Ом}$ для осциллографирования тока управления. Усилитель $DA1$ позволяет усиливать сигнал тока, снимаемый с шунта. На передней панели установлены гнезда для осуществления внешних соединений ($X1 - X21$), ручка регулировки потенциометра $RP1$, переключатель вида нагрузки (активной или активно-индуктивной) $SA1$ и переключатель каналов подачи управляющих импульсов на соответствующие тиристоры $SA3$. Переключатель $SA2$ подает на схему либо постоянное (+15 В), либо переменное (~12 В) напряжение.

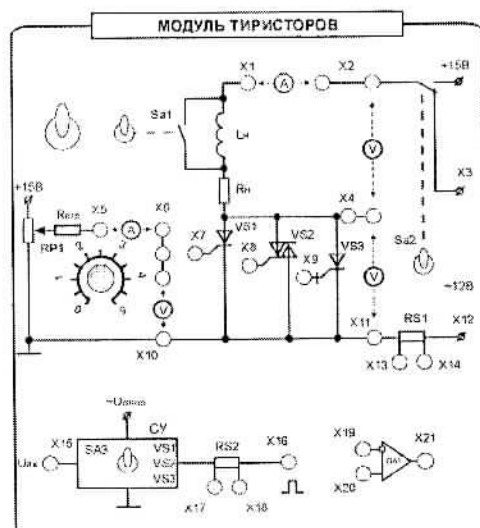


Рис. 1.

Подача питания выполняется при включении сетевого выключателя, установленного на модуле.

На рис. 2 приведена схема внешних соединений, производимых при выполнении работы.

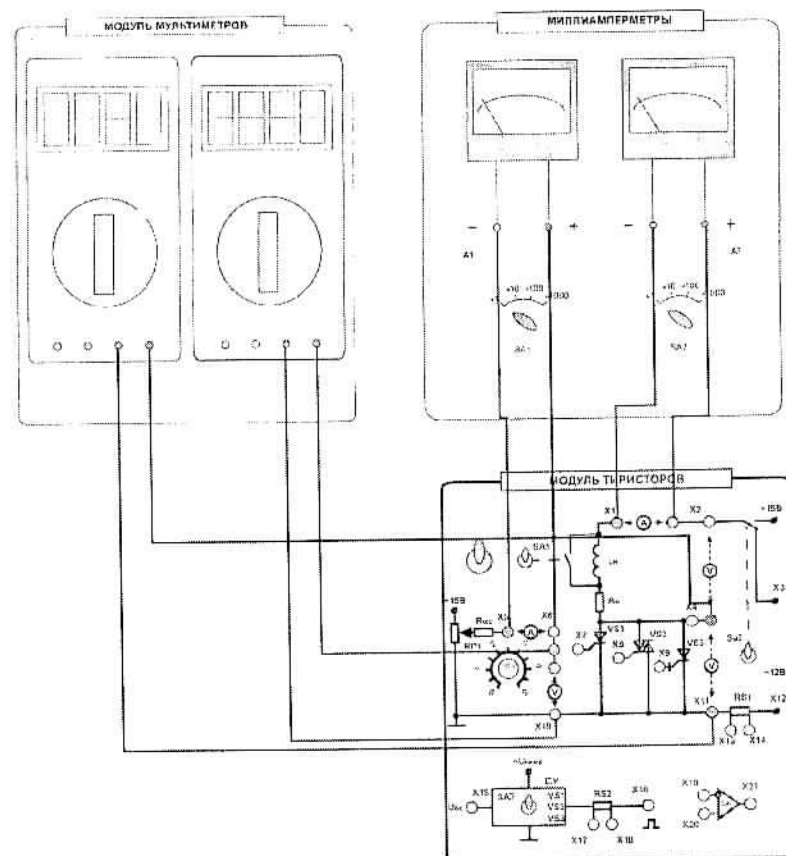


Рис. 2.

Тиристор представляет электропреобразовательный кремниевый полупроводниковый четырехслойный прибор с тремя и более $p-n$ переходами $П1$, $П2$, $П3$ (рис. 3) и двумя или тремя выводами. Тиристор работает как управляемый ключ, так как он имеет два устойчивых состояния: открытое (с малым сопротивлением) и закрытое (с большим сопротивлением). Переход из одного состояния в другое обусловлен действием внешних факторов: напряжения, тока, света и т.д. Различают диодные тиристоры (динисторы), имеющие два электрода (анод и катод), и триодные тиристоры (или просто тиристоры). Последние имеют третий управляющий электрод УЭ.

На рис. 4 показана вольтамперная характеристика тиристора.

Перевод динистора в открытое состояние осуществляется повышением приложенного прямого напряжения выше критического значения. При подаче прямого напряжения (анод положителен по отношению к катоду) переходы $П1$ и $П3$ открыты, а переход $П2$ – закрыт. Следовательно, ток тиристора мал (участок 1 на вольтамперной характеристике рис. 4). Когда приложенное напряжение достигнет $U_{вкл}$, происходит лавинообразное увеличение числа носителей заряда за счет лавинного умножения носителей в переходе $П2$ движущимися электронами и дырками. В результате ток в переходе быстро нарастает, т.е. электроны из n_2 -слоя и дырки из p_2 -слоя устремляются в p_2 -слой и n_2 -слой (переходы $П1$ и $П2$ открыты) и насыщают их не основными носителями зарядов, что приводит к существенному снижению сопротивления тиристора. В результате напряжение на резисторе R_n возрастает, напряжение на тиристоре падает, происходит переключение тиристора (участок 2 на вольтамперной характеристике тиристора). После переключения напряжение на тиристоре снижается до 0,5 ... 1,5 В. Участок 3 на вольтамперной

характеристике соответствует открытому состоянию тиристора и является

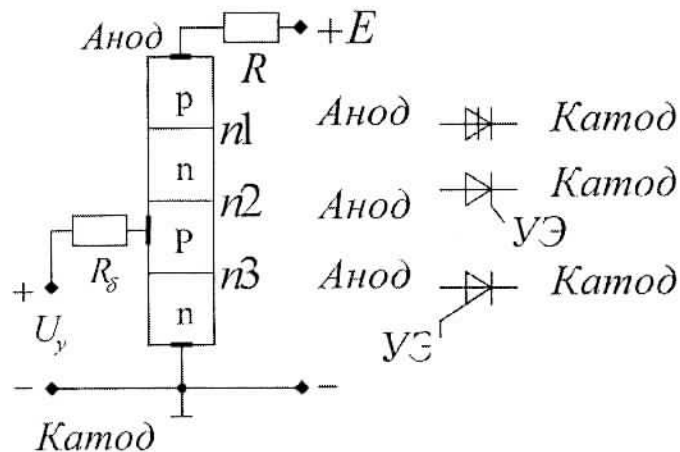


Рис. 3

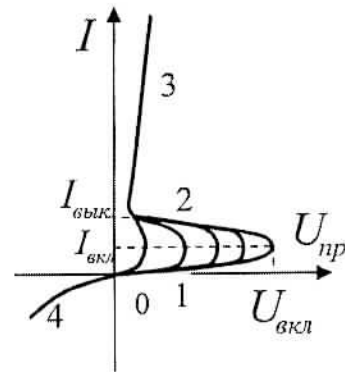


Рис. 4

рабочим. При уменьшении тока ниже $I_{\text{выкл}}$ восстанавливается высокое сопротивление перехода П2, т.е. тиристор переходит в закрытое состояние. Обычно выключение тиристора осуществляют изменением полярности приложенного напряжения или его снятием.

Напряжение $U_{\text{вкл}}$ при котором начинается лавинообразное нарастание тока, может быть снижено введением не основных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Эти добавочные носители заряда увеличивают число актов ионизации атомов в переходе, поэтому напряжение включения $U_{\text{вкл}}$ уменьшается. Добавочные носители заряда в триодном тиристоре вводятся в область p_2 вспомогательной цепью управления, питаемой от независимого источника U_y . После переключения через тиристор протекает прямой ток, величина которого зависит от сопротивления резистора R и напряжения источника E . Сигнал управления U_y не оказывает влияние на состояние открытого тиристора и может быть снят. Следовательно, для включения тиристора необходимо подать прямое напряжение и сигнал управления U_y . Амплитуда прямого анодного напряжения при отсутствии управляющего сигнала должна быть меньше $U_{\text{вкл}}$.

При подаче обратного напряжения на тиристор возникает небольшой ток $I_{\text{обр}}$ (участок 4, рис. 4), так как переходы П1 и П3 закрыты. Во избежание пробоя тиристора в обратном направлении необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр.макс}}$.

Основные параметры тириستоров:

- 1) максимальное напряжение в закрытом состоянии $U_{\text{зс.макс}}$;
- 2) максимальный ток в открытом состоянии $I_{\text{ос.макс}}$;
- 3) падение напряжения на открытом тиристоре $U_{\text{ос}}$;
- 1) отпирающий ток $I_{y.\text{от}}$ управляющего электрода;
- 2) отпирающее напряжение $U_{y.\text{от}}$ управляющего электрода;
- 3) ток удержания $I_{y.\text{д}}$;
- 4) максимальная мощность рассеяния $P_{\text{ср.макс}}$.

Симистор — "симметричный тиристор" — имеет обратную ветвь вольт-амперной характеристики, зеркально симметричную прямой ветви.

Запираемый тиристор – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого классическая четырёхслойная структура. Включают и выключают его подачей положительного и отрицательного импульсов тока на электрод управления.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Экспериментальное исследование тиристора.

3.1.1. Собрать схему для исследования тиристора на постоянном токе (рис. 2). Для этого замкнуть перемычкой гнезда X6, X7. Переключить тумблеры SA1, SA2 в верхнее положение. Для измерения тока управления включить между гнездами X5–X6 многопредельный миллиамперметр на пределе 10 мА, а для измерения анодного тока включить между гнездами X1–X2 миллиамперметр на пределе 100 мА. Для измерения анодного напряжения и напряжения управления включить мультиметры в режиме измерения постоянного напряжения;

3.1.2. Определить отпирающий постоянный ток управления $I_{y.om}$ и отпирающее постоянное напряжение управления $U_{y.om}$, при которых происходит включение тиристора. Для этого включить электропитание и, плавно увеличивая ток управления, зафиксировать, при каком значении тока и напряжения управления тиристор включится. О включении тиристора судить по резкому уменьшению напряжения на аноде и увеличению анодного тока.

3.1.3. Исследовать возможность выключения тиристора по цепи управления и по анодной цепи. Для этого, включив тиристор, уменьшать до нуля ток управления. Выключить тиристор, разорвав цепь анода. Наблюдая за изменением анодного тока и напряжения, сделать вывод об управляемости тиристора, сформулировать условия включения и выключения тиристора. Выключить питание.

3.2. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на тиристоре.

3.2.1. Собрать схему выпрямителя. Подключить мультиметр между гнездами X2–X4. Подключить вход CH2 осциллографа к гнезду X4, а корпус (⊥) к X11. Переключить тумблер SA1 в верхнее положение, замкнув индуктивность нагрузки L_n .

3.2.2. Включить питание и попробовать регулировать угол управления, изменяя величину тока управляющего электрода. Определить предельный угол управления и оценить качество регулирования. Выключить электропитание.

3.2.3. Подать на управляющий электрод импульсы от системы управления СУ. Для этого убрать перемычку X6 – X7 и соединить гнезда X7–X16. Соединить гнезда X6 – X15. Переключатель SA3 установить в позицию «VSI». Включить электропитание. Исследовать влияние угла управления α на величину напряжения на нагрузке и определить возможный диапазон изменения угла управления. Величину угла управления α оценивать по осциллограмме. Результаты измерений занести в табл. 1. Сравнить возможности регулирования напряжения с помощью импульсов и постоянным током.

Таблица 1

α , эл.град.						
U , В						

3.2.4. Зарисовать осциллограммы напряжения на нагрузке u_n , напряжения на тиристоре u_a и анодного тока i_a при заданном угле управления и активной нагрузке.

3.2.5. Переключить тумблер $SA1$ в нижнее положение, разомкнув индуктивность нагрузки L_n . Снять те же осциллограммы при заданном угле управления и активно-индуктивной нагрузке.

3.3. Экспериментальное исследование однофазного регулятора переменного напряжения на симисторе. Для этого выполнить пункты 3.2.2 ...3.2.5 при включении в качестве вентиля симистора, установив переключатель $SA3$ установить в позицию « $VS2$ ».

3.4. Экспериментальное исследование однополупериодного выпрямителя на запираемом тиристоре. Для этого выполнить пункты 3.2.2 ...3.2.5 при включении в качестве вентиля запираемого тиристора, установив переключатель $SA3$ установить в позицию « $VS3$ ».

4. Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Поясните вид выходной ВАХ тиристора.
2. Поясните вид входной ВАХ тиристора.
3. Как определить пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии?
4. Как снять выходную ВАХ тиристора?
5. Сравните свойства тиристоров и транзисторов по управляемости.
6. Объясните назначение диаграммы управления тиристора.
7. Чем отличаются выходные ВАХ тиристора и симистора?
8. Как выключить запираемый тиристор?
9. Как работает однополупериодный управляемый выпрямитель?
10. Что такое угол управления? По какой осциллограмме его можно определить?
11. На что влияет угол управления?
12. Можно ли в однофазном однополупериодном выпрямителе увеличить угол управления более 90 град. при управлении постоянным током?
13. От чего зависит форма напряжения на нагрузке?
14. Можно ли выполнить управляемый выпрямитель на транзисторе? Если нет, то почему, если да, то как?

Работа № 6. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

1. Цель работы

Изучение основных характеристик и параметров операционного усилителя. Знакомство с электронными устройствами на базе операционного усилителя.

2. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуется операционный усилитель (ОУ) типа К140УД17, некоторые характеристики которого приведены в табл. 1. Передняя панель лабораторного модуля операционного усилителя представлена на рис. 1. Типовая схема включения операционного усилителя типа К140УД17 приведена на рис. 2.

Таблица 1

Коэффициент усиления по напряжению, K_u	Напряжение питания, $\pm U_{п.}$	Сопротивление нагрузки, R_n	Диапазон выходных напряжений $\pm U_{вых.}$
$15 \cdot 10^4$	3...18 В	2 кОм	12 В

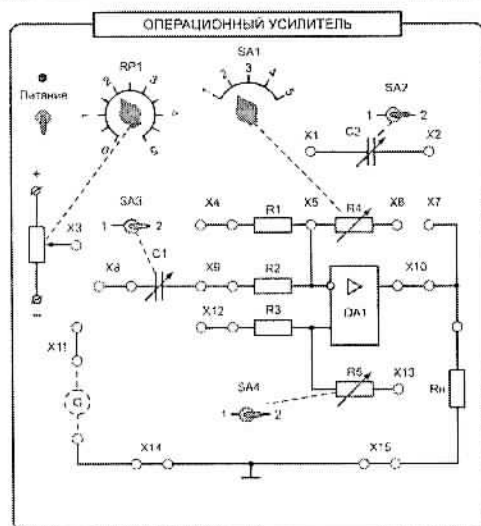


Рис. 1

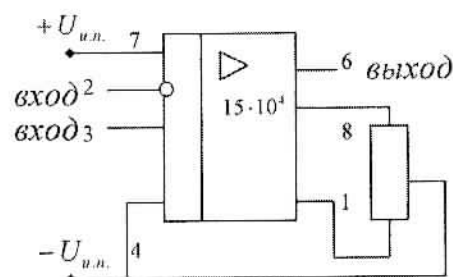


Рис. 2

На передней панели изображена мнемосхема исследуемого усилителя и установлены регулирующие и коммутирующие элементы. Лабораторный модуль позволяет исследовать характеристики и параметры инвертирующего, суммирующего и вычитающего усилителей, интегрирующего и дифференцирующего устройств, компаратора, мультивибратора, фильтра верхних и нижних частот. Исследуемые схемы собираются на модуле установкой соответствующих перемычек. С помощью потенциометра $RP1$ на вход усилителя может быть подано регулируемое постоянное напряжение. С помощью переключателей $SA1...SA4$ изменяются параметры соответствующих элементов схемы (табл. 2).

Таблица 2

SA1	SA2	SA3	SA4
$R4$, кОм	$C2$, нФ	$C1$, нФ	$R5$, кОм
20; 50; 100; 150; 200	6,8; 10	1,5; 10	200; 400

Большому значению на шкалах переключателей соответствуют большие значения номиналов резисторов и конденсаторов.

В качестве источника переменного входного сигнала используется модуль «Функциональный генератор».

Измерение постоянных напряжений осуществляется при помощи модуля «Мультиметры». Для осциллографирования сигналов применяется двухканальный осциллограф (в состав комплекса не входит).

Для получения нужных свойств в ОУ вводят отрицательные обратные связи. В ОУ с отрицательной обратной связью коэффициент усиления зависит только от параметров цепи обратной связи и не зависит от параметров самого усилителя. В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой делитель напряжения. При этом ОУ работает как линейный усилитель. Используют две основные схемы включения ОУ, охваченного цепью ОС: инвертирующую и не инвертирующую. Инвертирующее включение (рис. 3) применяют в большинстве аналоговых электронных устройств.

Качественно работа инвертирующего усилителя иллюстрируется амплитудной (передаточной) характеристикой $U_{вых} = f(U_{вх})$ (рис. 4) и амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) $K_u = F(f)$ (рис. 5).

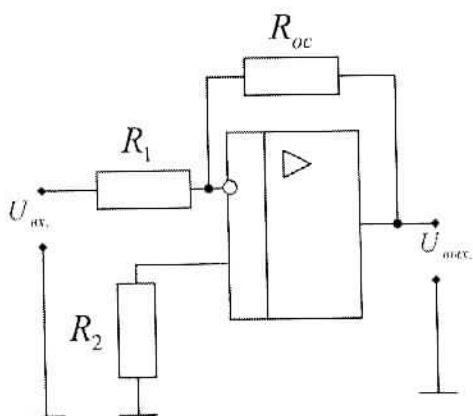


Рис. 3

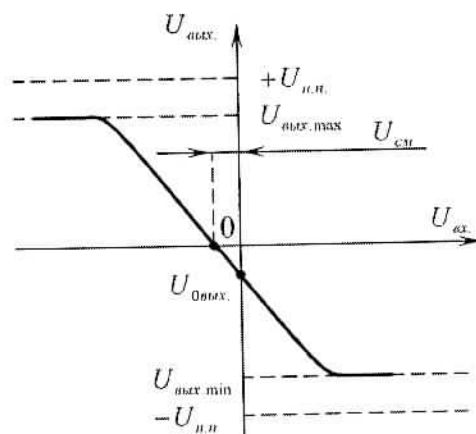


Рис. 4

Амплитудная характеристика усилителя (рис. 4) имеет явно выраженные нелинейные участки и линейный участок. В пределах линейного участка выходное напряжение пропорционально входному напряжению. При отсутствии входного сигнала $U_{вх} = 0$ выходное напряжение покоя ОУ $U_{0вых}$ отлично от нуля и определяет статическую погрешность ОУ. Она обусловлена напряжением смещения нуля ОУ $U_{см}$ (милливольты), средним входным током $I_{вх}$ и разностью входных токов $\Delta I_{вх}$ ОУ. Поэтому

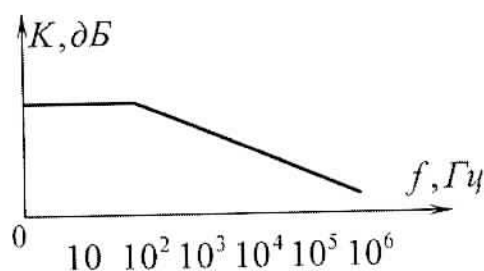


Рис. 5

рекомендуется выбирать $R_2 = R_1 R_{ос} / (R_1 + R_{ос})$. Обычно $R_1 > 5 \text{ кОм}$. Устранить выходное напряжение покоя $U_{0вых}$ можно внешней регулировкой (балансировкой нуля). Однако лучшей гарантией получения минимального напряжения ошибок является правильный выбор типа операционного усилителя и выполнение необходимых соотношений резисторами схемы. При этом желательно

использовать в устройстве резисторы небольших номиналов. При приближении $U_{\text{вых}}$ к $U_{\text{н.н}}$ ОУ выходит из линейного режима и переходит в режим ограничения с уровнем насыщения $U_{\text{вых max}}$, близким к напряжению питания.

Коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя на основе идеального операционного усилителя $K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = -R_2/R_1$, где знак «минус» указывает на инверсию сигнала.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя $R_{\text{вх}} \approx R_1$.

Амплитудно-частотная характеристика $K_u = F(f)$, представляющая собой зависимость модуля коэффициента усиления по напряжению K_u от частоты f , характеризует частотные свойства усилителя.

Схема инвертирующего интегратора на основе операционного усилителя (рис. 6), в цепи обратной связи которого установлен конденсатор C , получается установкой соответствующей.

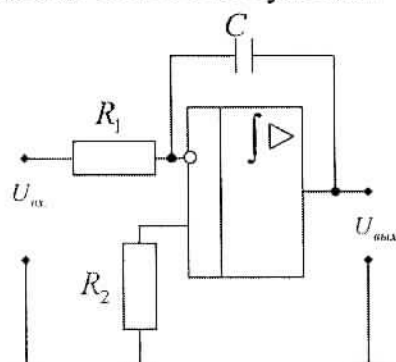


Рис. 6

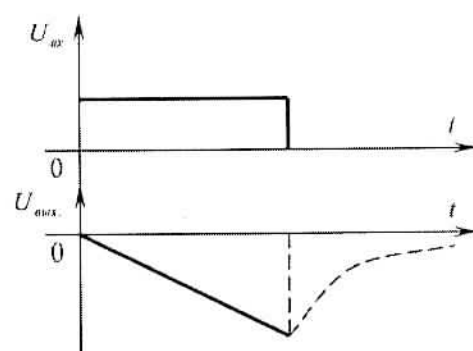


Рис. 7

Выходное напряжение интегрирующего усилителя (рис. 7)

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt + U_{\text{вых}}(0), \text{ где } U_{\text{вых}}(0) - \text{напряжение на выходе ин-}$$

тегратора к моменту начала интегрирования. При подаче, например, на инвертирующий вход ОУ сигналов прямоугольной формы выходное напряжение имеет треугольную форму с тем же периодом, что и у входного прямоугольного сигнала. Амплитуда выходного напряжения интегратора при прямоугольной форме входного сигнала $U_{\text{выл}} = -U_{\text{вх}} \frac{t_u}{R_1 C}$, где t_u – длительность входного импульса, $U_{\text{вх}}$ –

амплитуда входного сигнала. При периодическом прямоугольном входном сигнале на выходе интегратора получается напряжение треугольной формы. Амплитудное значение выходного напряжения достигается за четверть периода прямоугольного входного сигнала или половину длительности прямоугольного импульса t_u . При

$$\text{этом } U_{\text{вых max}} = \frac{U_{\text{вх max}} t_u}{2\tau}.$$

Такое включение ОУ часто используется при создании генераторов пилообразного напряжения или напряжения треугольной формы.

Избирательными усилителями (активными фильтрами) называют усилители, которые из совокупности принимаемых сигналов выбирают и усиливают только синусоидальные сигналы, занимающие определенный участок спектра частот.

Активные фильтры часто реализуют, используя пассивные RC – цепи и ОУ в качестве активного элемента.

Избирательные (селективные) свойства таких устройств (то есть их способность выделять полезный сигнал и ослаблять помехи) характеризуются их АЧХ. Избирательные усилители обладают особой формой АЧХ.

Полосу частот, в которой осуществляется усиление сигнала, называют полосой пропускания (прозрачности). Полосу частот, в которой сигналы подавляются, называют полосой заграждения. В зависимости от взаимного расположения полос пропускания и заграждения различают виды фильтров: нижних частот, верхних частот, полосовые пропускания, полосовые заграждения. Значения коэффициента передачи (усиления) в полосах пропускания и заграждения могут значительно различаться. Поэтому обычно АЧХ фильтра представляет собой зависимость его нормированного коэффициента усиления K/K_0 от частоты f в логарифмическом масштабе. Фильтр нижних частот без изменения передает сигналы низкой частоты и обеспечивает затухание высокочастотных сигналов. Вид АЧХ активного фильтра нижних частот определяется типом RC – фильтра.

На рис. 8 приведена схема активного фильтра, построенного на основе инвертирующего ОУ и интегратора. Такой фильтр представляет собой инвертирующий усилитель с постоянным коэффициентом усиления в полосе частот от $f_n = 0$ до f_c . Частота среза f_c , с которой начинается уменьшение коэффициента усиления, регулируется цепью обратной связи $f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$. На частоте выше

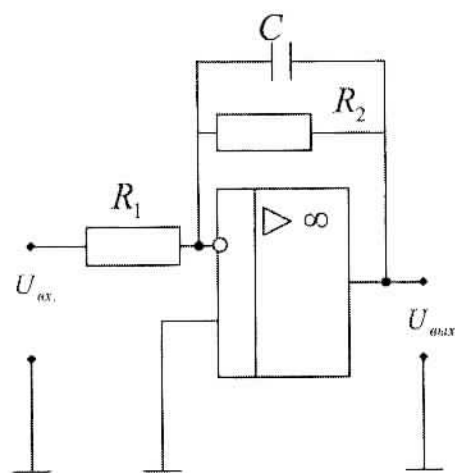


Рис. 8

коэффициент усиления уменьшается на 20 дБ/дек, что соответствует уменьшению коэффициента усиления в два раза при удвоении частоты. Для получения АЧХ с большой крутизной применяют каскадное соединение простых фильтров.

На рис. 9 представлена простейшая схема и характеристика устройства на ОУ с разомкнутой цепью обратной связи, называемого компаратором. Компаратор осуществляет переключение выходного напряжения, когда непрерывно изменяющийся входной сигнал становится выше или ниже заданного значения.

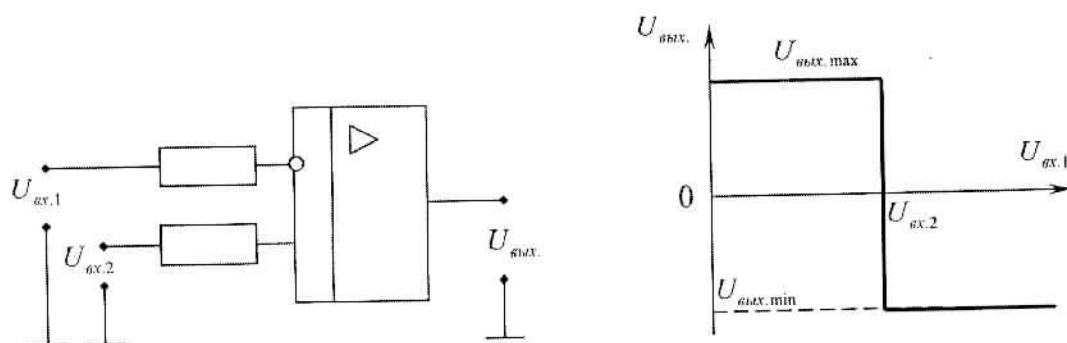


Рис. 9

Такой компаратор представляет собой ОУ без обратной связи и предназначен для сравнения *однополярных* сигналов. Выходное напряжение компаратора $U_{вых} = U_{вых. min}$, если $U_{вх1} > U_{вх2}$, и $U_{вых} = U_{вых. max}$, если $U_{вх1} < U_{вх2}$. Благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ даже при малой разности $(U_{вх1} - U_{вх2})$ происходит переключение схемы из состояния $U_{вых. max}$ в состояние $U_{вых. min}$. Следовательно, компаратор осуществляет сравнение напряжения аналогового сигнала с эталонным с высокой точностью.

Для сравнения разнополярных сигналов может использоваться одновходовая схема компаратора (рис. 10). Выходное напряжение компаратора будет положительным при подаче на вход компаратора сигнала синусоидальной формы $U_{вх1}$ и положительного постоянного сигнала $U_{оп}$, если $U_{вх1} < U_{оп}$, и будет отрицательным, если $U_{вх1} > U_{оп}$ (рис. 11). Длительность выходных прямоугольных импульсов зависит от величины постоянного напряжения $U_{оп}$ на входе.

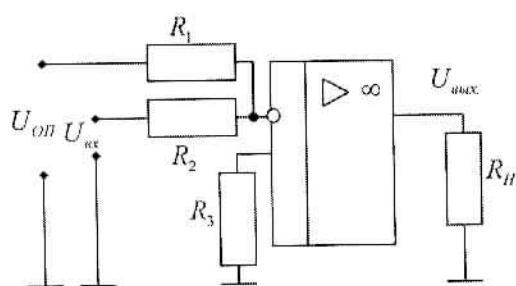


Рис. 10

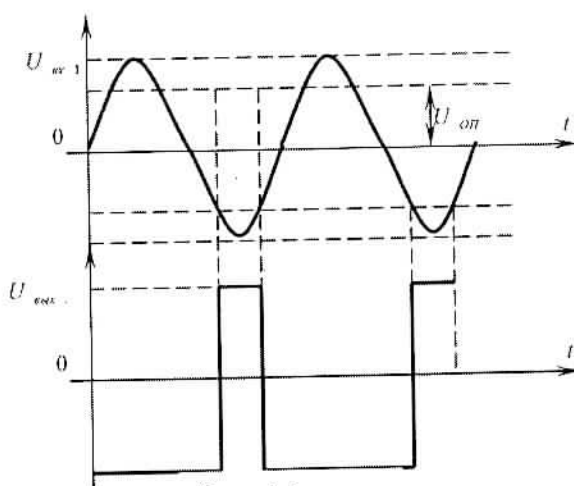


Рис. 11

Компараторы применяются в качестве датчиков полярности сигналов, для управления цифровыми схемами, управления ключами с помощью аналоговых сигналов, для квантования аналоговых напряжений, в генераторах специальной формы.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Исследование инвертирующего усилителя.

3.1.1. Собрать схему инвертирующего усилителя, установив переключки согласно рис. 12. Подключить к входу (гнезда X9, X14) и выходу (гнезда X10 и X15) операционного усилителя мультиметры в режиме измерения постоянного напряжения. Установить переключатель *SA1* в соответствующее положение с учетом заданного преподавателем значения сопротивления *R4*.

3.1.2. Снять и построить амплитудную (передаточную) характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ на постоянном токе при двух полярностях входного сигнала. В качестве источника входного сигнала использовать выходное напряжение потенциометра *RPI*. Для этого установить переключку между гнездами X3 и X9. Сопротивления резисторов установить в соответствии с указанием преподавателя. Включив электропитание, определить максимальные выходные напряжения $\pm U_{\text{вых max}}$ и соответствующие им входные напряжения $\pm U_{\text{вх max}}$. Затем, изменяя входное постоянное напряжение в пределах от $-1,2 U_{\text{вх max}}$ до $+1,2 U_{\text{вх max}}$ снять амплитудную

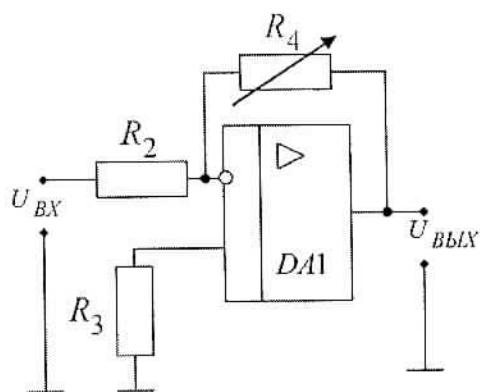


Рис. 12

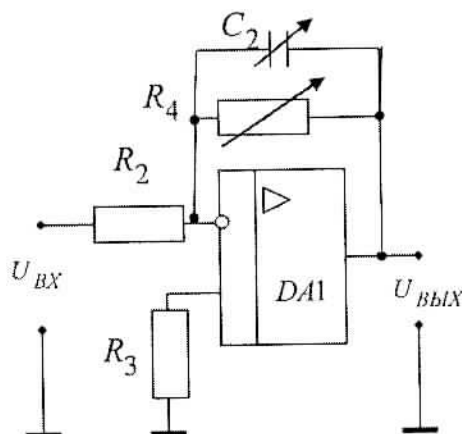


Рис. 13

характеристику. Результаты измерений занести в табл. 3. По амплитудной характеристике определить коэффициент усиления по напряжению.

Таблица 3

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$										
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$										
$K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$										

3.1.3. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику $K_u = F(f)$ усилителя при $U_{\text{вх}} = \text{const}$ для заданного значения резистора *R4*. Для этого на вход усилителя подать напряжение от функционального генератора. При снятии характеристики амплитуда входного сигнала выбирается на линейном участке амплитудной характеристики. Амплитуды входного и выходного сигналов измерять осциллографом. Результаты занести в табл. 4.

По данным опыта вычислить коэффициенты усиления по напряжению и построить амплитудно-частотную характеристику усилителя, откладывая частоту и коэффициент усиления в логарифмическом масштабе. Определить значения

граничных частот полосы пропускания усилителя из условия, что коэффициент частотных искажений $M_H = M_G = 1,41$.

Таблица 4

$f, \text{Гц}$										
$U_{ВХ}, \text{В}$										
$U_{ВЫХ}, \text{В}$										
$K_u = U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$										

3.2. Исследование активного фильтра

3.2.1. Собрать схему активного фильтра нижних частот согласно рис. 13. Напряжение на входе и выходе фильтра контролировать при помощи осциллографа. Значение резистора $R4$ и величину емкости конденсатора $C2$ установить в соответствии с указанием преподавателя.

3.2.2. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику фильтра при заданных параметрах элементов фильтра. Результаты измерения занести в табл. 5.

Таблица 5

$f, \text{Гц}$									
$U_{ВХ}, \text{В}$									
$U_{ВЫХ}, \text{В}$									
$K_u = U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$									

3.2.3. Изменить по указанию преподавателя параметры элементов фильтра. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику фильтра при новых параметрах элементов фильтра.

3.3. Исследование инвертирующего интегратора

3.3.1. Собрать схему инвертирующего интегратора согласно рис. 14. Величину емкости конденсатора $C2$ установить в соответствии с указанием преподавателя. Подключить к входу усилителя функциональный генератор. Установить заданную частоту и амплитуду прямоугольного выходного сигнала генератора. Форму, амплитуду, период и частоту входного и выходного сигналов интегратора контролировать осциллографом.

3.3.2. Зарисовать в одном масштабе осциллограммы входного $U_{вх}$ и выходного

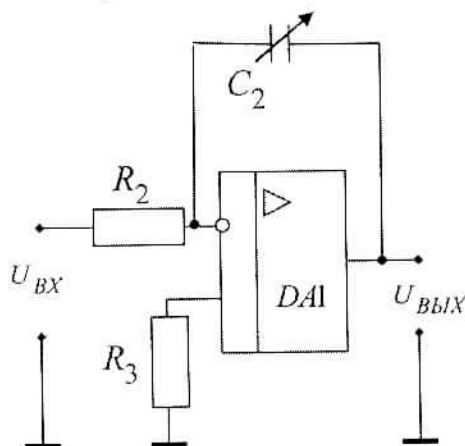


Рис. 14

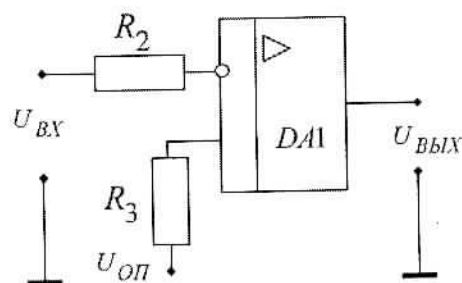


Рис. 15

$U_{вых}$ напряжений интегратора при подаче на вход сигналов прямоугольной формы

от функционального генератора. Определить амплитуды $U_{вх\ m}$ и $U_{вых\ m}$, длительность t_m , период T и частоту f входного и выходного сигналов.

3.4. Исследование двухвходового компаратора.

3.4.1. Собрать схему двухвходового компаратора согласно рис. 15. В качестве опорного напряжения $U_{оп}$ использовать регулируемое напряжение, снимаемое с гнезда ХЗ. К инвертирующему входу подключить функциональный генератор, используя у него выход «~». Установить заданную частоту переменного напряжения и заданное значение опорного напряжения.

3.4.2. Снять осциллограммы входных и выходных напряжений, иллюстрирующих работу компаратора при сравнении постоянного (опорного) и переменного напряжений.

4. Содержание отчета

- а) Наименование и цель работы;
- б) принципиальные электрические схемы включения исследуемых электронных устройств;
- в) результаты экспериментального исследования и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) амплитудная характеристика и амплитудно-частотные характеристики с результатами расчетов, осциллограммы напряжений;
- д) выводы о свойствах операционного усилителя и исследованных устройств.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое амплитудная характеристика?
2. Что такое амплитудно-частотная характеристика?
3. Что такое инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ?
4. Какая обратная связь используется в инвертирующем усилителе, выполненном на ОУ?
5. Как рассчитать коэффициент усиления инвертирующего усилителя?
6. Как экспериментально определить коэффициент усиления усилителя?
7. Какая обратная связь используется в инвертирующем интеграторе?
8. Как определить с помощью осциллографа амплитуду, длительность, период и частоту выходных сигналов интегратора?
9. Что такое активный фильтр?
10. Как определить по амплитудно-частотной характеристике полосу пропускания частот фильтра?
11. От каких элементов схемы зависит полоса пропускания фильтра?
12. Каково назначение компаратора?
13. По каким схемам может быть построен компаратор?

Работа № 7. МУЛЬТИВИБРАТОР НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

1. Цель работы

Изучение схемы включения и основных характеристик симметричного и несимметричного мультивибраторов, выполненных на базе операционного усилителя.

2. Пояснения к работе

Мультивибратором называется электронное устройство с двумя временно устойчивыми состояниями, представляющее собой генератор импульсов прямоугольной формы. Обычно они служат для запуска в работу других импульсных устройств.

Наиболее распространены мультивибраторы на основе операционного усилителя. Различают симметричные и несимметричные мультивибраторы. У первых длительность прямоугольных импульсов и интервалы времени между ними равны, у вторых различны. В данной работе исследуется работа симметричного мультивибратора, схема включения которого изображена на рис. 1. Операционный усилитель здесь играет роль компаратора.

Рассмотрим работу мультивибратора. На неинвертирующий вход операционного усилителя подается опорное напряжение U_0 с делителя напряжения на резисторах R_2 и R_3 , а на инвертирующий вход – напряжение конденсатора U_{c1} интегрирующей цепочки $RI C1$. Предположим, что конденсатор $C1$ был разряжен, т.е. $U_{c1}=0$ при $t < t_1$ (рис. 2), а при включении электропитания в момент t_1 выходное напряжение $U_{вых}$ стало положительным. В таком случае из-за положительной обратной связи ($U_0 > 0$), осуществляемой цепью $R_2 R_3$, неинвертирующий вход операционного усилителя будет под положительным потенциалом. Это приводит к дальнейшему лавинообразному повышению выходного напряжения $U_{вых}$ максимального значения выходного напряжения $U_{вых max}$. Конденсатор $C1$ с момента времени t_1 заряжается током через резистор $R1$ с постоянной времени $\tau = RI C1$. В это время на неинвертирующем входе поддерживается постоянное напряжение $U_0 = U_{вых max} R_3 / (R_2 + R_3)$.

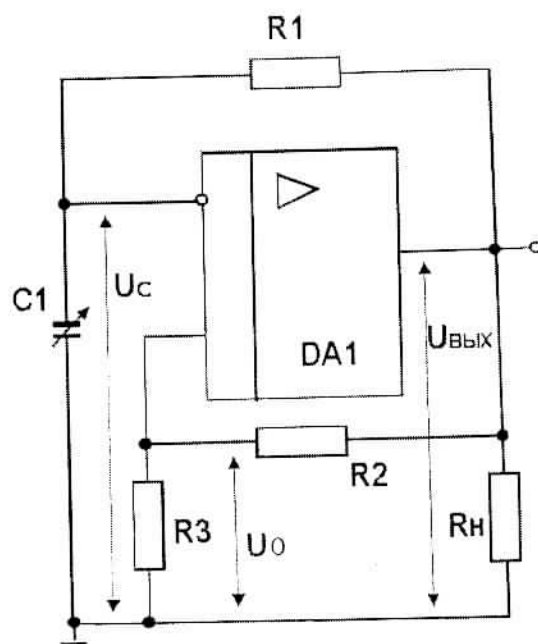


Рис. 1

В момент времени t_2 (рис. 2) напряжение на конденсаторе достигает опорного напряжения U_0 . Операционный усилитель срабатывает как компаратор. Выходное напряжение $U_{вых}$ и опорное напряжение U_0 изменяют знак. Так как напряжение на конденсаторе не может измениться скачком, то, начиная с момента времени t_2 , происходит перезаряд конденсатора.

Напряжение на конденсаторе U_c стремится к напряжению $-U_{вых\ max}$. Однако конденсатор не успевает зарядиться до этого напряжения, т.к. в момент времени t_3 напряжение на нем достигает величины напряжения $-U_0$ на инвертирующем входе операционного усилителя и произойдет очередное переключение компаратора. После этого переключения напряжение на конденсаторе U_c начинает стремиться к $U_{вых\ max}$.

Выходное напряжение симметричного мультивибратора на операционном усилителе представляет собой разнополярные прямоугольные импульсы с амплитудой, равной выходным напряжениям $U_{вых\ max}$ и $-U_{вых\ max}$ с периодом следования $T = 2 R_1 C_1 \ln(1 + 2 R_3 / R_2) 10^{-6}$.

Частота следования импульсов $f = 1 / T$.

Рис. 2

В несимметричном мультивибраторе интервалы времени зарядки конденсатора $t_2 - t_1$ и времени его разрядки $t_3 - t_2$ различны. Это достигается включением в цепь обратной связи параллельно двух различных резисторов: один для зарядки, а другой для разрядки конденсатора. Последовательно с резистором включается диод, прямое направление которого соответствует току зарядки или току разрядки конденсатора.

В табл. 1 приведены параметры элементов модуля операционного усилителя.

Таблица 1

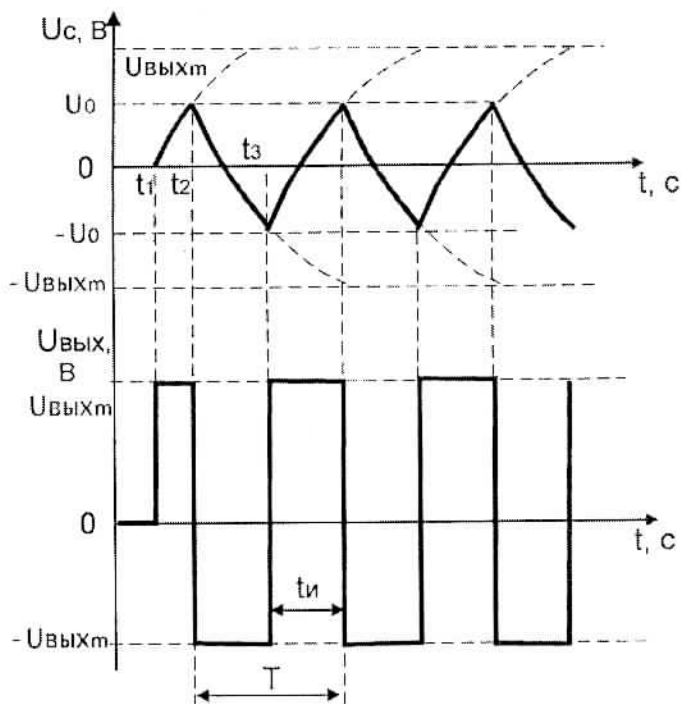
R4, кОм	R5, кОм	C1, нФ	C2, нФ
20; 50; 100; 150; 200	200; 400	1,5; 10	6,8; 10

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль операционного усилителя, осциллограф).

3.2. Для исследования симметричного мультивибратора собрать на модуле «Операционный усилитель» схему в соответствии с рис. 3. Установить заданные преподавателем значения параметров элементов схемы. Подключить осциллограф для снятия осциллограмм напряжений.

В соответствии с заданными значениями параметров элементов схемы рассчитать период и частоту следования выходных импульсов мультивибратора. Предъявить схему для проверки преподавателю.



3.3. Включить электропитание стенда, модуля и осциллографа. Зарисовать осциллограммы напряжения $U_{вых}(t)$ на выходе мультивибратора и на инвертирующем входе операционного усилителя $U_c(t)$. Определить масштабы осциллограмм, а также период следования импульсов и их частоту. Сравнить расчетное значение частоты следования импульсов мультивибратора с их экспериментальным значением.

3.4. Исследовать влияние параметров схемы на частоту следования импульсов мультивибратора. Для этого изменить по указанию преподавателя значения резисторов $R4$ и $R4$, а также конденсатора $C2$. Зарисовать осциллограммы напряжения $U_{вых}(t)$ на выходе мультивибратора и на инвертирующем входе операционного усилителя $U_c(t)$. Определить масштабы осциллограмм, а также период следования импульсов и их частоту.

3.5. Для исследования несимметричного мультивибратора собрать на модуле «Операционный усилитель» схему в соответствии с рис. 4. Использовать выпрямительный диод $VD1$ модуля диодов. Установить заданные преподавателем значения параметров элементов схемы. Подключить осциллограф для снятия осциллограмм напряжений. Предъявить схему для проверки преподавателю. Включить электропитание стенда, модуля и осциллографа. Зарисовать осциллограммы напряжения $U_{вых}(t)$ на выходе мультивибратора и на инвертирующем входе операционного усилителя $U_c(t)$. Определить масштабы осциллограмм, а также период следования импульсов и их частоту. Определить соотношение времени положительного и отрицательного импульсов.

3.7. Исследовать влияние величины сопротивления $R4$ соотношение времени положительного и отрицательного импульсов на выходе мультивибратора.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схему экспериментов;
- в) экспериментальные осциллограммы;
- г) расчетные результаты;
- д) выводы о свойствах исследованных схем.

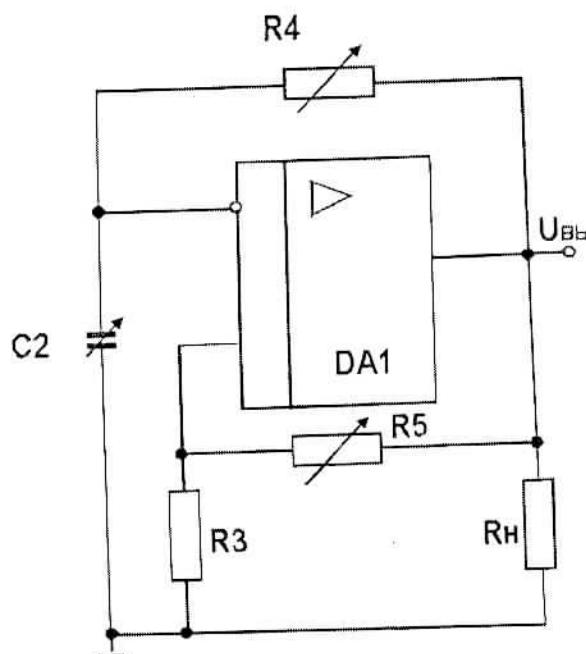


Рис. 3

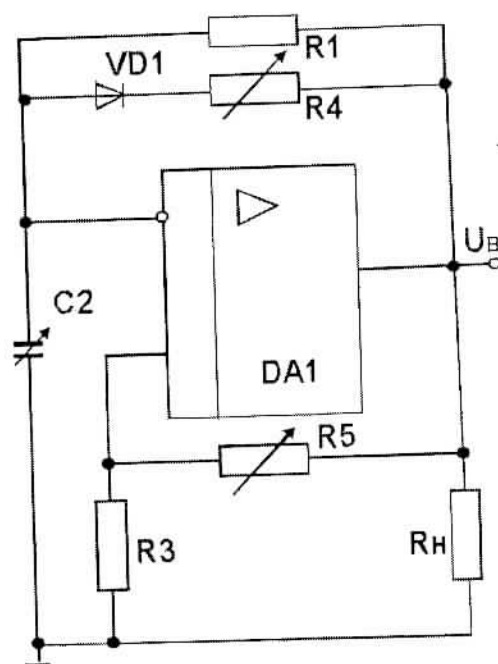


Рис. 4

5. Контрольные вопросы

1. Что такое «мультивибратор»?
2. Пояснить принцип работы симметричного мультивибратора.
3. Какую функцию выполняет операционный усилитель в схеме мультивибратора?
4. Какие отличия в схемах симметричного и несимметричного мультивибратора?
5. От каких параметров схемы зависит частота следования импульсов на выходе мультивибратора?
6. Как можно изменить соотношение положительного и отрицательного импульсов на выходе несимметричного мультивибратора?

Работа № 8. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

1. Цель работы

Цель работы – ознакомление с основными выполняемыми функциями простейших логических элементов.

2. Описание лабораторного модуля

Работа проводится на лабораторном модуле “Логические элементы и триггеры”. Внешний вид лабораторного модуля изображен на рис. 1.

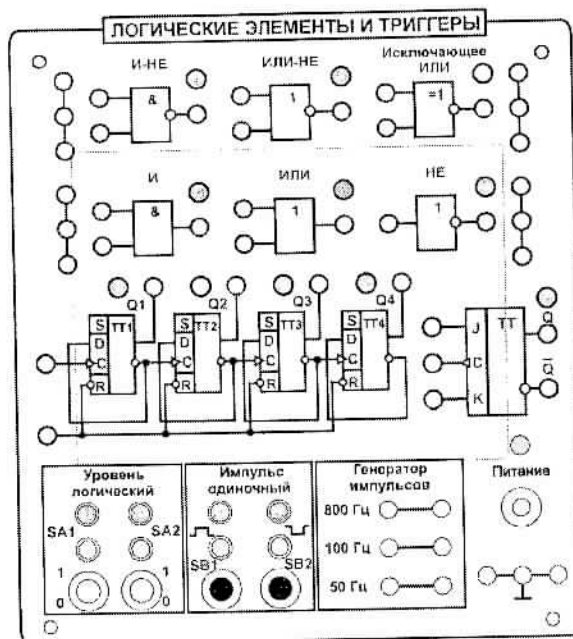


Рис. 1.

Генератор серии импульсов предназначен для образования последовательности прямоугольных импульсов с частотами 1,6 кГц, 0,2 кГц и 0,1 кГц.

Источник логического уровня предназначен для формирования уровня логической “1” и логического “0”. Включение соответствующих сигналов осуществляется с помощью тумблеров “Уровень логический”.

Генератор одиночных импульсов предназначен для формирования одиночных импульсов положительной и отрицательной полярности. При нажатии кнопки “Импульс одиночный” на выходе генератора, находящемся в состоянии “0”, вырабатывается сигнал “1”, а на выходе, находящемся в состоянии “1” вырабатывается сигнал “0”. С помощью светодиода осуществляется индикация сигнала логической “1”.

Устройства коммутации предназначены для подключения входных цепей исследуемых схем к соответствующим гнездам. Устройства коммутации состоят из тумблеров, кнопок, гнезд.

Органы управления и индикации объединены в функциональные группы и снабжены надписями на лицевой панели.

Логические элементы являются разновидностью цифровых электронных устройств, которые предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной, в частности двоичной функции. Они применяются для построения ЦВМ, цифровых узлов измерительных приборов, аппаратуры автоматического управления и связи.

В работе исследуются простейшие комбинационные логические схемы типа И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, выполненные на интегральных микросхемах (ИМС) К155ЛА3. Данная микросхема представляет сборку из четырех двухвходовых логических схем И-НЕ (элементы Шеффера), выполненную по ТТЛ логике. Условное изображение, структурная схема, иллюстрирующая последовательность операций, временная диаграмма работы и принципиальная схема одного базового элемента изображена на рис. 2 (а, б, в, г, соответственно).

Основные параметры ИМС К155ЛА3:

напряжение питания $U_{\Pi} = 5 \text{ В}$;

потребляемая мощность $P_{\text{пот}} \leq 110 \text{ мВт}$;

напряжение логической единицы $U_{\text{вых}} \geq 2,4 \text{ В}$;

напряжение логического нуля $U \leq 0,4 \text{ В}$;

помехоустойчивость статическая $U_{\text{н.ст.}} \leq 0,4 \text{ В}$;

коэффициент разветвления по выходу $K_{\text{раз}} = 10$;

входной ток логического нуля $I_{\text{вх1}}^0 \leq 1,6 \text{ мА}$;

входной ток логической единицы $I_{\text{вх1}} \leq 40 \text{ мкА}$;

выходной ток логической единицы $I_{\text{вых}} \leq 10 \text{ мкА}$.

На выходе схемы И-НЕ всегда имеет сигнал логической “1”, кроме случая одновременного воздействия на все входы схемы сигналов логической единицы.

На базе логического элемента И-НЕ могут быть построены структуры, выполняющие функции различных логических элементов.

Логическая схема И, условное обозначение которой показано на рис. 3а, имеет несколько входов и один выход. На выходе такой схемы сигнал, соответствующий логической “1”, появляется только при наличии сигналов “1” на обоих входах. Логическая схема И осуществляет функцию логического умножения или конъюнкцию.

На рис.3б показана структура логического элемента И, построенного из двух логических схем И-НЕ.

Условное обозначение логического элемента ИЛИ и структура элемента ИЛИ, построенного на трех логических схемах И-НЕ, представлены на рис. 4. Такая логическая схема осуществляет функцию логического сложения или дизъюнкцию. На выходе схемы сигнал, соответствующий логической “1”, будет в том случае, если он действует хотя бы на одном входе.

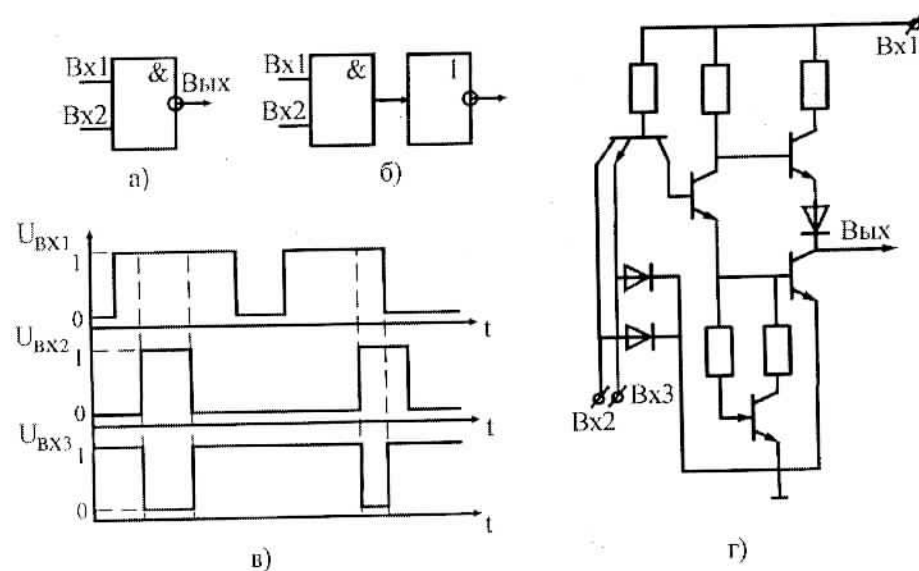


Рис. 2

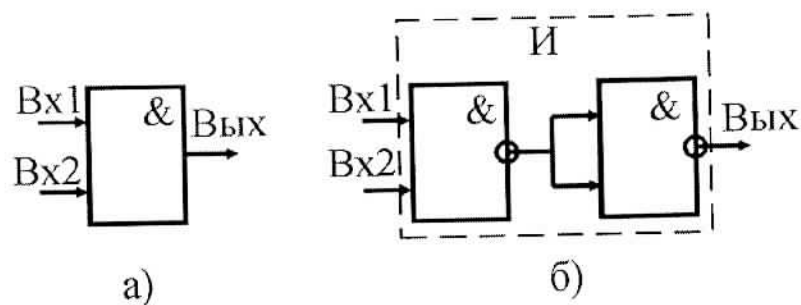


Рис. 3

Логическая схема НЕ, условное обозначение и построение на базе элемента И-НЕ которой показано на рис. 5, имеет один вход и один выход.

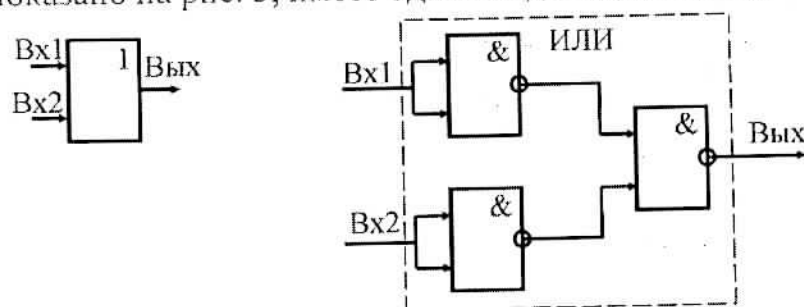


Рис. 4

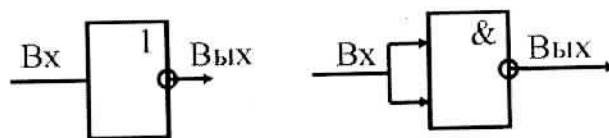


Рис. 5

Сигнал, соответствующий логической "1", появляется на выходе этой схемы при наличии логического "0" на входе. Сигналу "1" на входе соответствует сигнал логического "0" на выходе.

Условное обозначение логической схемы ИЛИ-НЕ и структурная схема, показывающая построение такой схемы из четырех элементов И-НЕ, представлены на рис. 6.

На выходе логической схемы ИЛИ-НЕ сигнал логической “1” будет только в случае воздействия на всех входах сигнала логического “0”.

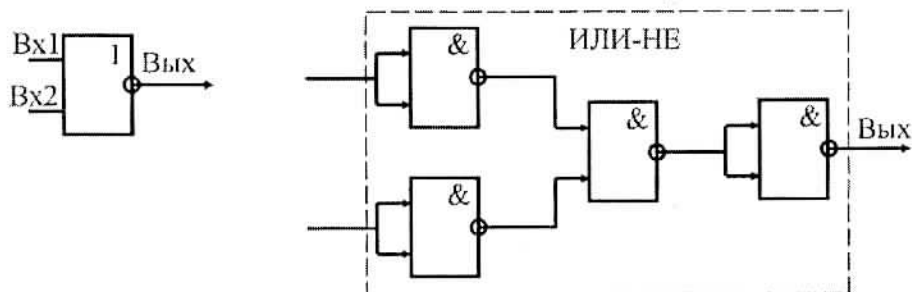


Рис. 6

3. Порядок выполнения работы

3.1. Подготовить стенд к проведению исследований. Для этого:

- включить тумблер “Питание”;
- установить оба тумблера “Уровень логический” в нижнее положение.

3.2. Исследование базового логического элемента И-НЕ.

3.2.1. Проверить переключательную функцию логического элемента И-НЕ (таблицу состояний или истинности). Для этого (рис. 7) подавать с помощью соединительных проводов сигналы с гнезд “Уровень логический” задавая различные комбинации входных логических сигналов. Выходной сигнал контролируется светодиодом. Результаты занести в табл. 1.

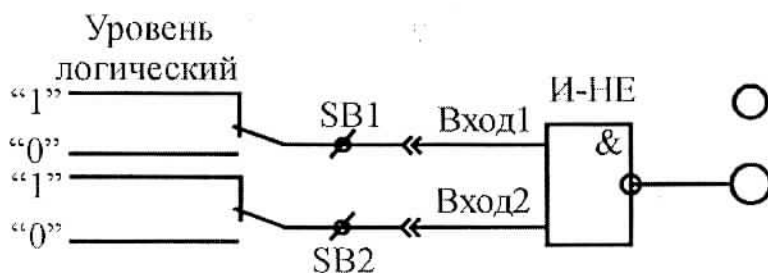


Рис. 7

Таблица 1

$U_{ВХ1}$	$U_{ВХ2}$	$U_{ВЫХ}$					
		И-НЕ	ИЛИ-НЕ	И	ИЛИ	НЕ	Исключающее ИЛИ
0	0						
1	0						
0	1						
1	1						

3.2.2. Проверить работу логического элемента И-НЕ, подавая от генератора импульсов сигналы частотой 1,6 кГц и 0,2 кГц на входы элемента с помощью соединительных проводов. Для контроля вида входных и выходных сигналов к соответствующим гнездам подключать двухканальный осциллограф. Зарисовать осциллограммы входных и выходных сигналов. Выключить тумблер “Питание”.

3.3. Исследование логического элемента ИЛИ-НЕ.

Выполнять аналогично п. 3.2. Результаты занести в табл. 1.

3.4. Исследование логического элемента И.

Выполнять аналогично п. 3.2. Результаты занести в табл. 1.

3.5. Исследование логического элемента НЕ.

Выполнять аналогично п. 3.2. Результаты занести в табл. 1.

3.5. Проверить переключательную функцию элемента НЕ.

Выполнять аналогично п. 3.2. Результаты занести в табл. 1.

3.6. Исследование логического элемента ИЛИ.

Выполнять аналогично п.3.2. Результаты занести в табл. 1.

3.7. Исследование логического элемента Исключающее ИЛИ.

Выполнять аналогично п. 3.2. Результаты занести в табл. 1.

Выключить тумблер “Питание”.

4. Содержание отчета

- а) наименование и цель работы;
- б) привести паспортные данные базового элемента И-НЕ;
- в) привести условные обозначения и структуры исследуемых элементов, выполненных на базовом элементе И-НЕ, схемы для их исследования, таблицы состояний и временные диаграммы входных и выходных напряжений (пример построения диаграмм приведен на рис. 2в);
- г) выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

1. Какие уровни напряжений соответствуют значениям логического “0” и логической “1” для МС 155 серии?
2. Какова структура логического элемента И, выполненного на базовом элементе И-НЕ?
3. Какова структура логического элемента ИЛИ, выполненного на базовом элементе И-НЕ?
4. Какова структура логического элемента ИЛИ-НЕ, выполненного на базовом элементе И-НЕ?

Работа № 9. ТРИГГЕРЫ И СЧЕТЧИКИ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

1. Цель работы

Цель работы – изучение работы триггеров и двоичных счетчиков в интегральном исполнении.

2. Описание лабораторного модуля

Лабораторная работа выполняется на модуле «Логические элементы и триггеры». Передняя панель модуля представлена на рис. 1.

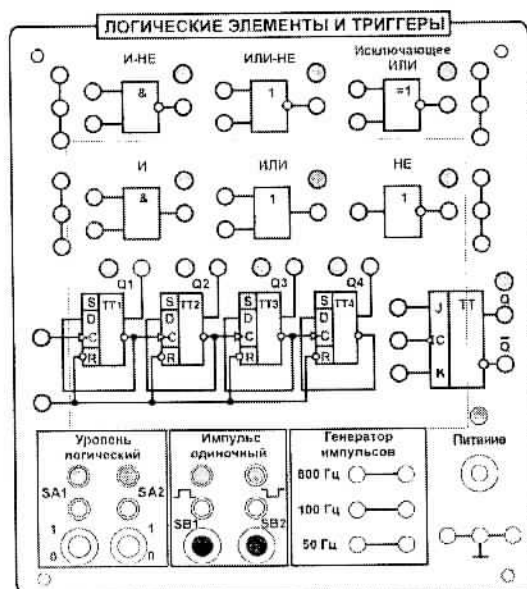


Рис. 1.

Триггер представляет собой цифровое устройство с двумя устойчивыми состояниями, предназначенное для записи и хранения информации. Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит скачком под воздействием входного управляющего сигнала. При этом напряжение на его выходе изменяется скачкообразно. Триггеры широко используются в различных устройствах, где они выполняют функции переключающих, счетных, пороговых и запоминающих элементов. Они составляют 20...40% оборудования ЭВМ. Все серии цифровых интегральных микросхем, как правило, включают различные типы триггеров.

Триггеры содержат запоминающий элемент (собственно триггер) и схему управления. Схема управления преобразует поступающую на ее входы информацию в комбинацию сигналов, действующих на входы собственно триггера, характеризующего состояние устройства в целом.

Триггеры различаются по способу функционирования при действии сигнала управления и по способу управления. По первому способу различают триггеры *RS*, *D*, *T*, *JK* – типов. По способу управления различают асинхронные и тактируемые, или синхронные. В первых, переключение триггера происходит непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход. В тактируемых триггерах кроме информационных входов имеется вход тактовых импульсов. Переключение такого триггера происходит только при наличии разрешающего, тактирующего импульса.

Функциональное назначение информационных входов триггеров:

S – вход раздельной установки в «1»;
 R – вход раздельной установки в «0»;
 T – вход счетного триггера (счетный вход);
 C – вход синхронизации (тактирующий вход);
 J – вход установки триггера в «1»;
 K – вход установки триггера в «0».

Символами Q и $\bar{Q}$ обозначены соответственно прямой и инверсный выходы.

В настоящей работе исследуются работа синхронного (тактируемого) JK – триггера и двоичного счетчика.

2.1. JK – триггер.

JK -триггер является универсальным триггером, который обладает характеристиками всех других триггеров. JK -триггер имеет два информационных входа: « J » – вход установки триггера в единицу и « K » – вход установки триггера в нуль, синхронизирующий вход « C », и, как все триггеры, два выхода Q и $\bar{Q}$ (рис. 1).

У JK -триггера различают режимы хранения, установки 0, установки 1 и переключения. Когда на оба входа « J » и « K » подается уровень логического 0, триггер блокируется, состояния его выходов не изменяются. Триггер в этом случае находится в режиме *хранения*. Если на обоих входах « J » и « K » установлен уровень логической 1, то следующие друг за другом тактовые импульсы будут приводить каждый раз к переходу триггера в противоположное состояние. Такой режим работы триггера называют переключательным режимом. JK -триггеры тактируются только перепадом потенциала на входе синхронизации.

В отличие от RS -триггера в JK -триггере наличие двух единичных управляющих сигналов ($J=K=1$) приводит к переходу триггера в противоположное состояние, т.е. в этом случае JK -триггер работает как T -триггер.

2.2. Цифровые двоичные счетчики.

Цифровым счетчиком импульсов называется устройство, предназначенное для счета числа входных импульсов и запоминания этого числа в каком-либо коде. Счет числа импульсов является типовой операцией в устройствах цифровой обработки информации.

Обычно счетчики строят на основе триггеров, поэтому счет импульсов ведется в двоичной системе счисления.

Счетчики, осуществлявшие суммирование входных импульсов, называют суммирующими. Вычитающие счетчики уменьшают свои показания на единицу с приходом каждого очередного импульса. Счетчики, выполняющие обе операции, называют реверсивными.

Состояние триггеров отражает число поступивших на вход счетчика импульсов в двоичной системе счисления (двоичном коде). Общее число возможных состояний (модуль счета) N счетчика определяется числом триггеров n : $N = 2^n$.

На рис. 2 показана схема простейшего последовательного (асинхронного) счетчика импульсов, полученного путем последовательного соединения трех счетных триггеров, и временная диаграмма его работы.

В исходном состоянии все триггеры (разряды) устанавливаются в состояние “0” путем подачи на их входы установочного импульса (установка нуля). При поступлении первого входного импульса триггер Т1 (первый или низший разряд) подготавливается к переключению и по окончании входного импульса перейдет в состояние “1”. В счетчик записывается число 1 (с кодом 001). По окончании второго входного импульса триггер Т1 переходит в состояние “0”, а триггер Т2 – в состояние “1” (фиксируется число 2 с кодом 010) и т.д. После восьмого входного импульса все триггеры переходят в состояние “0” и счет повторяется.

На выходе каждого последующего триггера частота следования импульсов уменьшается в два раза. Это свойство используется для построения делителей частоты.

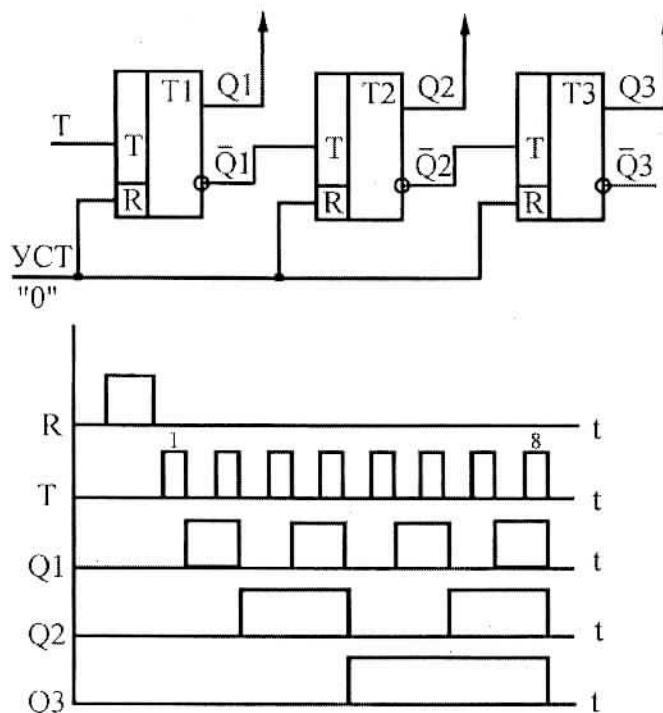


Рис. 2

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомиться с назначением органов управления модуля «Логические элементы и триггеры». Для подготовки модуля к работе установить два тумблера “Уровень логический” в нижнее положение. Подготовить к работе осциллограф.

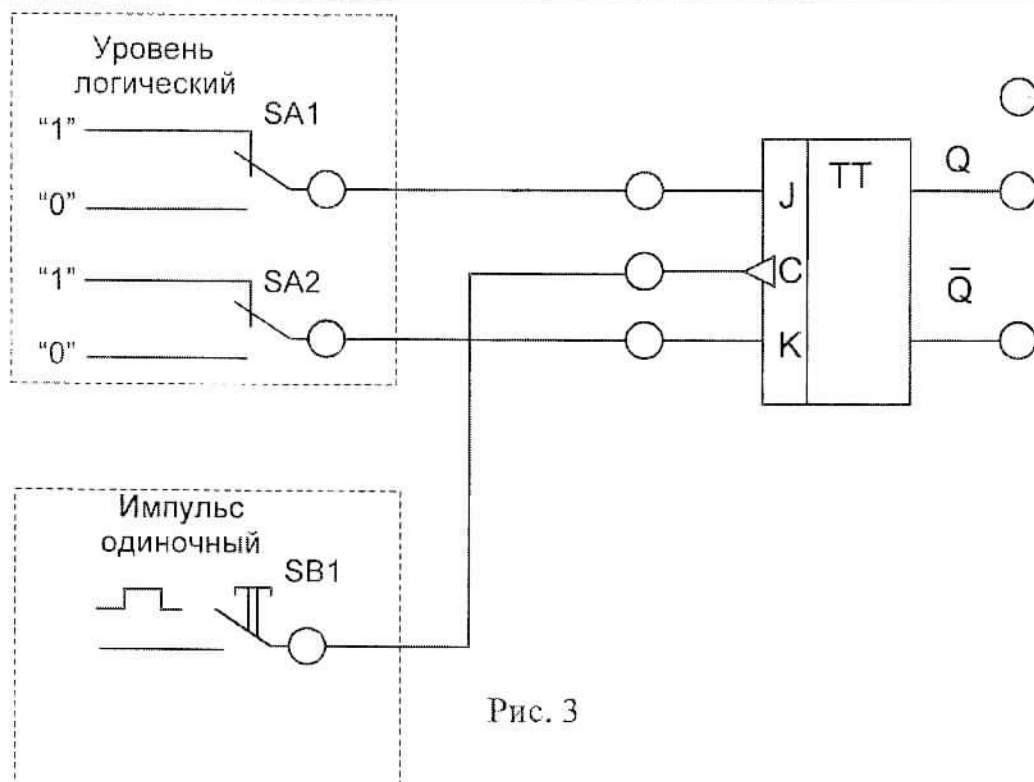
3.2. Исследовать JK – триггер.

Собрать схему (рис. 3). Включить питание стенда (выключатели $QF1$ и $SA2$) и тумблер “Питание” модуля «Логические элементы и триггеры».

Задавая тумблерами $SA1$ и $SA2$ с гнезд “Уровень логический” различные комбинации входных логических сигналов, подаваемых на входы « J » и « K » составить таблицу состояний триггера. Единице на выходе « Q » соответствует свечение светодиода. Для проверки состояния выхода « $\bar{Q}$ » подключить к этому выходу мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

J	K	C	Q	$\bar{Q}$	Режим работы триггера
0	0				
0	1				
1	0				
1	1				



Выключить тумблер “Питание” и питание стенда.

3.4. Исследовать двоичный четырехразрядный счетчик.

Все переключатели установить в нулевое положение.

3.4.1. Собрать схему (рис. 4).

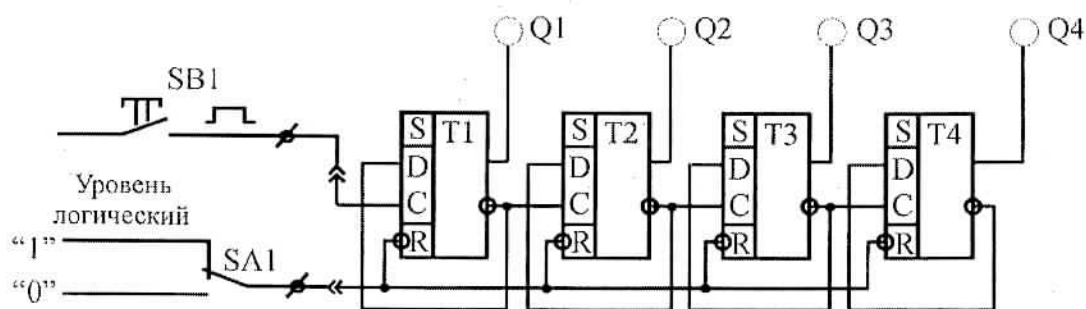


Рис. 4

Включив питание, установить все разряды счетчика в исходное (нулевое) положение. Для этого кратковременно с помощью тумблера SA1 подать сигнал логического “0” на входы R всех триггеров.

Подавая кнопкой SB1 на вход C счетчика положительный одиночный импульс, составить таблицу состояния счетчика (табл. 2). Состояние младшего разряда (выход Q1) и последующих старших разрядов Q2, Q3, Q4 определять по сигналу светодиодов, где свечение соответствующего светодиода определяет

наличие на выходе логической “1”. Обратить внимание, в какой момент изменяется состояния разрядов при подаче тактового импульса на вход С.

Таблица 2

Вход С	Выходы			
№ импульса	$Q4$	$Q3$	$Q2$	$Q1$
Уст. “0”				
1				
2				
.....				
16				

3.4.2. Подать на вход счетчика выходной сигнал встроенного генератора импульсов, соединив для этого вход счетчика с заданным преподавателем выходом генератора. Подключая вход осциллографа поочередно к выходу генератора и выходам триггеров счетчика $Q1$, $Q2$, $Q3$ и $Q4$, зарисовать осциллограммы входного сигнала и соответствующих выходных сигналов. Определить по осциллограммам частоту входного сигнала и выходных сигналов. Выключить электропитание модуля и стенда.

4. Содержание отчета

- а) цель работы;
- б) схемы включения исследуемых устройств;
- в) осциллограммы и таблицы наблюдений;
- г) выводы о работе исследованного триггера и двоичного четырехразрядного счетчика.

5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение триггера?
2. Для каких целей используются триггеры?
3. Какие бывают виды триггеров?
4. Что означает термин “запрещенная комбинация” для RS – триггера?
5. Какой выход триггера называют прямым, а какой инверсным?
6. При каких комбинациях входных сигналов состояние RS – триггера изменяется?
7. Какие возможны режимы работы JK –триггера?
8. В каком случае JK –триггер перейдет в состояние «1» и в каком – в состояние «0»?
9. Когда в JK –триггере имеет место режим хранения информации?
8. Какие основные параметры счетчика?
10. Сколько разрядов должен иметь двоичный счетчик, чтобы обеспечить возможность счета 64 импульсов?
11. Как соотносятся частота выходного и входного сигналов в четырехразрядном счетчике?