

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**И. П. Матвеевко, Т. А. Костикова**

## **ЭЛЕКТРОНИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию  
в качестве учебно-методического пособия для студентов  
учреждений высшего образования по специальности  
1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства  
(по направлениям)»*

Минск  
БГАТУ  
2021

УДК 621.38(07)  
ББК 32.85я7  
М33

Рецензенты:  
кафедра «Электротехника и электроника»  
Белорусского национального технического университета  
(кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой *Ю. В. Бладыко*);  
кандидат технических наук, заведующий сектором  
информатизации ЖКХ отдела жилищного хозяйства  
Института жилищно-коммунального хозяйства  
НАН Беларуси *Е. В. Тернов*

**Матвеевко, И. П.**  
М33 Электроника. Лабораторный практикум : учебно-методическое  
пособие / И. П. Матвеевко, Т. А. Костилова. – Минск : БГАТУ,  
2021. – 168 с.  
ISBN 978-985-25-0134-7.

Рассмотрены практические вопросы и методика изучения принципов работы элементов электронной техники, аналоговых устройств: различных типов усилителей и источников вторичного электропитания, а также элементов и устройств цифровой техники. Лабораторные работы могут выполняться как на измерительных стендах, так и на компьютерах с использованием программы схемотехнического моделирования *MICROCAP* по приведенной методике.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)».

УДК 621.38(07)  
ББК 32.85я7

ISBN 978-985-25-0134-7

© БГАТУ, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ .....	5
Подготовка студентов к выполнению лабораторных работ .....	6
Порядок работы в лаборатории .....	7
Оформление отчетов и порядок отчетности по лабораторным работам .....	7
Лабораторная работа № 1. Исследование полупроводниковых диодов .....	9
Лабораторная работа № 2. Изучение биполярных транзисторов ...	25
Лабораторная работа № 3. Исследование полевого транзистора ...	37
Лабораторная работа № 4. Исследование тиристоров .....	46
Лабораторная работа № 5. Исследование транзисторного усилителя низкой частоты с цепями обратных связей .....	57
Лабораторная работа № 6. Исследование усилителя мощности .....	71
Лабораторная работа № 7. Изучение работы маломощных блоков питания .....	80
Лабораторная работа № 8. Исследование управляемого выпрямителя .....	102
Лабораторная работа № 9. Исследование мультивибраторов .....	112
Лабораторная работа № 10. Исследование триггеров .....	126
Лабораторная работа № 11. Исследование регистров .....	141
Лабораторная работа № 12. Изучение микропроцессора .....	151
Список литературы .....	163
Приложение .....	165

## ВВЕДЕНИЕ

Данный лабораторный практикум составлен в соответствии с программой учебной дисциплины «Электроника».

Согласно учебному плану студенты выполняют цикл лабораторных работ и сдают зачет и экзамен по теоретическому материалу.

Теоретический материал лабораторной части курса электроники изучается студентами на лекциях и самостоятельно с использованием конспекта лекций и рекомендуемых учебной программой учебников и учебных пособий. При изучении материала особое внимание следует обратить на физические процессы и явления, которые возникают в электрических цепях и в элементах электронных схем.

Лабораторный практикум включает в себя описание лабораторных работ и ряд других методических материалов, предназначенных для повышения эффективности лабораторных занятий.

К таким материалам относятся следующие:

- требования техники безопасности;
- рекомендации и требования к подготовке, выполнению и отчету по выполненным работам;
- краткие теоретические сведения по темам выполняемых работ;
- контрольные вопросы и задания;
- литература.

В описании каждой лабораторной работы содержатся краткие теоретические сведения, но они носят в основном справочный характер. Поэтому при подготовке к выполнению лабораторных работ является обязательным изучение литературы, список которой приведен в конце данного практикума. Объем материала, который должен быть усвоен каждым студентом до выполнения каждой из лабораторных работ, определяется приведенными в ней контрольными вопросами и заданиями.

## **Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

Исследование электрических цепей, приборов и устройств в ходе лабораторных занятий по электронике связано с использованием напряжений. Поражение током при этих напряжениях может привести к тяжелым последствиям.

В лаборатории используются напряжения 220 В, 30 В и некоторые другие; представляют опасность ЭДС самоиндукции, возникающие при коммутации цепей с большими индуктивностями, неразрядившиеся конденсаторы.

Кроме того, при неправильном обращении студентов с электрическим оборудованием возможны короткие замыкания цепей, которые могут привести к оплавлению проводников, сопровождаемому поражением органов зрения и ожогами.

Во избежание несчастных случаев по указанным причинам при выполнении лабораторных работ студенты обязаны строго соблюдать следующие правила безопасности:

1. Не приступать к работе, не ознакомившись с правилами настоящей инструкции.

2. Прежде чем собрать схему лабораторной установки на рабочем месте, следует убедиться, что выключен сетевой рубильник и выключатели питающих напряжений на лабораторных стендах.

3. Включение под напряжение собранной схемы должно производиться только после проверки ее преподавателем.

4. Во время работы со схемой нужно быть внимательным и осторожным. Не допускать к рабочему месту посторонних.

5. Студент, включающий питание схемы, должен предупредить о своем действии остальных членов бригады, выполняющих работу на данном рабочем месте.

6. После включения установки не прикасаться к неизолированным и пересеченным элементам схемы, которые находятся или могут находиться под напряжением.

7. Изменения в электрических схемах, предусмотренные программой работы могут проводиться только после отключения питания схемы. Правильность измененной схемы должна быть проверена преподавателем.

8. Не прикасаться к корпусам двух различных приборов одновременно.

9. При появлении каких-либо ненормальностей в работе установки (посторонний шум, запах жженой изоляции, искрение, перегрев проводов, зашкаливание стрелок приборов) или при попадании кого-либо под напряжение, нужно немедленно отключить рубильник питания установки и пригласить преподавателя.

10. После окончания работы не отключать установки без разрешения преподавателя. Получив разрешение, схему и рабочее место, на котором велось исследование, необходимо обесточить, отключив питание.

11. После ознакомления с правилами безопасности, студенты должны расписаться в журнале регистрации по технике безопасности.

12. За порчу и сохранность оборудования в лаборатории студенты несут персональную материальную ответственность.

### **Подготовка студентов к выполнению лабораторных работ**

Цели и экспериментальные задачи лабораторного занятия могут быть успешно выполнены в отведенное учебное время только при условии тщательной предварительной подготовки к ним.

Порядок выполнения лабораторных работ заранее сообщается студентам.

Перед началом каждой лабораторной работы до прихода в лабораторию каждый студент должен уяснить ее цели, физическую сущность изучаемых явлений, принципиальную электрическую схему работы, порядок проведения исследования, ожидаемые результаты. Все перечисленные сведения содержатся в данном практикуме и рекомендуемой учебной литературе.

До прихода в лабораторию каждый студент, в соответствии с рабочим заданием на предстоящее лабораторное занятие, должен вычертить электрические схемы исследуемых цепей, включающие объект исследования, измерительные приборы и другие, используемые в работе, элементы. Следует также заготовить таблицы для записи экспериментальных и расчетных результатов исследований. Завершает этап подготовки составление письменных ответов на контрольные вопросы самопроверки, приведенные в рабочем задании на данную работу.

## Порядок работы в лаборатории

К лабораторным занятиям студенты допускаются только после ознакомления с инструкцией по технике безопасности и росписи в журнале.

Для проведения лабораторных занятий учебная группа делится преподавателем на бригады в составе 2–4 человек. Состав этих бригад сохраняется на весь период занятий группы в данной лаборатории. Каждая из бригад работает за отдельным лабораторным столом. Все члены бригады обязаны активно участвовать в проведении исследований, входящих в учебное задание по данной лабораторной работе. Результаты исследований и расчеты бригада предъявляет преподавателю. Только после его разрешения можно разбирать схему и приступать к оформлению отчета. Каждый студент обязан составлять и представлять отчет преподавателю индивидуально.

Оформить отчет и отчитаться по нему студенты обязаны до конца текущего занятия, либо в начале следующего занятия. В последнем случае преподаватель одновременно с приемом отчета по прошлой работе выясняет подготовленность студентов к работе, запланированной на данное занятие.

Допускаются к выполнению очередной работы студенты, подготовившие бланк выполнения отчета, уяснившие физическую сущность изучаемого явления, порядок выполнения работы, ожидаемые результаты и закономерности, и ответившие на вопросы самопроверки, содержащиеся в задании на данную лабораторную работу.

После окончания занятий студенты обязаны привести свое рабочее место в порядок: разобрать электрические схемы, отключить приборы, сложить проводники в ящики столов, убрать стулья.

### Оформление отчетов и порядок отчетности по лабораторным работам

**1. Требования к оформлению отчета.** Отчет о выполненной студентом лабораторной работе является важным методическим документом и к нему предъявляются следующие требования:

- отчет выполняется в специально отведенной тетради;
- вся графическая часть выполняется в соответствии с требованиями ГОСТов с обязательным использованием чертежных принадлежностей (линейка, лекала, циркуль и т. п.).

**2. Содержание отчета.** Отчет должен содержать название работы, формулировку цели работы, электрические схемы используемых установок, перечень используемых приборов и оборудования, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, графики зависимостей или другие графические построения, расчетные формулы, исходные данные к расчетам и конечные результаты вычислений, выводы по результатам исследований.

Графики зависимостей строятся с соблюдением масштаба. На осях координат пишутся обозначения откладываемых величин и единицы их измерения (пишется вдоль осей с наружной стороны). Все снятые экспериментально точки наносятся на графики, которые строятся по общепринятым методам.

Необходимо иметь в виду, что, чем тщательнее выполняется опыт, тем точнее получается график. Однако даже при очень внимательном и строгом отсчете измеряемых величин некоторые полученные точки могут оказаться за пределами графика из-за возникающих систематических или случайных погрешностей измерений. На тех участках, где ход кривой монотонный, можно ограничиться небольшим числом измерений (5–7 точек). В области экстремумов и точек перегиба следует выполнить больше измерений, чтобы получить больше точек для построения этой части кривой.

**3. Отчетность по лабораторным работам.** Оформление отчета, как отмечалось, желательно производить в лаборатории непосредственно после выполнения работы или в день выполнения работы дома. Отчет должен предъявляться преподавателю для защиты не позже последующего лабораторного занятия.

При наличии ошибок преподаватель возвращает его для исправления. По правильно оформленному отчету студенту предлагается несколько вопросов по теоретическому материалу данной работы. При положительном ответе на эти вопросы отчет считается защищенным с соответствующей оценкой, а лабораторная работа засчитывается.

У студента на руках должно быть не более двух незащищенных отчетов по лабораторным работам, иначе он не допускается к выполнению следующей работы, которую позже необходимо будет отработать во внеучебное время.

Лабораторные работы выполняются по модулям.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

**Цель работы:** изучить систему обозначений, конструкцию и принцип работы выпрямительного полупроводникового диода и стабилитрона; снять основные характеристики и определить по ним параметры диодов.

#### Лабораторное оборудование:

1. Лабораторный стенд «Электроника» НТП «Центр».
2. ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним  $p$ - $n$ -переходом и двумя внешними выводами, которые называются анод и катод. По назначению диоды делятся на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны, туннельные диоды, варикапы, фотодиоды, светодиоды. Их изготавливают на основе германия и кремния.

**Выпрямительные диоды** предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в однополярный пульсирующий ток. Полупроводниковый диод состоит из двух слоев полупроводников с  $p$ - и  $n$ -типами электропроводности. Это прибор с односторонней проводимостью, возникающей на границе раздела двух материалов с проводимостью различного типа, которая называется электронно-дырочным или  $p$ - $n$ -переходом.

Рассмотрим процесс образования и свойства  $p$ - $n$ -перехода. Допустим, что концентрация электронов в  $n$ -области полупроводника равна концентрации дырок в  $p$ -области (рис. 1.1).

Свободные электроны из полупроводника  $n$ -типа за счет градиента концентрации переходят в полупроводник  $p$ -типа, а дырки из полупроводника  $p$ -типа начинают переходить в полупроводник  $n$ -типа.

В  $n$ -области в приграничном слое при этом образуется положительный объемный (неподвижный, не скомпенсированный) заряд, а в  $p$ -области на границе раздела образуется отрицательный объемный (неподвижный, не скомпенсированный) заряд. В результате

вблизи границы двух полупроводников образуется запирающий слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким электрическим сопротивлением, который называют  $p$ - $n$ -переходом (ширина запирающего слоя или  $p$ - $n$ -перехода равна  $d$ ). Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов  $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ .

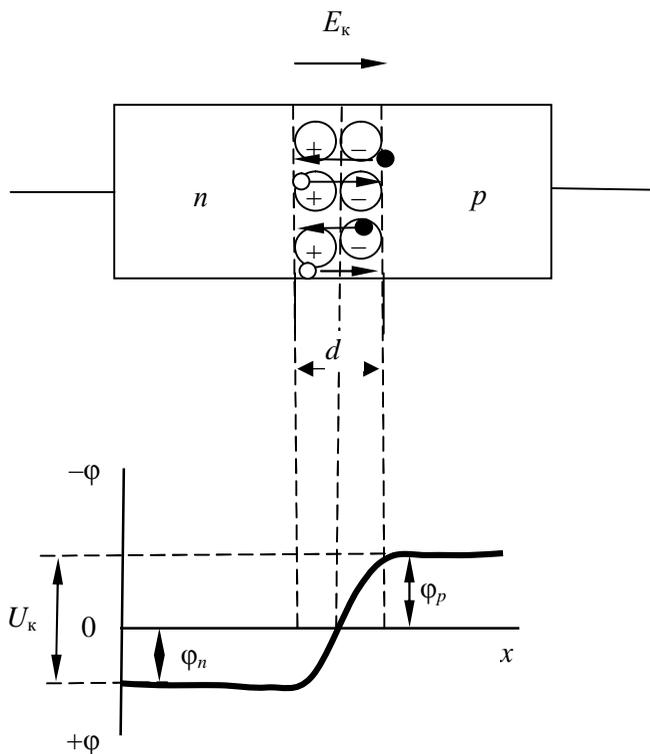


Рис. 1.1. Образование электронно-дырочного перехода ( $p$ - $n$ -перехода)

В граничном слое образуется электрическое поле  $E_k$  (поле контактной разности потенциалов), направленное от объемного положительного заряда в  $n$ -области к объемному отрицательному заряду в  $p$ -области (рис. 1.1), которое препятствует дальнейшему переходу носителей заряда из одной области в другую. Возникает

потенциальный барьер, высота которого определяется величиной контактной разности потенциалов  $U_k = \phi_n - \phi_p$  (рис. 1.1).

Если источник внешнего напряжения подключить положительным полюсом к полупроводнику  $p$ -типа и отрицательным полюсом к полупроводнику  $n$ -типа, то такое напряжение, у которого полярность совпадает с полярностью основных носителей, называется прямым (рис. 1.2).

В этом случае внешнее электрическое поле направлено навстречу полю контактной разности потенциалов. В результате чего высота потенциального барьера понижается ( $U_k - U_{пр}$ ), возрастает диффузионный ток  $I_{диф}$ , который называют прямым током  $I_{пр}$ , сопротивление  $p$ - $n$ -перехода резко снижается, уменьшается также ширина запирающего слоя.

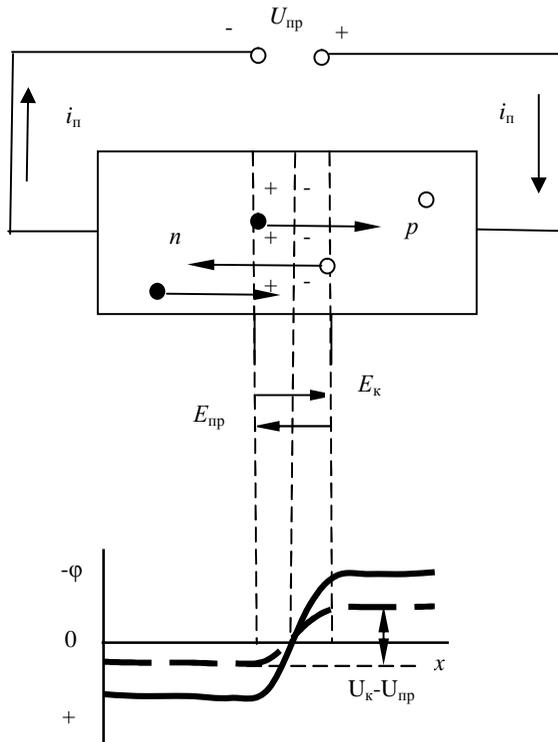


Рис. 1.2. Прямое включение  $p$ - $n$ -перехода (уменьшение высоты и ширины потенциального барьера)

При обратном включении  $p$ - $n$ -перехода источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к  $n$ -области, а отрицательным полюсом к  $p$ -области. Поле, создаваемое обратным напряжением  $U_{обр}$ , складывается с полем контактной разности потенциалов. Высота потенциального барьера увеличивается ( $U_k + U_{обр}$ ) (рис. 1.3), а также расширяется толщина запирающего слоя, так как с увеличением  $U_{обр}$  основные носители заряда будут удаляться от  $p$ - $n$ -перехода. При этом сопротивление  $p$ - $n$ -перехода увеличивается, а ток  $I_{обр}$  через  $p$ - $n$ -переход уменьшается.

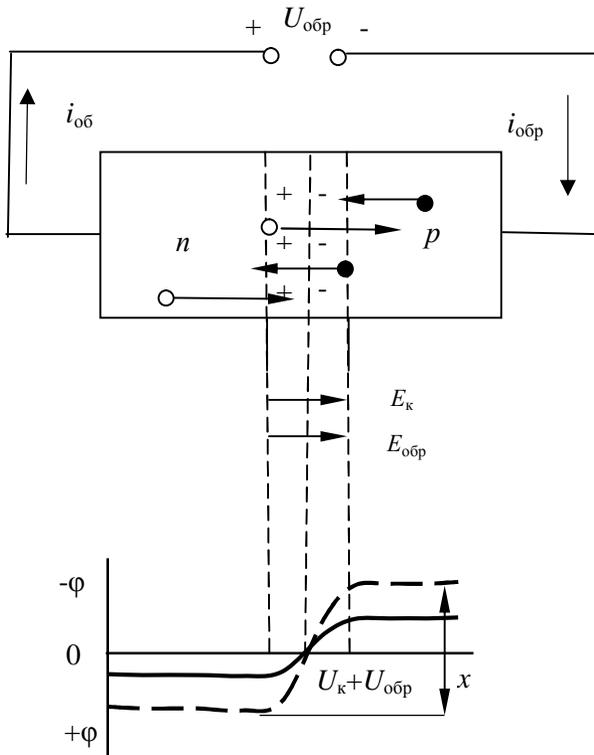


Рис. 1.3. Обратное включение  $p$ - $n$ -перехода (увеличение высоты и ширины потенциального барьера)

Поскольку концентрация неосновных носителей значительно меньше концентрации основных носителей заряда, определяющих

прямой ток  $p$ - $n$ -перехода, обратный ток  $p$ - $n$ -перехода существенно меньше прямого (обычно на несколько порядков). Это и определяет вентиляльные свойства  $p$ - $n$ -перехода, то есть способность проводить ток только в одном направлении.

На вольтамперной характеристике (ВАХ) диода (рис. 1.4) могут быть выделены прямая ветвь ВАХ и обратная ветвь ВАХ.

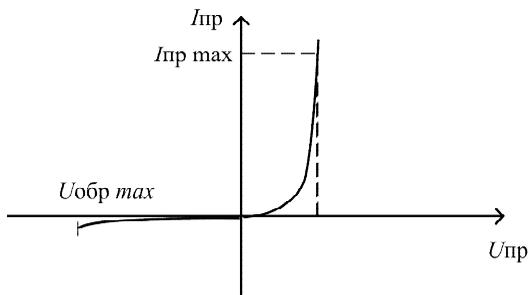


Рис. 1.4. Вольтамперная характеристика выпрямительного диода

На прямой ветви ВАХ имеем большое изменение прямого тока  $I_{пр}$  при малом изменении прямого напряжения  $U_{пр}$ . Прямой ток  $I_{пр}$  ограничивается максимально допустимым значением  $I_{max}$ , гарантирующим равновесие диода, при превышении которого диод может перегреться и разрушиться.

На обратной ветви ВАХ имеем малое изменение обратного тока  $I_{обр}$  при большом изменении обратного напряжения  $U_{обр}$ . Обратное напряжение  $U_{обр}$  ограничивается максимальным значением  $U_{обр max}$ , при превышении которого возникает электрический пробой и выпрямительный диод перестает выполнять свои функции.

При выборе диодов в справочниках приводятся предельные параметры диода  $U_{обр. max}$ ,  $I_{пр. max}$ . К параметрам диодов относят сопротивление прямому току  $R_{пр}$ , сопротивление обратному току  $R_{обр}$ , текущие значения  $I_{пр}$ ,  $U_{пр}$ ,  $I_{обр}$ ,  $U_{обр}$ .

Условное графическое изображение и буквенное обозначение выпрямительного диода и подключение полярности внешнего источника питания при прямом и обратном включении (в скобках) показаны на рис. 1.5.

Выпрямительные диоды применяют в схемах выпрямителей переменного тока и напряжения, для развязок в электрических цепях, ограничения выброса напряжений при коммутации цепей и др.

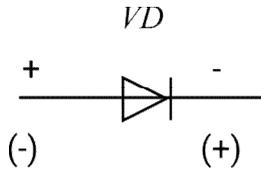


Рис. 1.5. Условное графическое изображение и буквенное обозначение выпрямительного диода и подключение полярности внешнего источника питания при прямом и (в скобках) обратном включении

**Стабилитрон** представляет собой плоскостной диод, изготовленный из кремния с большой концентрацией примеси. Условное графическое изображение стабилитрона на схемах приведено на рис. 1.6.

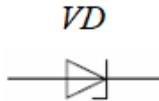


Рис. 1.6. Условное графическое обозначение стабилитрона

Если стабилитрон включить в обратном направлении, то при определенном напряжении начинается контролируемый электрический пробой, характеризующийся возрастанием тока при почти неизменном напряжении на стабилитроне.

Если ограничить ток пробоя с помощью  $R_{огр}$  (рис. 1.7) таким образом, чтобы мощность рассеяния диода не превосходила допустимую, выше которой начинается тепловой пробой и разрушается  $p-n$ -переход, то диод в таком режиме может работать длительное время.

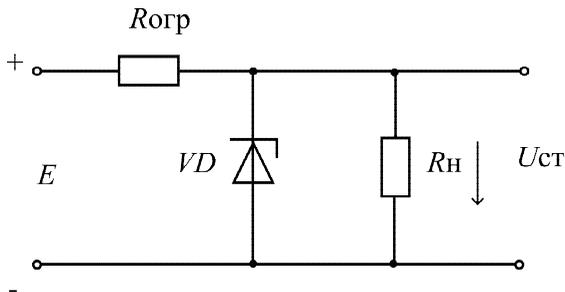


Рис. 1.7. Схема включения стабилитрона

Напряжение  $U_{ст}$  стабилизации стабилитрона определяется напряжением пробоя. Рабочий участок на вольтамперной характеристике (рис. 1.8) ограничен минимально и максимально допустимым током стабилизации  $I_{ст. min}$ ,  $I_{ст. max}$ .

Максимально допустимый ток стабилизации определяется максимально допустимой мощностью рассеяния стабилитрона  $P_{max}$ , а минимальный ток – началом устойчивого пробоя.

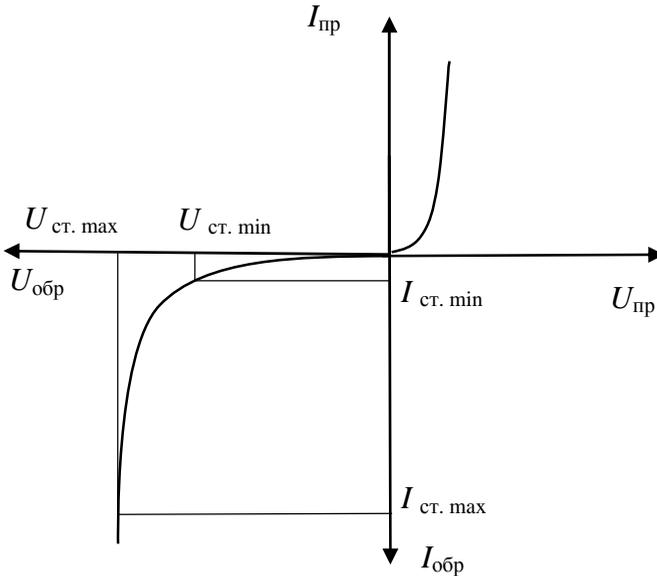


Рис. 1.8. Вольтамперная характеристика стабилитрона

Все изменения напряжения источника  $E$  при его нестабильности почти полностью поглощаются  $R_{огр}$ . Это наиболее частый режим работы стабилитрона ( $E$  – нестабильно, а  $R_n = const$ ). Второй режим стабилизации применяется в случае, когда  $E = const$ , а  $R_n$  меняется в пределах от  $R_{n. min}$  до  $R_{n. max}$ . Эффективность стабилизации напряжения характеризует коэффициент стабилизации:

$$K_{ст} = \frac{\Delta E}{E} / \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}},$$

где  $E$  – напряжение источника питания;

$U_{\text{ст}}$  – напряжение стабилизации;

$\Delta E = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}})$  – отклонение величины напряжения источника от его среднего значения, соответствующего  $U_{\text{ст}}$ ;

$\Delta U_{\text{ст}} = (U_{\text{ст. max}} - U_{\text{ст. min}})$  – изменение напряжения стабилизации, соответствующее изменению  $\Delta E$  напряжения источника.

### **Подготовка к работе**

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и подготовить бланк для выполнения отчета.
2. Изучить конструкцию и условные обозначения выпрямительных диодов и стабилитронов.
3. Изучить принцип действия выпрямительных диодов и стабилитронов.
4. Изучить характеристики и параметры выпрямительных диодов и стабилитронов.
5. Изучить области применения диодов.
6. Научиться выбирать диоды по справочным данным.

### **Методика выполнения работы на лабораторном стенде НТЦ-02.05 «Электроника»**

#### **Порядок подготовки к работе:**

1. Изучить краткие теоретические сведения по лабораторной работе.
2. Убедиться в том, что:
  - на панели стенда отсутствуют перемычки;
  - автоматический выключатель  $QF1$  выключен;
  - регуляторы напряжения питания  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  установлены в положение «0»;
  - ручка потенциометра  $R9$  установлена в среднее положение.
3. Тумблер выбора режима измерения  $SA1$  приборов  $PV1$ ,  $PA1$  установить в положение  $DC$  (вверх).

#### **Исследование ВАХ выпрямительного диода**

1. Собрать схему согласно рис. 1.9 (блок 2 на лицевой панели лабораторного стенда).

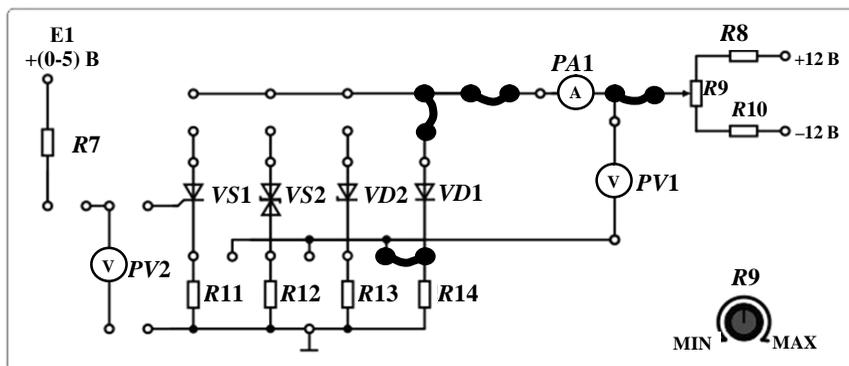


Рис. 1.9. Схема исследования ВАХ диода VD1

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Установить ручку потенциометра  $R9$  в положение, при котором  $U = 0$  В (смотреть по прибору  $PV1$ ).
4. Вращением ручки потенциометра  $R9$  изменять напряжение  $U_{пр}$  от 0 В до положения max, в соответствии со значениями, приведенными в табл. 1.1. Заносить значения прямого тока  $I_{пр}$  (смотреть по прибору  $PA1$ ) в таблицу. Таким образом будет получена прямая ветвь ВАХ выпрямительного диода.
5. Установить ручку потенциометра  $R9$  в положение, при котором  $U = 0$  В (смотреть по прибору  $PV1$ ).

Таблица 1.1

Данные опыта исследования ВАХ диода

Прямая ветвь ВАХ		Обратная ветвь ВАХ	
$U_{пр}$ , В	$I_{пр}$ , мА	$U_{обр}$ , В	$I_{обр}$ , мА
0		0	
0,2		-2	
0,4		-4	
0,6		-6	
0,8		-8	
0,9		-10	

6. Вращением ручки потенциометра  $R9$  изменять напряжение  $U_{обр}$  от 0 В до положения min в соответствии со значениями, приведенными в табл. 1.1. Заносить значения обратного тока  $I_{обр}$  (прибор  $PA1$ ) в таблицу. Таким образом будет получена часть обратной ветви ВАХ выпрямительного диода, так как максимальное обратное напряжение данного диода значительно превышает 12 В.

7. Отключить автоматический выключатель  $QF1$ .

8. Извлечь установленные перемычки.

**По результатам измерений:**

1) построить прямую и обратную ветви ВАХ диода;

2) рассчитать  $R_{пр}$  и  $R_{обр}$  для максимальных значений  $U_{пр}$  и  $U_{обр}$ .

### Исследование ВАХ стабилитрона

1. Собрать схему согласно рис. 1.10 (блок 2 на лицевой панели лабораторного стенда).

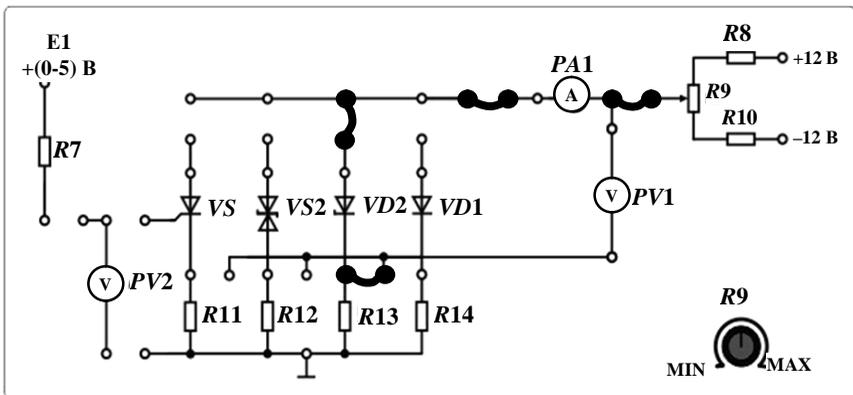


Рис. 1.10. Схема исследования ВАХ стабилитрона  $VD2$

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .

3. Установить ручку потенциометра  $R9$  в среднее положение (прибор  $PV1$ ).

4. Вращением ручки потенциометра  $R9$  изменять напряжение  $U_{обр}$  от 0 В до положения min, в соответствии со значениями, приведенными в табл. 1.2. Заносить значения обратного тока  $I_{обр}$  (прибор  $PA1$ ) в таблицу. Таким образом будет получена обратная ветвь ВАХ стабилитрона.

Данные опыта исследования ВАХ стабилизатора

$U_{обр}, В$	$I_{обр}, мА$
0	
-1,0	
-2,0	
-3,0	
-4,0	
-5,0	
-5,5	
-5,7	
-5,8	
-5,85	
-5,87	

5. Отключить автоматический выключатель  $QF1$ .

6. Извлечь установленные перемычки.

**По результатам измерений:**

1) построить обратную ветвь ВАХ стабилизатора. Выделить на ней рабочий участок;

2) определить  $I_{ст. min}$  и  $I_{ст. max}$ ,  $U_{ст. min}$  и  $U_{ст. max}$ ,  $\Delta U_{ст} = U_{ст. max} - U_{ст. min}$ .

**Методика выполнения работы на компьютере**

1. Запустить программу *MICROCAP*.

2. Открыть файл «ЛАБ\_1\_1»: на экране появится схема для исследования трех различных типов полупроводниковых диодов (рис. 1.11), где  $V1$  – источник напряжения,  $D1$  – диод КД204В (аналог, соответствующий зарубежной маркировке);  $D2$  – диод КД105В (аналог 1N445, соответствующий зарубежной маркировке);  $D3$  – диод КД102А (аналог 0507, соответствующий зарубежной маркировке),  $R1$  – сопротивление нагрузки, равное 1 Ом для диода  $D1$  и 2,3 Ом для диодов  $D2$  и  $D3$ . Параметры указанных типов диодов представлены в табл. 1.3.

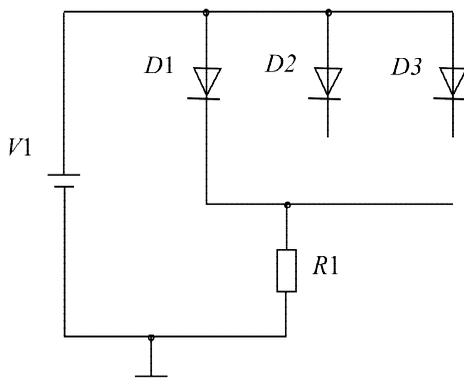


Рис. 1.11. Схема для исследования полупроводниковых диодов

Таблица 1.3

Основные параметры диодов

Тип прибора		$U_{пр}$ , В	$I_{пр}$ , мА	$U_{обр}$ , В	$I_{обр}$ , мкА	$t$ , °С
D1	КД204В (0102)	1,4	600	50	500	+85
D2	КД105В (1N445)	1,5	300	600	2	+150
D3	КД102А (0507)	1	100	250	0,1	+100

3. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики для диода D1  $I_{пр} = f(U_{пр})$ , изменяя  $U_{пр}$  (V1) от нуля до максимального рабочего напряжения, указанного в табл. 1.3 для данного типа диода (снять 8–10 точек).

4. Установить прямое напряжение источника напряжения V1 (значение напряжения на V1 устанавливается двойным щелчком по элементу – см. приложение).

5. Измерить значения прямого тока  $I_{пр}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение). На временной диаграмме ток  $I_{пр}$  показан зеленым цветом, напряжение  $U_{пр}$  – синим цветом. Результаты занести в табл. 1.4.

6. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики диода  $D1$   $I_{обр} = f(U_{обр})$ , изменяя  $U_{обр}$  от нуля до максимального значения обратного напряжения, указанного в табл. 1.3 для данного типа диода (снять 5–6 точек) в соответствии с методикой п. 3.

7. Руководствуясь методикой п. 3 и 4, снять прямую и обратную ветви вольтамперных характеристик для диодов  $D2$  и  $D3$ . Для подсоединения диода  $D2$  необходимо перенести перемычку, соединяющую диод  $D1$  и резистор  $R1$ , к диоду  $D2$ . При этом сопротивление  $R1$  изменить на 2,3 Ом. Для подсоединения диода  $D3$  необходимо перенести перемычку, соединяющую диод  $D2$  и резистор  $R1$  к диоду  $D3$ . При этом сопротивление  $R1$  остается неизменным (2,3 Ом). Полученные в результате измерений данные занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты измерений для построения вольтамперных характеристик диодов

Тип диода	$I_{пр}$ , мА	$U_{пр}$ , В	$I_{обр}$ , мА	$U_{обр}$ , В
КД204В (0102)				
КД105В (1N445)				
КД102А (0507)				

**По результатам измерений:**

1) построить на одном графике экспериментально снятые вольтамперные характеристики всех диодов. Масштаб для прямой и обратной ветвей характеристик может быть различным;

2) определить по характеристикам прямое сопротивление постоянному току  $R_{пр} = U_{пр} / I_{пр}$ , обратное сопротивление постоянному току  $R_{обр} = U_{обр} / I_{обр}$ .

## Методика выполнения работы на компьютере (исследование стабилитрона)

1. Запустить программу *MICROCAP*.
2. Открыть файл «ЛАБ\_1\_2»: на экране появится схема для исследования двух различных типов полупроводниковых стабилитронов (рис. 1.12), где *V1* – источник напряжения; *D1* – диод *D2C133A* (аналог Д814В); *D2* – диод *D2C515A* (аналог Д815Е); *R1* – сопротивление нагрузки, равное 1 Ом. Основные параметры стабилитронов представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Основные параметры стабилитронов

Тип прибора		$U_{ст},$ В	$I_{ст. min},$ мА	$I_{ст. max},$ мА	$R,$ Ом	Диапазон рабочих температур, $T^{\circ}C$	Гарантийная наработка, ч
<i>D1</i>	Д814Е	8...9,5	3	36	10	-55...+100	8000
<i>D2</i>	Д815Е	15	25	550	3,8	-60...+100	5000

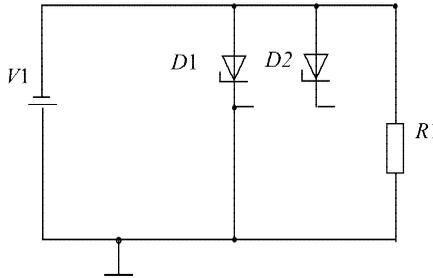


Рис. 1.12. Схема для исследования стабилитронов

3. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики  $I_{обр} = f(U_{обр})$  диода *D1*, изменяя  $U_{обр}$  от нуля до максимального значения обратного напряжения ( $-8$  В), снять 5–6 точек. Результаты занести в табл. 1.6.
4. Установить обратное напряжение источника напряжения *V1* (значение напряжения на *V1* устанавливается двойным щелчком по элементу – см. приложение).
5. Измерить значения обратного тока  $I_{обр}$  и обратного напряжения  $U_{обр}$ , воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ),

**Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где ток  $I_{обр}$  для диода  $D1$  показан черным цветом, а напряжение  $U_{обр}$  для диода  $D1$  – зеленым цветом. Результаты занести в табл. 1.6.

6. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики диода  $D2$   $I_{обр} = f(U_{обр})$ , изменяя  $U_{обр}$  от нуля до максимального значения обратного напряжения ( $-18$  В), снять 5–6 точек в соответствии с методикой п. 3–5. При этом подключить диод  $D2$  к нагрузке  $R1$ , для этого перенести перемычку. Результаты занести в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Результаты измерений для построения обратной ветви вольтамперной характеристики

D1		D2	
$U_{обр}$ , В	$I_{обр}$ , мА	$U_{обр}$ , В	$I_{обр}$ , мА

**По результатам измерений:**

1) построить на одном графике в одной системе координат обратные ветви вольтамперных характеристик стабилитронов  $D1$  (Д814В) и  $D2$  (Д815Е);

2) определить основные параметры стабилитронов:  $U_{ст. min}$ ,  $U_{ст. max}$ ,  $I_{ст. min}$ ,  $I_{ст. max}$ ,  $R_{обр}$ .

**Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип действия полупроводникового диода.
2. Объясните процессы, происходящие в области  $p$ - $n$ -перехода при отсутствии внешнего источника питания.
3. Объясните процессы, происходящие в области  $p$ - $n$ -перехода при включении внешнего источника в прямом и обратном направлениях.
4. Какими основными параметрами характеризуются полупроводниковые диоды?
5. Как влияет температура окружающей среды на характеристики и параметры диода?
6. Приведите примеры практического использования диодов.
7. Проанализируйте ВАХ диода.
8. Приведите маркировку выпрямительных диодов и стабилитронов.
9. Приведите классификацию диодов.
10. В чем состоит принцип работы полупроводникового стабилитрона?
11. Расскажите о конструктивном оформлении и условном обозначении полупроводниковых стабилитронов.
12. Начертите вольтамперную характеристику полупроводникового стабилитрона и объясните ее.
13. Перечислите основные параметры полупроводникового стабилитрона и объясните, как они определяются по характеристикам?
14. Каковы режимы работы стабилизатора напряжения?
15. Как можно увеличить коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения?
16. Для каких целей можно использовать стабилитроны в электрических схемах?

## Лабораторная работа № 2

### ИЗУЧЕНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель работы:** изучить конструкцию и основные параметры некоторых типов транзисторов, научиться снимать характеристики транзистора и определять его параметры.

#### Лабораторное оборудование:

1. Лабораторный стенд «Электроника» НТП «Центр».
2. ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих между собой  $p$ - $n$ -перехода и три (или более) вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока. Транзисторы предназначены для усиления или переключения электрических сигналов.

Конструктивно транзистор представляет собой пластинку германия или другого полупроводника, в котором созданы три области с различной электропроводностью. Концентрация примесей в базе обычно значительно меньше, чем в эмиттере и коллекторе. В состоянии равновесия на границах  $p$ - и  $n$ -областей возникают потенциальные барьеры (пунктир на рис. 2.1).

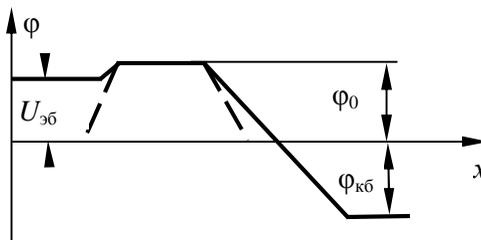


Рис. 2.1. Потенциальные барьеры на границах  $p$ - и  $n$ -областей

При включении эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного – в обратном (сплошная линия, рис. 2.1.), число

дырок, которые могут преодолеть барьер эмиттерного перехода, увеличивается, концентрация их в базе возрастает.

По мере приближения к коллекторному переходу, дырки вытягиваются полем перехода в коллекторную область. Часть их рекомбинирует в базе (1–10 %). Токи в транзисторе связаны соотношением  $I_3 = I_k + I_6$ . Связь между токами и приложенными напряжениями выражается входными и выходными характеристиками. Вид их зависит от схемы включения транзистора. Наибольшее распространение получили малосигнальные  $h$ -параметры.

В общем случае в систему  $h$ -параметров входят следующие величины:

1)  $h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1$  (при  $U_2 = \text{const}$ ) – входное сопротивление транзистора при отсутствии переменного напряжения. При таком условии изменение входного тока  $\Delta I_1$  является результатом изменения входного напряжения  $\Delta U_1$ ;

2)  $h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2$  (при  $I_1 = \text{const}$ ) – коэффициент обратной связи по напряжению, показывает, какая доля выходного напряжения передается на вход транзистора вследствие наличия в нем внутренней обратной связи;

3)  $h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1$  (при  $U_2 = \text{const}$ ) – коэффициент передачи (усиления) по току, показывает, что изменение выходного тока  $\Delta I_2$  зависит только от изменения входного тока  $\Delta I_1$ ;

4)  $h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2$  (при  $I_1 = \text{const}$ ) – выходная проводимость для переменного тока на выходе транзистора.

При этом  $U_1, I_1$  – входные параметры, а  $U_2, I_2$  – выходные параметры.

Для схемы с общим эмиттером (ОЭ) они могут быть определены по характеристикам транзистора: входные характеристики (рис. 2.2, а) и выходные входные характеристики (рис. 2.2, а).

Для схемы ОЭ по выходным характеристикам находят коэффициент передачи тока  $h_{21} = \Delta I_k / \Delta I_6$  при  $U_{кэ} = \text{const}$  и выходную полную проводимость транзистора  $h_{22} = \Delta I_k / \Delta U_{кэ}$  при  $I_6 = \text{const}$ .

По входным характеристикам (рис. 2.2, а) находят коэффициент обратной связи по напряжению  $h_{12} = \Delta U_{3б} / \Delta U_{3к}$  при  $I_6 = \text{const}$  и входное сопротивление транзистора  $h_{11} = \Delta U_{3б} / \Delta I_6$  при  $U_{кэ} = \text{const}$ .

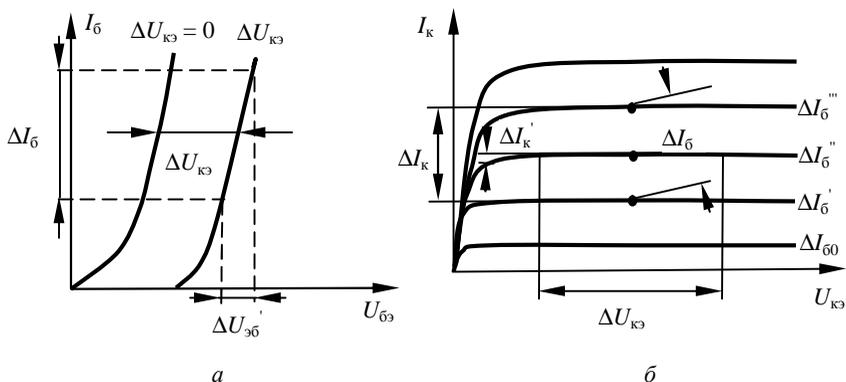


Рис. 2.2. Определение  $h$ -параметров:

$a$  – семейство входных характеристик;  $б$  – семейство выходных характеристик

В режиме усиления в выходную цепь включают нагрузку  $R_H$ . Ток коллектора  $I_к$  теперь будет зависеть не только от свойств транзистора, но и от величины сопротивления  $R_H$  (рис. 2.3,  $a$ ).

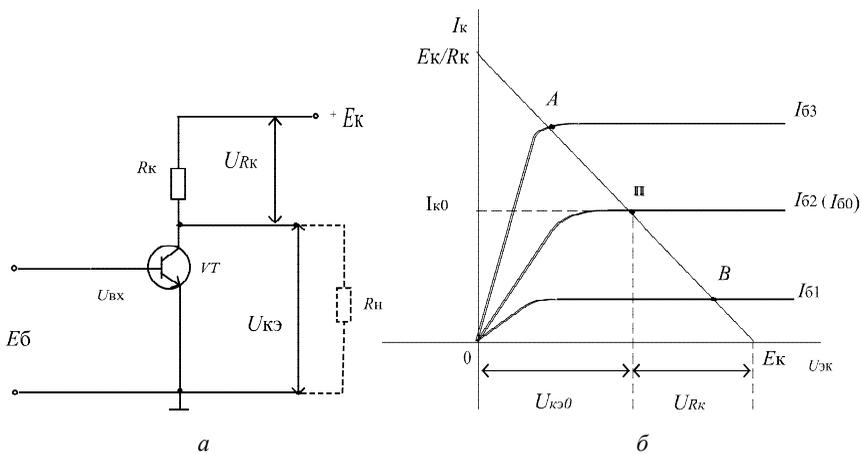


Рис. 2.3. Схема подключения нагрузки в выходную цепь ( $a$ ) и определение токов и напряжений покоя на семействе выходных характеристик ( $б$ )

Построение линии нагрузки производится по уравнению нагрузочной прямой для выходной цепи, где  $E_к = U_кэ + I_кR_к$  по двум

точкам: 1) при  $U_k = 0$ , ток коллектора  $I_k = E_k / R_k$ ; 2) при  $I_k = 0$ ,  $U_{кэ} = E_k$  и через эти точки проводится прямая (линия нагрузки).

На линии нагрузки рабочий участок  $AB$  (рис. 2.3, б) обеспечивает получение наибольшей неискаженной полезной мощности. Положение рабочей точки при равенстве отрезков  $AP = PB$  обеспечивает малые нелинейные искажения.

Рабочая точка (точка покоя)  $\Pi$  на нагрузочной прямой определяет значение постоянного тока (ток покоя) базы  $I_{б0}$  и коллектора  $I_{к0}$ , постоянного напряжения (напряжения покоя) коллектор-эмиттер  $U_{кэ0}$ . Перенесенная на входную характеристику величина  $I_{б0}$  определяет на ней положение точки покоя  $\Pi$  и значение постоянного напряжения (напряжения покоя) эмиттер-база  $U_{эб0}$ .

### Подготовка к работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить конструкции, условные обозначения и основные параметры транзисторов, размещенных на стенде.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### Методика выполнения работы на лабораторном стенде НТЦ-02.05 «Электроника»

#### Порядок подготовки к работе:

1. Изучить краткие теоретические сведения по лабораторной работе.
2. Убедиться в том, что:
  - на панели стенда отсутствуют перемычки;
  - автоматический выключатель  $QF1$  выключен;
  - регуляторы напряжения питания  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  установлены в положение «0»;
  - ручка потенциометра  $R9$  установлена в среднее положение.
3. Тумблер выбора режима измерения  $SA1$  приборов  $PV1$ ,  $PA1$  установить в положение  $DC$  (вверх).

#### Исследование входных характеристик биполярного транзистора

1. Собрать схему согласно рис. 2.4 (блок 1 на лицевой панели лабораторного стенда).

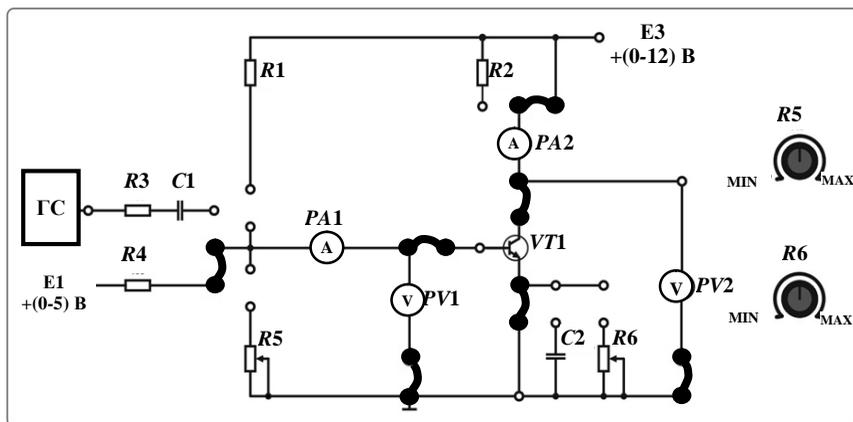


Рис. 2.4. Схема исследования характеристик биполярного транзистора

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Вращая ручку регулятора  $E3$ , установить значение  $U_{кэ} = 0$  В (смотреть по прибору  $PV2$ ).
4. Ручкой регулятора  $E1$  изменять ток базы  $I_б$  (смотреть по прибору  $PA1$ ) от 0 до максимального значения, в соответствии со значениями, приведенными в табл. 2.1. Заносить в таблицу значения напряжения  $U_{бэ}$  (по прибору  $PV1$ ). При исследовании входной характеристики необходимо поддерживать напряжение  $U_{кэ}$  на постоянном уровне, заданном в п. 3.
5. Ручки регуляторов напряжения питания  $E1$  и  $E3$  установить в положение «0».
6. Повторить п. 4–5 при  $U_{кэ} = 2$  В (установить регулятором  $E3$ , смотреть по прибору  $PV2$ ). Данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений входных характеристик биполярного транзистора

$U_{кэ}$ , В	$I_б$ , мА	$U_{бэ}$ , В
0	0	
	0,5	
	1,0	
	1,5	
	2,0	
	3,0	

$U_{кз}, В$	$I_б, мА$	$U_{бз}, В$
2	0	
	0,5	
	1,0	
	1,5	
	2,0	
	2,5	
	3,0	

**По результатам измерений:**

1) построить семейство входных характеристик биполярного транзистора  $I_б = f(U_{бз})$  при разных значениях  $U_{кз}$ ;

2) в соответствии с методикой, приведенной в теоретической части, определить параметры  $h_{11}$  и  $h_{12}$ . Полученные значения занести в табл. 2.3.

**Исследование выходных характеристик биполярного транзистора**

1. Схема подключения для данного опыта остается прежней.  
2. Вращая ручку регулятора  $E1$ , установить ток базы  $I_б = 1 мА$  (смотреть по прибору  $PA1$ ).

3. Вращая ручку регулятора  $E3$ , установить напряжение  $U_{кз} = 0 В$  (смотреть по прибору  $PV2$ ).

4. Ручкой регулятора  $E3$  изменять напряжение  $U_{кз}$  (по прибору  $PV2$ ) в соответствии со значениями, приведенными в табл. 2.2. Заносить в таблицу значения тока  $I_к$  (смотреть по прибору  $PA2$ ). При исследовании выходной характеристики необходимо поддерживать ток базы  $I_б$  на постоянном уровне, заданном в п. 2. Не допускать, чтобы ток коллектора  $I_к$  превышал значение 80 мА.

5. Ручки регуляторов напряжения питания  $E1$  и  $E3$  установить в положение «0».

6. Повторить п. 2–5 при токе базы  $I_б = 2 мА$  и  $I_б = 3 мА$  (установить регулятором  $E1$ , смотреть по прибору  $PA1$ ). Данные заносить в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерений выходных характеристик биполярного транзистора

$I_B$ , мА	$U_{кэ}$ , В	$I_{кэ}$ , мА
1	0	0
	0,05	
	0,1	
	0,2	
	0,3	
	0,4	
	0,5	
	1	
	2	
	3	
2	0	0
	0,05	
	0,1	
	0,2	
	0,3	
	0,4	
	0,5	
	1	
	2	
	3	
3	0	0
	0,05	
	0,1	
	0,2	
	0,3	
	0,4	
	0,5	
	1	

### По результатам измерений:

1) построить семейство выходных характеристик биполярного транзистора  $I_k = f(U_{кэ})$  при разных значениях  $I_b$ ;

2) в соответствии с методикой, приведенной в теоретической части, определить параметры  $h_{21}$  и  $h_{22}$ . Полученные значения занести в табл. 2.3;

3) построить линию нагрузки для  $R_k = 40$  Ом и  $E_k = 4$  В;

4) определить на линии нагрузки рабочий участок и выбрать положение рабочей точки для получения наименьших нелинейных искажений;

5) определить значения постоянных токов (токов покоя)  $I_{к0}$  и  $I_{б0}$  и постоянных напряжений (напряжений покоя)  $U_{кэ0}$ ,  $U_{бэ0}$ . Полученные значения занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параметры биполярного транзистора

$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$	$I_{к0}$	$I_{б0}$	$U_{кэ0}$	$U_{бэ0}$

### Методика выполнения работы на компьютере

1. Запустить программу *MICROCAP*.

2. Открыть файл «ЛАБ\_2\_1», на экране появится схема включения биполярного транзистора (рис. 2.5), где  $V1$  – источник напряжения база-эмиттер,  $V2$  – источник напряжения база-коллектор,  $VT$  – биполярный транзистор КТ313А  $p-n-p$ -типа (аналог 2N2906 – тип транзистора, соответствующий зарубежной маркировке),  $R1$  – сопротивление нагрузки, стоящее в цепи коллектора, равное 1 Ом;  $R2$  – сопротивление в цепи базы, с помощью которого подается определенное значение тока базы на вход транзистора, равное 44 кОм.

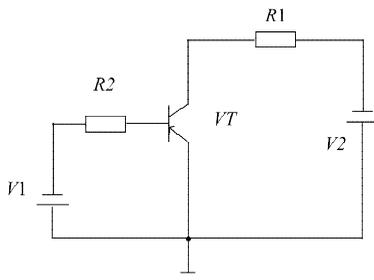


Рис. 2.5. Схема включения биполярного транзистора

3. Снять семейство входных характеристик биполярного транзистора  $I_6 = f(U_{63})$  при  $U_{к3} = \text{const}$ .

4. Установить напряжение  $U_{к3} = 0$  (значение  $V2 = 0$ , двойной щелчок по элементу – см. приложение).

5. Изменять ток базы  $I_6$  от 0 до 100 мкА через каждые 10 мкА (изменение  $I_6$  производить, изменяя значение сопротивления  $R2$  в соответствии с табл. 2.4). Определить значения напряжения  $U_{63}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение). На временных диаграммах ток  $I_6$  показан зеленым цветом, напряжение  $U_{к3}$  – синим цветом, напряжение источника  $V2$  – красным цветом, напряжение  $U_{63}$  – фиолетовым. Результаты занести в табл. 2.4.

6. Повторить измерения для напряжения  $U_{к3} = -5$  В и  $U_{к3} = -10$  В в соответствии с табл. 2.4.

7. Руководствуясь методикой п. 3, снять семейство входных характеристик транзистора при  $R1 = 1$  кОм для  $V2$  или  $E_к = -5$  В и  $E_к = -10$  В.

Таблица 2.4

Результаты измерений для исследования семейства входных характеристик биполярного транзистора

$U_{к3} = 0$ В			$U_{к3} = -5$ В			$U_{к3} = -10$ В		
$U_{63}$ , В	$I_6$ , мкА	$R2$ , кОм	$U_{63}$ , В	$I_6$ , мкА	$R2$ , кОм	$U_{63}$ , В	$I_6$ , мкА	$R2$ , кОм
	10	44		10	38		10	38
	20	21		20	18		20	18
	30	13,5		30	12		30	12
	40	10		40	8,5		40	8,5
	50	7,9		50	6,7		50	6,7
	60	6,5		60	5,5		60	5,5
	70	5,5		70	4,6		70	4,6
	80	4,8		80	4		80	4
	90	4,2		90	3,5		90	3,5
	100	3,7		100	3,1		100	3,1

Результаты занести в табл. 2.5, при этом необходимо подкорректировать значения  $R2$  для получения заданных значений тока базы  $I_6$  (ток  $I_6$  изменяется от 0 до 100 мкА через каждые 10 мкА).

Таблица 2.5

Результаты измерений для исследования семейства входных характеристик биполярного транзистора при  $R1 = 1$  кОм

$U_{кэ} = -5$ В			$U_{кэ} = -10$ В		
$U_{6э}$ , В	$I_6$ , мкА	$R2$ , кОм	$U_{6э}$ , В	$I_6$ , мкА	$R2$ , кОм

8. Снять семейство статических выходных характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ,  $I_k = f(U_{кэ})$ , при  $I_6 = \text{const}$ :

- открыть файл «ЛАБ\_2\_2»;
- установить ток базы  $I_6 = 10$  мкА;
- изменять напряжение  $U_{кэ}$  ( $V2$ ) от 0 В до 1 В через 0,25 В и через 1 В от 1 В до 10 В. Определить ток коллектора  $I_k$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение). На временных диаграммах ток  $I_6$  показан зеленым цветом, напряжение  $U_{кэ}$  – синим цветом, напряжение источника  $V2$  – красным цветом, ток коллектора  $I_k$  – черным. При этом ток базы необходимо поддерживать постоянным, при необходимости корректируя  $R2$ . Результаты занести в табл. 2.6;
- установить ток базы  $I_6 = 40$  мкА и повторить измерения. Результаты занести в табл. 2.6;
- установить ток базы  $I_6 = 80$  мкА и повторить измерения. Результаты занести в табл. 2.6.

При проведении анализа схемы для определения тока коллектора  $I_k$  из-за большого диапазона его изменения необходимо в таблице «Установка анализа переходных процессов» в графах «Масштаб по оси  $X$ » и «Масштаб по оси  $Y$ » установить «Авто» через правую клавишу.

Таблица 2.6

Результаты измерений для исследования семейства выходных характеристик биполярного транзистора

$I_{\bar{6}} = 10 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 40 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 80 \text{ мкА}$	
$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	$I_{\text{к}}, \text{мА}$	$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	$I_{\text{к}}, \text{мА}$	$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	$I_{\text{к}}, \text{мА}$
0		0		0	
0,25		0,25		0,25	
0,5		0,5		0,5	
0,75		0,75		0,75	
1		1		1	
2		2		2	
3		3		3	
4		4		4	
5		5		5	
6		6		6	
7		7		7	
8		8		8	
9		9		9	
10		10		10	

**По результатам измерений:**

1) построить семейство характеристик транзистора и уметь их объяснить. Убедиться, что входная характеристика при  $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$  мало отличается от статических характеристик при напряжениях  $U_{\text{кэ}} > 0,5 \dots 1,0 \text{ В}$ ;

2) по статическим характеристикам определить  $h$ -параметры транзистора для схемы включения транзистора ОЭ. Найденные значения занести в табл. 2.7;

Таблица 2.7

Определение параметров биполярного транзистора

$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{22}$	$h_{21}$	$I_{\text{к}0}, \text{мА}$	$I_{\bar{6}0}, \text{мкА}$	$U_{\text{кэ}0}, \text{В}$	$U_{\text{эб}0}, \text{В}$

- 3) построить линию нагрузки для  $R_k = 1 \text{ кОм}$  и  $E_k = -10 \text{ В}$ ;
- 4) определить на линии нагрузки рабочий участок и выбрать положение рабочей точки для получения наименьших нелинейных искажений;
- 5) определить значения постоянных токов (токов покоя)  $I_{k0}$ ,  $I_{b0}$  и постоянных напряжений (напряжений покоя)  $U_{кз0}$ ,  $U_{бэ0}$ , занести их в табл. 2.7.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип работы транзистора типа  $p-n-p$  ( $n-p-n$ ).
2. Каковы основные параметры транзистора?
3. Какой физический смысл имеют  $h$ -параметры?
4. Какое численное значение имеют  $h$ -параметры для схемы ОЭ?
5. Как построить линию нагрузки транзисторного усилителя ОЭ, имеющего нагрузку  $R_n$ ?
6. Каковы схемы включения транзистора и их особенности?
7. Какова маркировка транзисторов?
8. Перечислите основные достоинства транзисторов в сравнении с электронными лампами.
9. Каковы основные характеристики транзисторов?
10. Перечислите режимы работы транзистора и укажите их особенности.

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

**Цель работы:** изучить конструкцию, основные параметры и принцип действия некоторых типов полевых транзисторов; исследовать экспериментально статические характеристики полевого транзистора.

#### **Лабораторное оборудование:**

1. Лабораторный стенд «Электроника» НТП «Центр».
2. ПЭВМ.

#### **Краткие теоретические сведения**

Полевым транзистором (ПТ) называют электропреобразовательный прибор, в котором ток канала управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком, и который предназначен для усиления электрических колебаний. Полевые транзисторы называют еще униполярными, так как принцип действия их основан на использовании носителей заряда только одного знака.

Полевые транзисторы подразделяются на *n*-канальные и *p*-канальные; каждый тип транзистора в свою очередь бывает с управляющим *p-n*-переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы, или МОП-транзисторы). МДП-транзисторы делятся на транзисторы со встроенным каналом и с индуцированным каналом.

Отличительной особенностью полевых транзисторов является их высокое входное сопротивление ( $10^8$ – $10^{14}$  Ом). Входная цепь транзистора не потребляет мощности, а транзистор управляется приложенным к нему напряжением.

Конструктивно полевой транзистор (на примере *p*-канального транзистора) с управляющим *p-n*-переходом представляет собой пластинку полупроводника *p*-типа с двумя *p-n*-переходами и тремя выводами. Электрод, от которого начинают движение носители заряда, называется истоком (И), а электрод, к которому они движутся – стоком (С). Оба *p*-слоя электрически связаны между собой

и имеют общий электрод, называемый затвором (3). Между  $p$ - $n$ -переходами располагается канал (рис. 3.1).

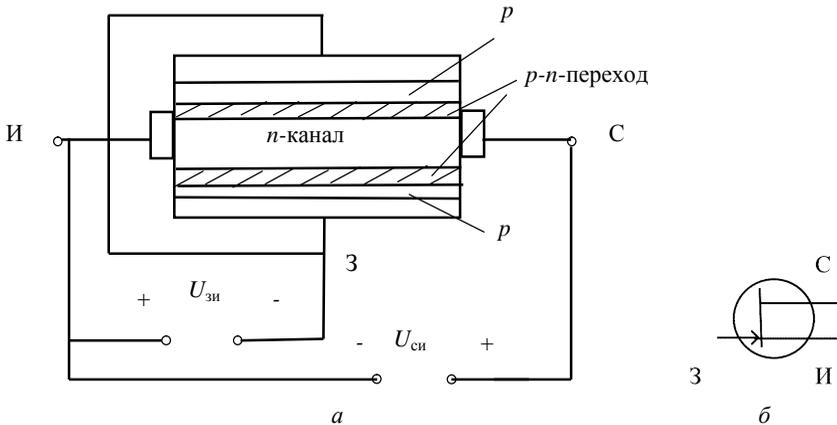


Рис. 3.1. Конструкция транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом ( $n$ -канальный) (а) и условное графическое изображение (б)

Принцип работы полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом сводится к тому, что при изменении  $U_{зи}$  изменяется ширина  $p$ - $n$ -переходов, которые представляют собой участки полупроводника, объединенные носителями заряда. Так как  $p$ -слой имеет большую концентрацию примесей, чем  $n$ -слой, то изменение ширины переходов происходит в основном за счет более высокоомного  $n$ -слоя (эффект модуляции ширины базы). Тем самым изменяется сечение токопроводящего канала и его проводимость, то есть выходной ток  $I_c$ .

Особенностью полевого транзистора является то, что на проводимость канала оказывает влияние как управляющее напряжение  $U_{зи}$ , так и напряжение  $U_{си}$ .

*Характеристики полевых транзисторов с  $p$ - $n$ -переходом:*

1) стоко-затворные (или передаточные) (рис. 3.2, б):

$$I_c = f(U_{зи}) / U_{си} = \text{const};$$

2) стоковые (или выходные) (рис. 3.2, а):

$$I_c = f(U_{си}) / U_{зи} = \text{const}.$$

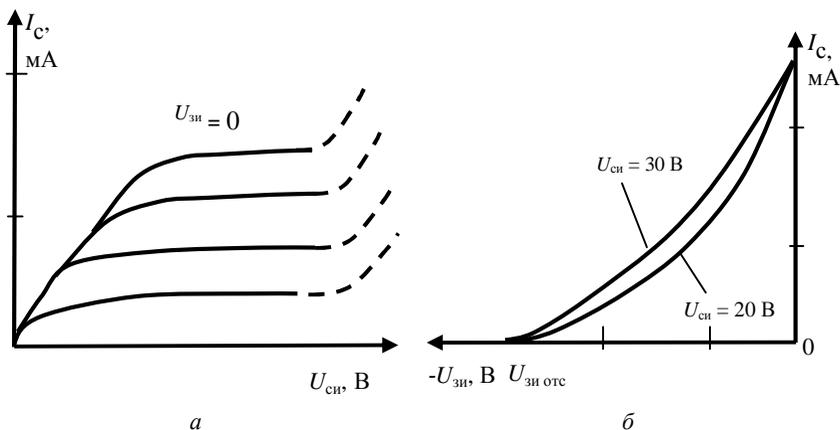


Рис. 3.2. Характеристики полевых транзисторов с  $p$ - $n$ -переходом ( $n$ -канальных):  $a$  – семейство стоковых (выходных) характеристик;  $б$  – семейство стоко-затворных (передаточных) характеристик

Параметры:

– крутизна  $S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} \Big|_{U_{си} = \text{const}}$ ;

– внутреннее (выходное) сопротивление  $R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_C} \Big|_{U_{зи} = \text{const}}$ ;

– статический коэффициент усиления  $\mu = -\frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \Big|_{I_C = \text{const}}$ ;

– входное сопротивление  $R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_3} \Big|_{U_{си} = \text{const}}$ .

– межэлектродные барьерные емкости:

$C_{зи}$  – входная емкость;

$C_{зс}$  – проходная емкость между  $З$  и  $С$ ;

$C_{си}$  – выходная емкость.

Для  $p$ -канальных транзисторов в структуре меняются местами типы полупроводниковых областей и, соответственно, полярность подключения источников питания.

В полевых транзисторах с  $p$ - $n$ -переходом затвор имеет непосредственный электрический контакт с областью токопроводящего канала. В МДП-транзисторах затвор изолирован от канала слоем диэлектрика (отсюда название МДП: металл-диэлектрик-полупроводник) [1].



2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Вращая регулятор  $E3$ , установить значение напряжения стока-исток  $U_{си} = 1$  В (контролировать по прибору  $PV2$ ).
4. Ручкой регулятора  $E2$  изменять напряжение затвор-исток  $U_{зи}$  в соответствии со значениями, приведенными в табл. 3.1, от 0 до значения, при котором ток стока  $I_c$  станет равным 0 мА. Напряжение  $U_{зи}$  контролировать по прибору  $PV1$ , ток  $I_c$  – по прибору  $PA2$ . Данные заносить в табл. 3.1. При исследовании передаточной характеристики необходимо поддерживать напряжение  $U_{си}$  на постоянном уровне, заданном в п. 3.
5. Ручки регуляторов напряжения питания  $E2$  и  $E3$  установить в положение «0».
6. Повторить п. 4 при  $U_{кз} = 3$  В (установить регулятором  $E3$ , смотреть по прибору  $PV2$ ). Данные заносить в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Данные исследования передаточных (стоко-затворных) характеристик полевого транзистора

$U_{си}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$	$U_{зи}, \text{В}$
1		0
		-0,2
		-0,4
		-0,6
		-0,8
3		0
		-0,2
		-0,4
		-0,5
		-0,8

**По результатам измерений:** построить семейство передаточных (стоко-затворных) характеристик полевого транзистора  $I_c = f(U_{зи})$  при разных значениях  $U_{си}$ .

### Исследование выходных (стоковых) характеристик полевого транзистора

1. Схема подключения остается прежней (рис. 3.1).
2. Вращая ручку регулятора  $E2$ , установить  $U_{зи} = 0$  В (контролировать по прибору  $PV1$ ).
3. Ручкой регулятора  $E3$  изменять напряжение  $U_{си}$  в соответствии со значениями, приведенными в табл. 3.2. (контролировать по прибору  $PV2$ ). Фиксировать стоковый ток  $I_c$  (по прибору  $PA2$ ). Данные заносить в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Данные исследования выходных характеристик биполярного транзистора

$U_{зи}, \text{В}$	$U_{си}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$
0	0	0
	0,5	
	1	
	1,5	
	2	
	4	
	6	
	8	
-0,3	0	0
	0,5	
	1	
	1,5	
	2	
	4	
	6	
	8	

4. Ручки регуляторов напряжения питания  $E2$  и  $E3$  установить в положение «0».

5. Повторить п. 3 при напряжении затвор-исток  $U_{зи} = -0,3$  В (установить регулятором  $E2$ , смотреть по прибору  $PV1$ ). Данные заносить в табл. 3.2.

### По результатам измерений:

1) построить семейство выходных (стоковых) характеристик полевого транзистора  $I_c = f(U_{си})$  при разных значениях  $U_{зи}$ ;

2) по характеристикам определить значение крутизны  $S$ , рассчитать внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_i$ , статический коэффициент усиления по напряжению  $\mu$ .

### Методика выполнения работы на компьютере

1. Запустить программу *MICROCAP*.

2. Открыть файл «ЛАБ\_3», на экране появится схема включения полевого транзистора (рис. 3.4), где  $V1$  – источник напряжения затвор-исток,  $V2$  – источник напряжения сток-исток,  $VT$  – полевой  $p$ -канальный транзистор 2N2608 – тип транзистора, соответствующий зарубежной маркировке,  $R1$  – сопротивление нагрузки, равное 10 Ом.

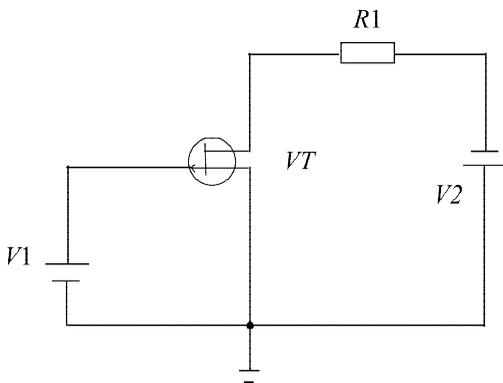


Рис. 3.4. Схема включения полевого транзистора

Снять семейство выходных (стоковых) характеристик транзистора  $I_c = f(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const}$ :

– установить напряжение  $U_{зи} = 0$  (значение  $V1 = 0$ , двойной щелчок по элементу – см. приложение);

– изменять напряжение  $U_{си}$  ( $V2$ ) от 0 до  $-7$  В через 0,5 В (см. приложение). Определить ток стока  $I_c$ , воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение). На временной

диаграмме ток  $I_c$  показан зеленым цветом,  $U_{зи}$  (V1) – синим цветом,  $U_{си}$  (V2) – красным цветом. Результаты занести в табл. 3.3;

– повторить измерения, изменяя напряжение  $U_{зи}$  в соответствии с табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты измерений для построения выходных (стоковых) характеристик

$U_{си}, В$ \ $U_{зи}, В$	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-4,5	-5	-5,5	-6	-6,5	-7
0															
0,5															
1,0															
1,5															
2,0															

3. Снять семейство переходных (стоко-затворных) характеристик транзистора  $I_c = f(U_{зи})$  при  $U_{си} = \text{const}$ :

– установить напряжение  $U_{си}$  (V2) = -0,5 В;

– изменять напряжение  $U_{зи}$  (V1) от 0 В до 4 В через 0,5 В в соответствии с табл. 3.4. Определить ток стока  $I_c$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где  $I_c$  показан зеленым цветом,  $U_{зи}$  (V1) – синим цветом,  $U_{си}$  (V2) – красным цветом. Данные занести в табл. 3.4;

– установить напряжение (V2)  $U_{си} = -2$  В и повторить измерения. Результаты занести в табл. 3.4;

– установить напряжение (V2)  $U_{си} = -3$  В и повторить измерения. Результаты занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Результаты измерений  
для построения переходных (стоко-затворных) характеристик

$U_{зи}, В$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$U_{си} = -0,5 В$									
$U_{си} = -2,0 В$									
$U_{си} = -3,0 В$									

### **По результатам измерений:**

1) построить семейство передаточных (стоко-затворных) характеристики полевого транзистора  $I_c = f(U_{зи})$  при разных значениях  $U_{си}$ ;

2) построить семейство выходных (стоковых) характеристик полевого транзистора  $I_c = f(U_{си})$  при разных значениях  $U_{зи}$ ;

3) по характеристикам определить значение крутизны  $S$ , рассчитать внутреннее дифференциальное сопротивление  $R_i$ , статический коэффициент усиления по напряжению  $\mu$ .

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Какие типы полевых транзисторов вы знаете?
2. Назовите основные параметры полевых транзисторов.
3. Сравните ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом и со встроенным каналом.
4. Назовите особенности каждой из схем включения полевых транзисторов.
5. Назовите основные отличия полевых транзисторов от биполярных. Укажите их достоинства и недостатки.
6. Каков принцип работы полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом?
7. Каков принцип работы полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом?
8. Каков принцип работы полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ

**Цель работы:** ознакомиться с конструкцией, параметрами и системой обозначений типов тиристоров; изучить принцип работы тиристоров и снять их основные характеристики.

#### **Лабораторное оборудование:**

1. Лабораторный стенд «Электроника» НТП «Центр».
2. ПЭВМ.

#### **Краткие теоретические сведения**

Тиристор – это электропреобразовательный полупроводниковый прибор с тремя и более  $p$ - $n$ -переходами, на вольтамперной характеристике которого имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления. Тиристоры выпускают трех разновидностей: динисторы (двухэлектродные), тринисторы (трехэлектродные) и симисторы – симметричные приборы.

Тиристоры и динисторы представляют собой полупроводниковые выпрямительные элементы, которые под действием прямого приложенного напряжения могут переключаться из одного устойчивого состояния в другое, то есть при работе они могут находиться в состоянии низкой (закрыт) или высокой (открыт) проводимости.

Динистор как выпрямительный диод имеет два вывода – анод и катод. В тиристоре предусмотрен еще управляющий электрод.

Структура диодного тиристора  $n$ - $p$ - $n$ - $p$  показана на рис. 4.1, а.

Как видно, он имеет три  $n$ - $p$ -перехода. Крайнюю область  $p$  называют анодом, а крайнюю область  $n$  – катодом, две средние области называют базовыми. При подключении источника питания плюсом к аноду динистора, а минусом к катоду, переходы П1 и П3 окажутся смещенными в прямом направлении (будут открыты), а средний П2 – в обратном направлении (будет закрыт). То есть переходы П1 и П3 являются эмиттерными, а переход П2 – коллекторным. Через переход П1 будут инжектироваться электроны в базовую  $p$ -область, а через переход П3 – дырки в базовую  $n$ -область. То есть в область, примыкающую к переходу П2, инжектируются неосновные носители, которые уменьшают сопротивление перехода

П2, и при определенном напряжении переход П2 будет отпираться и через тиристор потечет прямой ток.

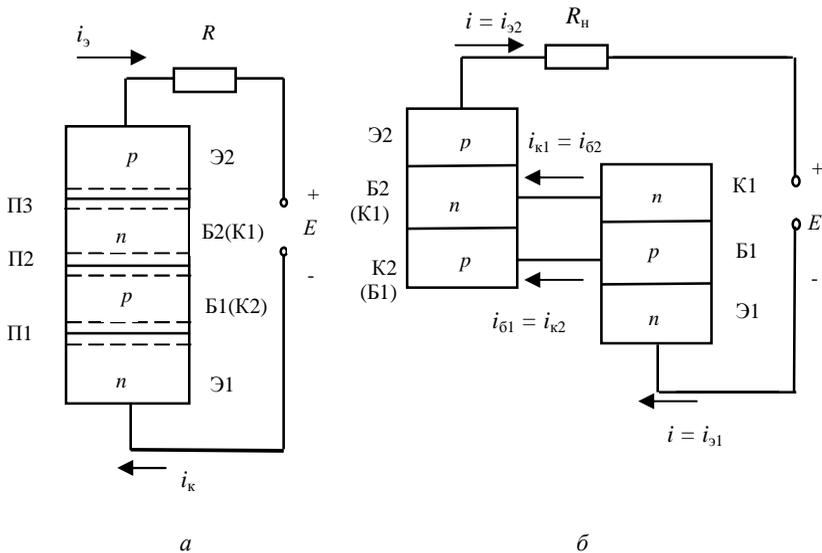


Рис. 4.1. Структура диодного тиристора (а) и его эквивалентная схема в виде двух транзисторов (б)

Тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы (модели), состоящей из двух транзисторов типа  $n-p-n$  и  $p-n-p$ , соединенных так, как показано на рис. 4.1, б. Область базы Б1 транзистора одновременно является коллекторной областью К2 второго транзистора, а область базы Б2 одновременно служит коллекторной областью К1. Соответственно этому коллекторный ток первого транзистора  $i_{к1}$  является током базы второго транзистора  $i_{б2}$ , а ток коллектора  $i_{к2}$  второго транзистора представляет собой ток базы  $i_{б1}$  первого транзистора.

Вольтамперная характеристика тиристора, представленная на рис. 4.2, показывает, что происходит в тиристоре при повышении приложенного к нему напряжения.

Сначала ток невелик и растет медленно, что соответствует участку 0А характеристики. В этом режиме тиристор можно считать закрытым. На сопротивление коллекторного перехода П2 влияют

два взаимно противоположных процесса. С одной стороны, повышение обратного напряжения на этом переходе увеличивает его сопротивление, так как под влиянием обратного напряжения основные носители уходят в разные стороны от границы, то есть переход П2 все больше обедняется основными носителями. Но, с другой стороны, повышение прямых напряжений на эмиттерных переходах П1 и П3 усиливает инжекцию носителей, которые подходят к переходу П2, обогащают его и уменьшают его сопротивление. До точки А перевес имеет первый процесс и сопротивление растет, но все медленнее и медленнее, так как постепенно усиливается второй процесс.

Около точки А при некотором напряжении (десятки или сотни вольт), называемом напряжением включения  $U_{вкл}$ , влияние обоих процессов уравнивается, а затем даже ничтожно малое повышение подводимого напряжения создает перевес второго процесса и сопротивление перехода П<sub>2</sub> начинает уменьшаться. Тогда возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания тиристора. Ток резко, скачком, возрастает (участок АВ на характеристике), так как увеличение напряжения на П1 и П3 уменьшает сопротивление П2 и напряжение на нем, за счет чего еще больше возрастают напряжения на П1 и П3, а это, в свою очередь, приводит к еще большему возрастанию тока, уменьшению сопротивления П2 и т. д.

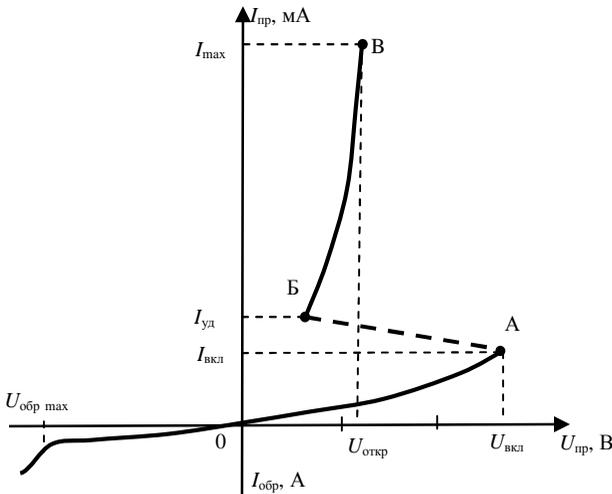


Рис. 4.2. Вольтамперная характеристика диодного тиристора

В результате такого процесса устанавливается режим, напоминающий режим насыщения транзистора: большой ток при малом напряжении (участок БВ). Ток в этом режиме, когда прибор открыт, определяется главным образом сопротивлением нагрузки  $R_n$ , включенной последовательно с прибором.

Если от одной из базовых областей сделан вывод, то получается управляемый переключающий прибор, называемый триодным тиристором (тринистором). Подавая через этот вывод прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно регулировать значение напряжения включения  $U_{вкл}$ . Чем больше ток управления  $I_y$ , тем меньше  $U_{вкл}$ , то есть тиристор включается быстрее.

На рис. 4.3 приведены структура и вольтамперные характеристики триодного тиристора для разных управляющих токов.

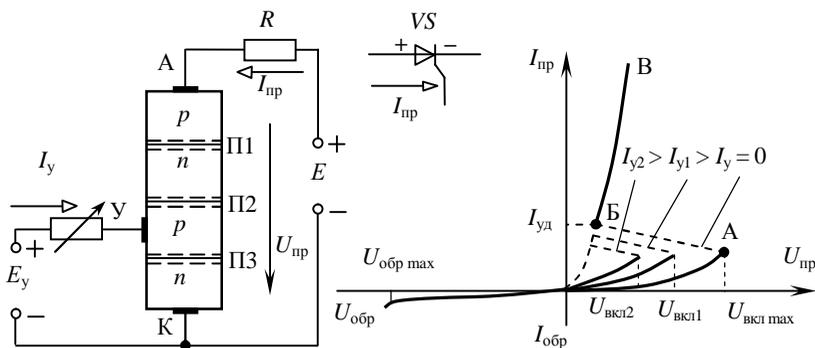


Рис. 4.3. Вольтамперные характеристики триодного тиристора для разных управляющих токов

Чем больше ток управления, тем сильнее инжекция носителей от соответствующего эмиттера к среднему коллекторному переходу и тем меньше требуется напряжение на тиристоре, для того чтобы начался процесс отпирания прибора. Наиболее высокое  $U_{вкл}$  получается при отсутствии тока управляющего электрода, когда триодный тиристор превращается в диодный. И наоборот, при значительном токе  $I_y$  характеристика триодного тиристора приближается к характеристике прямого тока обычного диода.

Обратная ветвь ВАХ тиристора (рис. 4.3) аналогична обратной ветви выпрямительных диодов и характеризуется параметрами: максимально допустимым напряжением  $U_{обр}$  и током  $I_{обр}$ .

### Методика выполнения работы на лабораторном стенде НТЦ-02.05 «Электроника»

#### Порядок подготовки к работе:

1. Изучить краткие теоретические сведения по лабораторной работе.
2. Убедиться в том, что:
  - на панели стенда отсутствуют перемычки;
  - автоматический выключатель  $QF1$  выключен;
  - регуляторы напряжения питания  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  установлены в положение «0»;
  - ручка потенциометра  $R9$  установлена в среднее положение.
3. Тумблер выбора режима измерения  $SA1$  приборов  $PV1$ ,  $PA1$  установить в положение  $DC$  (вверх).

#### Исследование зависимости $U_a = f(U_y)$ тиристора

1. Собрать схему согласно рис. 4.4 (блок 2 на лицевой панели лабораторного стенда).

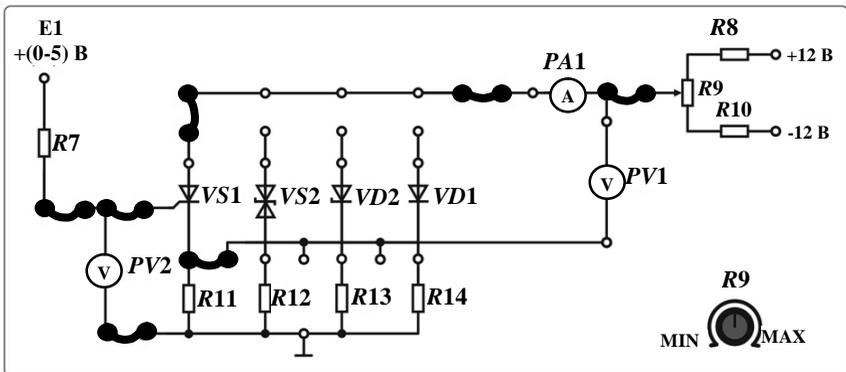


Рис. 4.4. Схема исследования ВАХ тиристора

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Установить ручку потенциометра  $R9$  в среднее положение, ручку  $E1$  в положение «0».

4. Вращением ручки потенциометра  $R9$  ступенчато выставлять напряжение  $U_a$  (смотреть по прибору  $PV1$ ) в соответствии со значениями, приведенными в табл. 4.1. Вращением ручки  $E1$  подать напряжение управления  $U_y$ , при котором тиристор откроется, то есть появится анодный ток (смотреть по прибору  $PA1$ ). Зафиксировать и занести в табл. 4.1. значение  $U_y$  (смотреть по прибору  $PV2$ ).

Таблица 4.1

Результаты опыта для исследования зависимости  $U_a = f(U_y)$

$U_a, \text{ В}$	0	2	4	6	8	10
$U_y, \text{ В}$						

5. Закрыть тиристор. Для этого установить ручку потенциометра  $R9$  в среднее положение, ручку  $E1$  в положение «0».

6. Вращением ручки потенциометра  $R9$  установить следующее значение  $U_a$  в соответствии с табл. 4.1. Повторить п. 4.

**По результатам измерений:** построить зависимости  $U_a = f(U_y)$  тиристора.

#### **Исследование ВАХ тиристора при $U_y = 0 \text{ В}$**

1. Установить ручку  $E1$  в положение «0», ручку потенциометра  $R9$  в положение, при котором  $U_{a \text{ пр}} = 0 \text{ В}$  (смотреть по прибору  $PV1$ ).

2. Вращением ручки потенциометра  $R9$  изменять напряжение  $U_{a \text{ пр}}$  от 0 В до положения  $\max$ , в соответствии со значениями, приведенными в табл. 4.2. Заносить в таблицу значения прямого тока  $I_{a \text{ пр}}$  (смотреть по прибору  $PA1$ ). Таким образом будет получена прямая ветвь ВАХ тиристора.

3. Установить ручку потенциометра  $R9$  в положение, при котором  $U_{a \text{ обр}} = 0 \text{ В}$  (смотреть по прибору  $PV1$ ).

4. Вращением ручки потенциометра  $R9$  изменять напряжение  $U_{a \text{ обр}}$  от 0 В до положения  $\min$ , в соответствии со значениями, приведенными в табл. 4.2. Заносить в таблицу значения обратного тока  $I_{a \text{ обр}}$  (прибор  $PA1$ ). Таким образом будет получена обратная ветвь ВАХ тиристора.

#### **Исследование ВАХ тиристора при $U_y = 4 \text{ В}$**

1. Установить ручку потенциометра  $R9$  в среднее положение.

2. Установить ручку регулятора напряжения  $E1$  в положение, при котором  $U_y = 4 \text{ В}$  (смотреть по прибору  $PV2$ ).

3. Вращением ручки потенциометра  $R9$  установить  $I_{a\text{ пр}} = 0$  (смотреть по прибору  $PA1$ ).

4. Занести в табл. 4.2 значение  $U_{a\text{ пр}}$  (прибор  $PV1$ ), при котором тиристор находится в открытом состоянии.

Таблица 4.2

Результаты опыта исследования ВАХ тиристора

$U_y, \text{ В}$	Прямая ветвь ВАХ		Обратная ветвь ВАХ	
	$U_{a\text{ пр}}$	$I_{a\text{ пр}}$	$U_{a\text{ обр}}$	$I_{a\text{ обр}}$
0	0		0	
	2		-2	
	4		-4	
	6		-6	
	8		-8	
	10		-10	
4	0		-	-
	0,6		-	-
	0,7		-	-
	0,8		-	-
	0,9		-	-

5. Вращением ручки потенциометра  $R9$  изменять напряжение  $U_{a\text{ пр}}$  (прибор  $PV1$ ) в соответствии со значениями, приведенными в табл. 4.2. Фиксировать анодный ток  $I_{a\text{ пр}}$  тиристора в открытом состоянии (смотреть по прибору  $PA1$ ). Таким образом будет получена прямая ветвь ВАХ тиристора при  $U_y = 4 \text{ В}$ .

6. Отключить автоматический выключатель  $QF1$ .

7. Извлечь установленные перемычки.

**По результатам измерений:**

1) построить прямую и обратную ветви ВАХ тиристора в закрытом состоянии при  $U_y = 0 \text{ В}$  (табл. 4.2). При построении графика масштаб по оси токов  $I_{a\text{ пр}}$  и  $I_{a\text{ обр}}$  выбрать следующим образом:  $1 \text{ см} = 0,05 \text{ мА}$ ;

2) построить прямую ветвь ВАХ тиристора в открытом состоянии при  $U_y = 4 \text{ В}$  (табл. 4.2).

## Методика выполнения работы на компьютере

1. Запустить программу *MICROCAP*.
2. Открыть файл «ЛАБ\_4\_1»: на экране появится схема для исследования диодного тиристора (рис. 6.5), где *V1* – источник анодного напряжения, *VS* – тиристор CS20-22; *R1* – переменное сопротивление с максимальным значением, равным 1 кОм; *R3* – сопротивление, стоящее в цепи анода, равное 10 Ом.

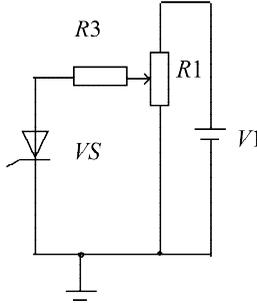


Рис. 4.5. Схема для исследования диодного тиристора

3. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики диодного тиристора  $I_{пр} = f(U_{пр})$ , изменяя входное анодное напряжение путем изменения сопротивления *R1* от нуля до максимального значения сопротивления (1 кОм):

- установить прямое напряжение источника напряжения *V1*, равное 30 В (значение напряжения на *V1* устанавливается двойным щелчком по элементу – см. приложение);

- изменять сопротивление переменного резистора *R1* в соответствии с заданными в табл. 4.3 значениями (значение сопротивления устанавливается в процентном отношении к максимальной величине, то есть 100 % – это 1 кОм);

- перевести значения сопротивлений для *R1* из % в реальные значения, измеряемые в Ом; результаты расчета занести в табл. 4.3;

- измерить значения прямого тока  $I_{пр}$  и прямого напряжения  $U_{пр}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где напряжение питания от источника *V1* показано красным цветом, ток  $I_{пр}$  для диодного тиристора *VS* показан синим цветом, а прямое напряжение  $U_{пр}$  – зеленым цветом. Результаты занести в табл. 4.3.

4. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики диодного тиристора  $I_{обр} = f(U_{обр})$ , изменяя  $R1$  от нуля до максимального значения, через 200 Ом в соответствии с методикой п. 3. Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты исследования ВАХ тиристора

$R1$ , %	0	20	30	35	40	50	60	70	80	90	100
$R1$ , Ом	0										1000
$U_{пр}$ , В											
$I_{пр}$ , мА											
$U_{обр}$ , В			–	–		–		–		–	
$I_{обр}$ , мА			–	–		–		–		–	

5. Открыть файл «ЛАБ\_4\_2»: на экране появится схема для исследования триодного тиристора (рис. 4.6), где  $V1$  – источник анодного напряжения,  $VS$  – тиристор CS20-22;  $R1$  – переменное сопротивление с максимальным значением, равным 1 кОм;  $R3$  – сопротивление, стоящее в цепи анода, равное 10 Ом;  $V2$  – источник управляющего напряжения (9 В);  $R2$  – переменное сопротивление, с помощью которого подается ток на управляющий электрод тиристора.

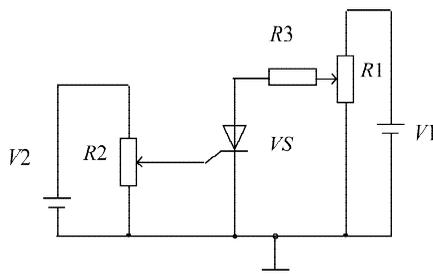


Рис. 4.6. Схема для исследования триодного тиристора

6. Определить экспериментально параметры триодного тиристора в момент его включения при подаче тока управления  $I_y$  на управляющий электрод тиристора:

- подавать управляющий ток  $I_y$  на управляющий электрод тиристора (5 мА, 10 мА, 15 мА) с помощью потенциометра  $R2$ ;

- изменять значения переменного сопротивления  $R1$  от нуля до момента включения тиристора (момент включения определяется резким уменьшением значения анодного напряжения);

- определить момент отпирания тиристора, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение), напряжение включения  $U_{вкл}$ , анодное напряжение на открытом тиристоре  $U_{а\text{ откр}}$ , ток открытого тиристора  $I_a$ , напряжение управления  $U_y$ . На графике  $U_{вкл}$  показано зеленым цветом до момента перехода тиристора в открытое состояние,  $U_{а\text{ откр}}$  – зеленым цветом, когда тиристор уже перешел в открытое состояние,  $I_a$  – розовым цветом,  $U_y$  – желтым цветом. Кроме того, на графиках показаны значения тока управления  $I_y$  – черным цветом, напряжение источника  $V1$  – синим цветом, напряжение источника  $V2$  – красным цветом;

- полученные данные занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты исследования ВАХ триодного тиристора

$I_y$	$R1$	$I_a$	$U_{а\text{ откр}}$	$U_y$	$U_{вкл}$
5 мА (59 %)					
10 мА (29 %)					
15 мА (19 %)					

**По результатам измерений:** построить на одном графике семейство прямых и обратную ветви вольтамперной характеристики  $I_a = f(U_a)$  при  $I_y = 0$ . Масштаб для прямой и обратной ветвей может быть разным.

## Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Начертите вольтамперную характеристику исследуемого тристора и объясните ее особенности.
2. Объясните принцип действия тиристора. Объясните принцип действия динистора.
3. Укажите основные параметры тристора.
4. Укажите области и примеры использования тиристорov.
5. Какие существуют отпирания и запираания тиристорov?
6. Объясните устройство и принцип действия симистора.
7. В чем отличия симистора от тиристора?
8. Каково назначение управляющего электрода тиристора?
9. Назовите временные параметры тиристорov.
10. Какие электронные приборы-аналоги тиристорov вы знаете?
11. В чем отличия тиристорov от транзисторov?
12. Каковы преимущества тиристорov в сравнении с транзисторами и в каких случаях эти преимущества проявляются?

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ С ЦЕПЯМИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

**Цель работы:** изучить устройство и назначение элементов усилителя, принципы построения обратных связей в усилителях, исследовать основные характеристики усилителя низкой частоты (УНЧ).

#### Лабораторное оборудование:

1. Лабораторный стенд «Электроника» НТП «Центр».
2. ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Многокаскадные схемы усилителей применяются в тех случаях, когда усиления одного каскада недостаточно. Транзисторные УНЧ собирают, как правило, по схеме с ОЭ.

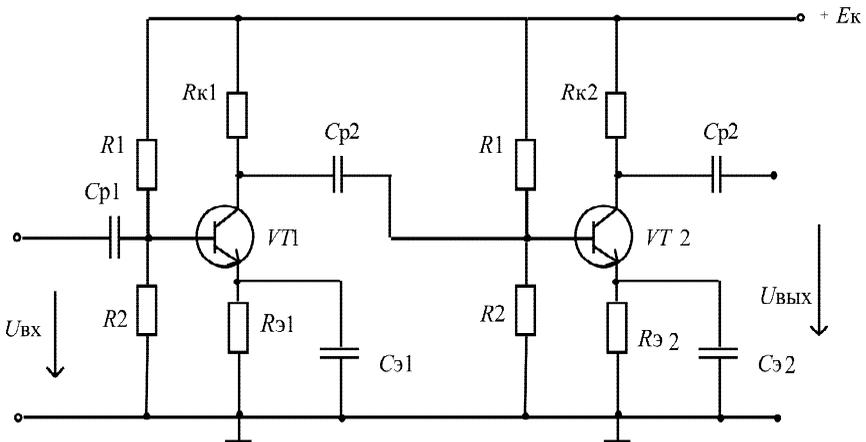


Рис. 5.1. Схема электрическая принципиальная двухкаскадного усилителя с RC-связью

Межкаскадная связь может быть гальванической, резистивно-емкостной (RC), оптронной, трансформаторной или дроссельной. Схема двухкаскадного усилителя с RC-связью приведена на рис. 5.1.

Основные элементы схемы:

- источник питания  $E_k$  («+»  $E_k$  для транзистора  $n-p-n$  типа, «-»  $E_k$  для транзистора  $p-n-p$  типа);
- биполярный транзистор  $n-p-n$  типа ( $VT$ );
- сопротивление в цепи коллектора  $R_k$ , с помощью которого создается выходное напряжение.

К вспомогательным элементам каскада относятся:

- разделительный конденсатор  $C_{p1}$ , который не пропускает постоянную составляющую тока, то есть исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току;
- разделительный конденсатор  $C_{p2}$ , который не пропускает постоянной составляющей напряжения в нагрузку или в следующий каскад;
- делитель напряжения  $R1 / R2$ , включенный в цепь базы. Обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, то есть в отсутствие входного сигнала.

Одной из основных характеристик усилителя является графическая зависимость амплитуды выходного напряжения усилителя от амплитуды (или действующего значения) его выходного напряжения на некоторой неизменной частоте, называемая амплитудной характеристикой (рис. 5.2).

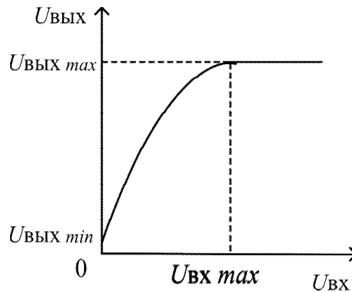


Рис. 5.2. Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика реального усилителя не проходит через начало координат, поскольку в реальных условиях напряжение на выходе при отсутствии входного определяется уровнем собственных шумов и помех —  $U_{\text{ВЫХ min}}$ . При увеличении входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$ , выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  тоже увеличивается практически

пропорционально (так называемый линейный участок амплитудной характеристики). При больших входных напряжениях ( $U_{вх} > U_{вх\ max}$ ) выходное напряжение  $U_{вых}$  практически не меняется (так называемый нелинейный участок амплитудной характеристики, на котором наблюдаются нелинейные искажения сигнала). Таким образом, реальный усилитель может усиливать сигнал без заметных искажений напряжения не выше  $U_{вх\ max}$ .

Другой характеристикой усилителя является амплитудно-частотная характеристика, представляющая собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала, то есть  $K_U = f(f)$ , представленная на рис. 5.3. Идеальная амплитудно-частотная характеристика представляет собой горизонтальную прямую, параллельную оси частот, реальная характеристика имеет искажения в области нижних и верхних частот. Причиной этих искажений является наличие в схеме усилителя реактивных элементов (конденсаторов, катушек индуктивности, емкостей и т. д.).

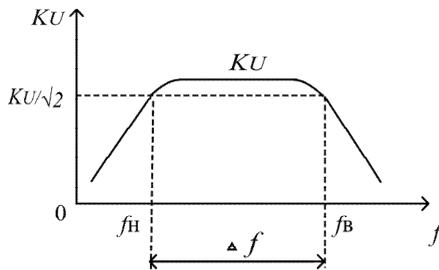


Рис. 5.3. Амплитудно-частотная характеристика

На рис. 5.4 изображена эквивалентная схема первого каскада.

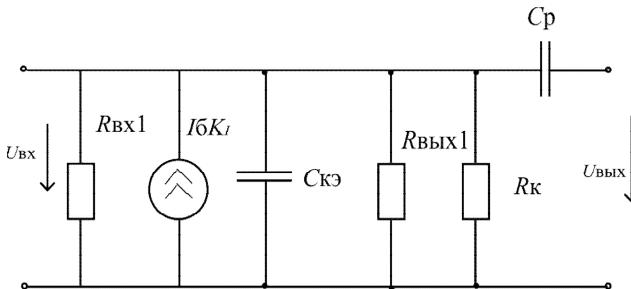


Рис. 5.4. Эквивалентная схема первого каскада

В области низших частот коэффициент усиления падает с понижением частоты сигнала из-за увеличения сопротивления конденсатора  $C_p$ . С ростом сопротивления конденсатора  $C_p$  увеличивается глубина отрицательной обратной связи (ООС по переменному току) через резистор  $R_3$ . В области высших частот коэффициент усиления уменьшается из-за шунтирующего действия емкостей  $C_{кз}$ . Низкочастотный и высокочастотный диапазоны ограничены соответственно низшей  $f_n$  и высшей  $f_v$  граничными частотами, на которых коэффициент усиления падает в 1,4 раза по отношению к его значению на средних частотах, то есть  $K_n = K_v = 0,7 K_{cp}$ . Для оценки степени неравномерности амплитудно-частотной характеристики вводится коэффициент частотных искажений  $M = K_{cp} / K$ . Обычно принимают  $M_n = M_v = \sqrt{2}$ .

Принимаемая в усилителях отрицательная обратная связь (ООС) увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивление, снижает коэффициент усиления, расширяет полосу пропускания, повышает стабильность усиления при колебаниях напряжения питания. В транзисторных усилителях положительная обратная связь (ПОС) применяется тогда, когда для уменьшения габаритов схемы  $C_p$  не ставится. Возникающая в этом случае на  $R_3$  отрицательная обратная связь (ООС) резко снижает коэффициент усиления схемы. Для компенсации этого вводится положительная связь по току с эмиттера второго каскада на эмиттер первого.

### Подготовка к работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить теоретический материал по теме работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### Методика выполнения работы на лабораторном стенде НТЦ-02.05 «Электроника»

#### Порядок выполнения работы:

1. Убедиться в том, что:
  - на панели стенда отсутствуют переключки;
  - автоматический выключатель  $QF1$  выключен;
  - регуляторы напряжения питания  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  установлены в положение «0», ручки регуляторов  $R5$  и  $R6$  установлены в положение min.

2. Перевести тумблер выбора режима измерения SA1 в положение AC (вниз).
3. Проверить подключение стенда через USB-кабель к ПК.
4. Включить компьютер.

### Исследование усилителя с общим эмиттером (ОЭ) без отрицательной обратной связи (ООС) по току

1. Собрать схему усилителя согласно рис. 5.5 (блок 1 на передней панели лабораторного стенда).

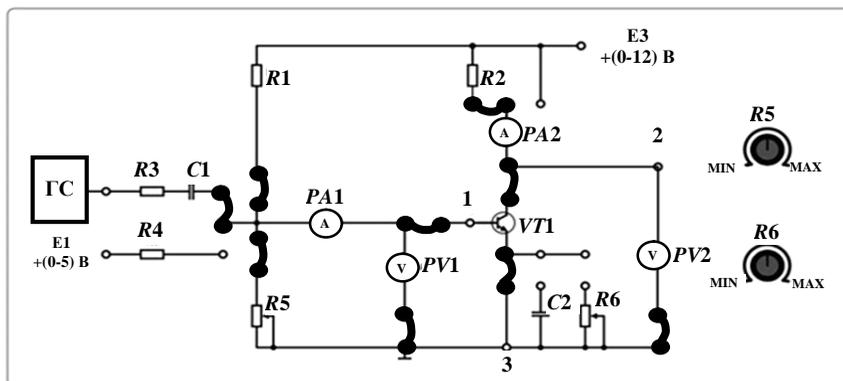


Рис. 5.5. Схема исследования усилителя с ОЭ без ООС по току

2. Подключить каналы осциллографа к точкам, которые расположены на отдельной панели, показанной на рис. 5.6:
  - канал *A* – к точке 1 ( $U_{BX}$ );
  - канал *B* – к точке 2 ( $U_{ВЫХ}$ );
  - GND* – к точке 3 (земля).

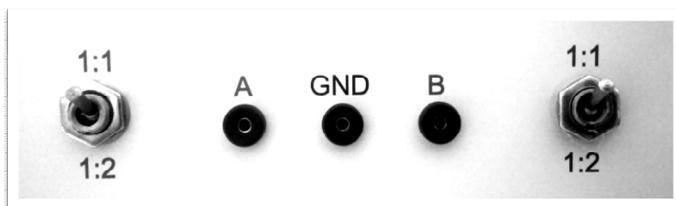


Рис. 5.6. Панель подключения каналов *A*, *B*, *GND* на передней панели лабораторного стенда

3. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
4. Ручку регулятора  $E3$  установить в положение max (крайнее правое положение), что соответствует максимальному значению напряжения источника питания. Зафиксировать это значение по прибору  $PV2$ .
5. Установить рабочую точку посередине рабочего участка нагрузочной прямой. Для этого, вращая ручку переменного резистора  $R5$ , добиться, чтобы напряжение между коллектором и эмиттером транзистора соответствовало половине напряжения питания, то есть  $E3 = E_k / 2$  (смотреть по прибору  $PV2$ ).
6. Включить компьютер. Запустить программу *PicoScope*. В программе *PicoScope* открыть окно управления сигналами генератора, встроенного в стенд. Для этого на панели инструментов программы выбрать кнопку **Генератор сигнала** (рис. 5.7). В открывшемся окне **Генератор сигнала**, установить флажок **Сигнал включен**, из списка **Форма сигнала** выбрать позицию **Синусоида**.

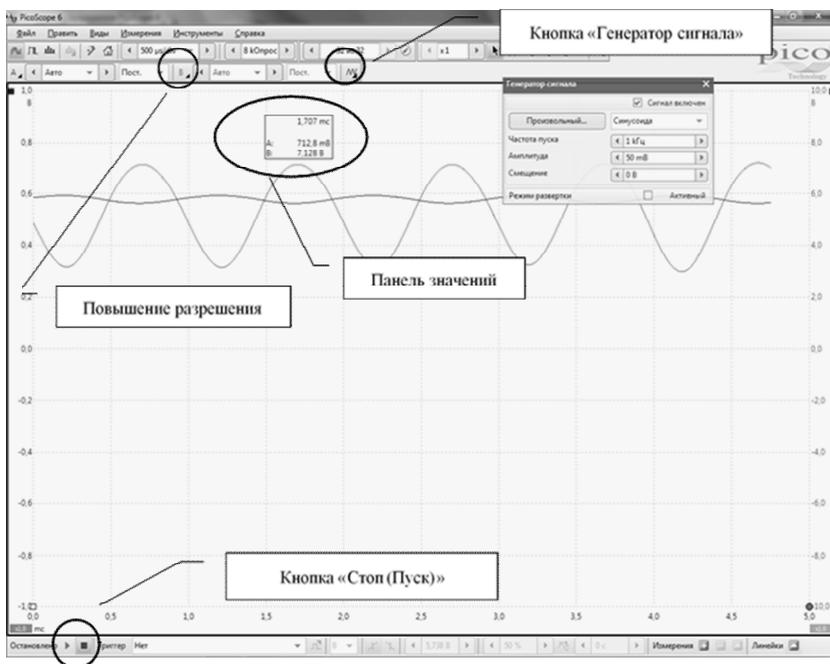


Рис. 5.7. Окно программы *PicoScope*

7. С помощью генератора сигналов (ГС) подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой  $f = 1$  кГц и амплитудой 50 мВ (рис. 5.8).

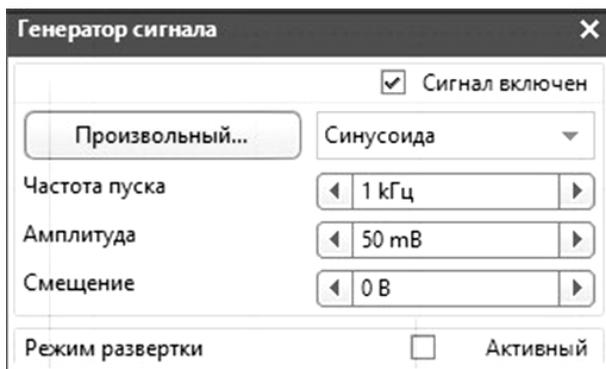


Рис. 5.8. Окно настройки входного сигнала

8. В окне программы *PicoScope* отключить сигнал по каналу *A* и подключить сигнал по каналу *B*. Для этого необходимо выбрать пункт меню **Виды**. Из открывшегося списка команд, выбрать команду **Каналы** и снять флажок **A** и установить флажок **B**. Для настройки отображения сигнала, выбрать кнопку **Повышение разрешения** (см. рис. 5.7.) и выбрать позицию **12**.

### Исследование амплитудной характеристики

#### $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ усилителя без ООС

1. Плавно изменять амплитуду входного сигнала ГС. Для этого на панели генератора (рис. 5.4) устанавливать значения входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  в графе **Амплитуда** в соответствии с табл. 5.1.

Таблица 5.1

Данные для исследования амплитудной характеристики усилителя без ОС

$U_{\text{вх}}$ , мВ	0	50	100	200	300	400	500
$U_{\text{вых}}$ , В							

2. Измерять и фиксировать в табл. 5.2 амплитудное значение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  по осциллограмме. Для этого в окне

программы *PicoScope* нажать кнопку **Стоп** на нижней панели инструментов (см. рис. 5.7). Подвести указатель мыши к максимальной точке выходного сигнала (показан красным цветом) и сделать щелчок левой кнопкой мыши. Занести в табл. 5.2 значение для канала *B* (см. рис. 5.7, панель значений). Для дальнейших измерений нажать кнопку **Пуск** на нижней панели инструментов.

### Исследование амплитудно-частотной характеристики $K_U = f(f)$ усилителя без ОС

3. Схема для исследования остается той же (см. рис. 5.1).
4. В окне настройки входного сигнала, в графе **Амплитуда** (рис. 5.8), установить напряжение  $U_{вх} = 50$  мВ.
5. Изменять частоту входного сигнала в соответствии со значениями, приведенными в табл. 5.2, которые устанавливать в графе **Частота пуска** окна настройки входного сигнала.

Таблица 5.2

Данные для исследования амплитудно-частотной характеристики усилителя без ОС

$f$ , Гц	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	2000
$U_{ввых}$ , В												
$K_U = U_{ввых} / U_{вх}$												

6. Измерять и фиксировать в табл. 5.2 амплитудное значение выходного напряжения  $U_{ввых}$  по осциллограмме. Для этого в окне программы *PicoScope* нажать кнопку **Стоп** на нижней панели инструментов (см. рис. 5.3). Подвести указатель мыши к максимальной точке выходного сигнала (показан красным цветом) и сделать щелчок левой кнопкой мыши. Занести в табл. 5.2 значение для канала *B* (см. рис. 5.7). Для дальнейших измерений, нажать кнопку **Пуск** на нижней панели инструментов.

7. В программе *PicoScope* в окне **Генератор сигналов** отключить подачу сигнала (убрать флажок **Сигнал включен**).

8. Выключить автоматический выключатель *QF1*.

## Исследование амплитудно-частотной характеристики $K = f(f)$ усилителя с отрицательной обратной связью (ООС)

1. Изменить схему усилителя согласно рис. 5.5.

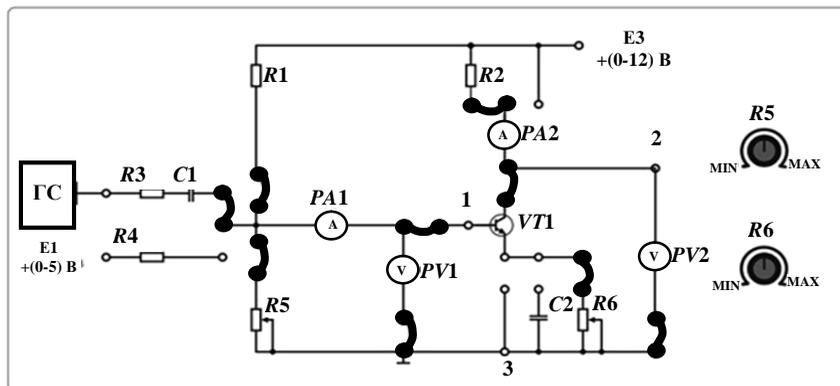


Рис. 5.9. Схема исследования усилителя с ОЭ с ООС по току

2. Установить ручку резистора  $R6$  в среднее положение.
3. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
4. Ручку регулятора  $E3$  установить в положение max (крайнее правое положение), что соответствует максимальному значению напряжения источника питания. Зафиксировать это значение по прибору  $PV2$ .

5. Установить рабочую точку посередине рабочего участка нагрузочной прямой. Для этого, вращая ручку переменного резистора  $R5$ , добиться, чтобы напряжение между коллектором и эмиттером транзистора соответствовало половине напряжения питания, то есть  $E3 = E_k / 2$  (смотреть по прибору  $PV2$ ).

6. В окне настройки входного сигнала, в графе **Амплитуда** (см. рис. 5.8), установить напряжение  $U_{вх} = 50$  мВ.

7. Изменять частоту входного сигнала в соответствии со значениями, приведенными в табл. 5.3, которые устанавливать в графе **Частота пуска** окна настройки входного сигнала.

8. Измерять и фиксировать в табл. 5.3 амплитудное значение выходного напряжения  $U_{вых}$  по осциллограмме. Для этого в окне программы *PicoScope* нажать кнопку **Стоп** на нижней панели инструментов (см. рис. 5.7). Подвести указатель мыши к максимальной

точке выходного сигнала (показан красным цветом) и сделать щелчок левой кнопкой мыши. Занести в табл. 5.3 значение для канала  $B$  (см. рис. 5.7). Для дальнейших измерений, нажать кнопку **Пуск** на нижней панели инструментов.

Таблица 5.3

Результаты исследования амплитудно-частотной характеристики усилителя с ООС

$f, \text{Гц}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	2000
$U_{\text{вых}}, \text{В}$												
$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$												

9. В программе *PicoScope* в окне **Генератор сигналов** отключить подачу сигнала (убрать флажок **Сигнал включен**).

10. Выключить автоматический выключатель *QF1*.

**По результатам измерений:**

1) построить амплитудную характеристику  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  усилителя без ООС (табл. 5.1);

2) рассчитать коэффициент усиления однокаскадного усилителя без обратной связи и с отрицательной обратной связью. Результаты расчетов занести в табл. 5.2. и 5.3;

3) в одной системе координат построить амплитудно-частотные характеристики  $K = f(f)$  усилителя без обратной связи и с ООС;

4) на АЧХ определить ширину полосы пропускания  $\Delta f$ .

**Методика выполнения работы на компьютере**

Снять амплитудную характеристику усилителя. Получить АЧХ и ФЧХ двухкаскадного усилителя с ОЭ на компьютере с использованием программы *MICROCAP* при наличии обратных связей между каскадами и без них. Исследовать влияние обратных связей (ОС) на АЧХ усилителя, а также зависимость нижней ( $f_{\text{н}}$ ) и верхней ( $f_{\text{в}}$ ) граничных частот, полосы пропускания ( $\Delta f$ ), коэффициента усиления по напряжению  $K_U$ , коэффициента частотных искажений  $M_{\text{н}} = M_{\text{в}}$ , угла сдвига фаз  $\varphi$  от наличия в схеме отрицательной или положительной обратных связей или их отсутствия. На входе усилителя поддерживается напряжение источника  $E_{\text{г}} = 25 \text{ мВ}$ ,  $C_2 = 0,05 \text{ мкФ}$ .

1. Запустить программу *MICROCAP*.
2. Открыть файл «ЛАБ\_5\_1», на экране появится схема двухкаскадного усилителя без обратных связей с разделительным конденсатором  $C_2 = 0,05$  мкФ (свериться с рис. 5.10).

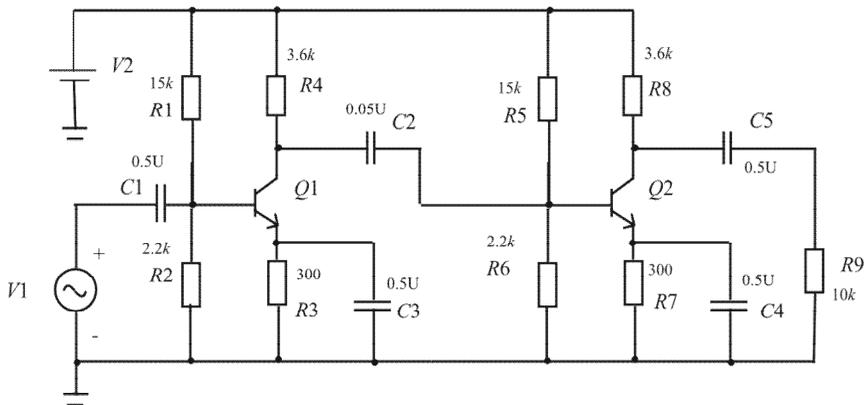


Рис. 5.10. Схема двухкаскадного усилителя без обратных связей

Снять амплитудную характеристику усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  при частоте  $f = 1000$  Гц:

– изменять значения входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  от нуля до появления заметных искажений сигнала (примерно до 150 мВ) на источнике входного сигнала  $V1$ ; измерять при этом значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где на верхнем графике показан входной сигнал, на среднем графике – сигнал на выходе первого каскада, а на нижнем графике – выходной сигнал на выходе усилителя. Значения занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Результаты исследования амплитудной характеристики усилителя без ОС

$U_{\text{ВХ}}$ , мВ	0	25	50	75	100	125	150
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В							

3. Получить АЧХ и ФЧХ усилителя без обратных связей, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *AC Analysis* (Частотный анализ), *Run* (Запустить) (см. приложение):

- на верхнем графике показана зависимость  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  от частоты  $f$ ;
- на среднем графике показана зависимость  $K_{U_{\text{дб}}} = 20 \lg K_U$  от частоты  $f$ ;
- на нижнем графике показана зависимость угла сдвига фаз  $\phi$  между входным и выходным напряжениями от частоты  $f$ .

По графикам рассчитать значения  $K_{U_{\text{н}}} = K_{U_{\text{в}}}$ ,  $K_{U_{\text{ндб}}}$ ,  $f_{\text{н}}$ ,  $f_{\text{в}}$ ,  $\Delta f$ ,  $M_{\text{н}} = M_{\text{в}}$  и  $\phi$  (на частотах 10 Гц и 10 МГц) и занести в табл. 5.5. Перерисовать графики в тетрадь.

4. Открыть файл «ЛАБ\_5\_2», на экране появится схема двухкаскадного усилителя с ООС (свериться с рис. 5.11).

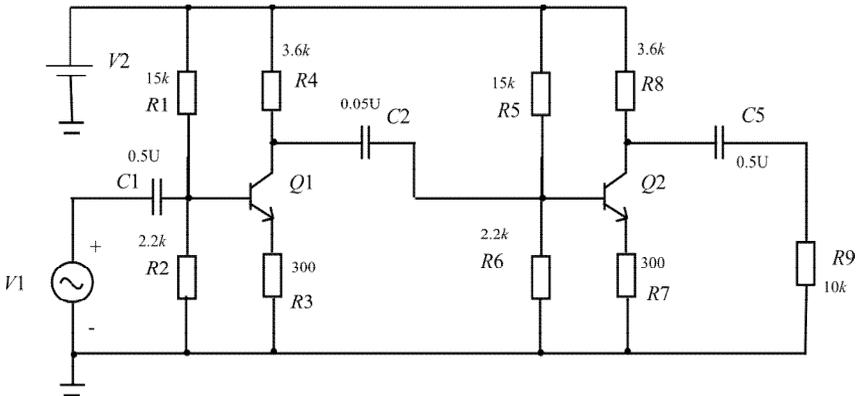


Рис. 5.11. Схема двухкаскадного усилителя с отрицательной обратной связью

5. Получить АЧХ и ФЧХ усилителя с ООС аналогично п. 4. Данные занести в табл. 5.5. Перерисовать графики в тетрадь на те же координатные поля, что и графики для схемы без обратных связей.

6. Открыть файл «ЛАБ\_5\_3», на экране появится схема двухкаскадного усилителя с положительной обратной связью (ПОС) (свериться с рис. 5.12).

7. Получить АЧХ и ФЧХ каскада с ПОС аналогично п. 4. Данные занести в табл. 5.5. Перерисовать графики в тетрадь на те же координатные поля, что и графики для схем с ООС и без обратной связи.

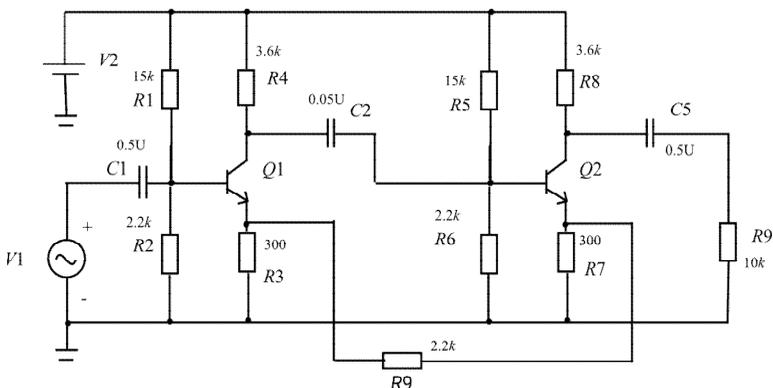


Рис. 5.12. Схема двухкаскадного усилителя с ПОС

Таблица 5.5

Результаты исследования АЧХ и ФЧХ

Тип схемы	Схема без ОС	Схема с ООС	Схема с ПОС
$K_{УН} = K_{УВ}$			
$K_{УНдБ}$			
$f_H$			
$f_B$			
$\Delta f = f_B - f_H$			
$M_H = M_B$			
$\varphi$	10 Гц		
	10 МГц		

**По результатам измерений:**

1) построить амплитудную характеристику  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  и отметить на ней рабочий участок;

2) построить на одном графике снятые АЧХ для УНЧ без обратной связи, с ООС, с ПОС и определить для каждой из них  $K_{УН} = K_{УВ}$ ,  $f_H$ ,  $f_B$ ,  $\Delta f$ ,  $M_H$ ,  $M_B$ ,  $\varphi$ ;

3) сделать вывод о характере влияния отрицательной и положительной обратной связи на АЧХ УНЧ.

**Содержание отчета:**

1. Название работы.
2. Цель работы.

3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Объясните характер изменения амплитудной характеристики двухкаскадного усилителя.
2. Начертите эквивалентную схему каскада транзисторного усилителя и объясните ее элементы.
3. Объясните причины частотных искажений в области низших и высших частот.
4. Что такое коэффициент частотных искажений, как он изменяется и определяется?
5. Что такое обратная связь? Какие виды обратных связей исследуются в данной работе?
6. Каково влияние отрицательной и положительной обратной связи на АЧХ усилителя?
7. Определите коэффициент усиления усилителя по току и по мощности в децибелах, если оба коэффициента усиления равны 100?
8. Объясните назначение всех элементов схемы транзисторного усилительного каскада.
9. Каковы основные схемы температурной стабилизации усилителей и их принципы работы?
10. Расскажите об основных характеристиках усилителей и как по ним определяются основные параметры.
11. Какие искажения сигнала возникают в усилителях и как они определяются?
12. Объясните принцип, на котором основано усиление сигналов в усилителе.
13. Какие основные отличия в схемах усилителей переменного и постоянного токов?
14. Каким образом в транзисторных усилителях осуществляется стабилизация рабочей точки в режиме покоя?
15. Какие есть режимы работы усилителей? Объясните их особенности.
16. Расскажите об обратных связях, применяемых в данной работе, и их особенностях.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

**Цель работы:** изучить назначение, принцип работы и особенности построения электрических схем усилителей мощности; изучить и исследовать характеристики и параметры усилителей мощности.

**Лабораторное оборудование:** ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Усилители, обеспечивающие получение в нагрузочном устройстве максимальной мощности усиленного сигнала, называют усилителями мощности.

Усилители мощности (УМ) классифицируются по следующим признакам:

1. По элементной базе:
  - УМ на биполярных транзисторах, включенных по схеме с ОЭ, ОБ, ОК;
  - УМ на полевых транзисторах, включенных по схеме ОИ, ОС.
2. По используемому классу усиления:
  - однотактные (используют режим  $A$ );
  - двухтактные (используют режим  $B$  или  $AB$ ).
3. По способу подключения нагрузки:
  - трансформаторные
  - бестрансформаторные: с двумя источниками питания, с одним источником питания.

Основными характеристиками усилителей мощности являются: амплитудная (см. рис. 5.2), амплитудно-частотная (см. рис. 5.3) и фазочастотная.

Основными параметрами усилителей мощности являются:

- коэффициент усиления по мощности  $K_p$ ;
- выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ ,  $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$ ;
- КПД.

В усилителях мощности нашли применение три класса усиления ( $A$ ,  $AB$ ,  $B$ ), отличающиеся положением рабочей точки на линии нагрузки.

Режим класса усиления  $A$  используется в одноктактных усилителях мощности. Точка покоя  $\Pi$  находится на нагрузочной прямой и соответствует середине линейного участка переходной характеристики (рис. 6.1). Это обеспечивает получение наименьших нелинейных искажений. Однако этот режим имеет и существенный недостаток – очень низкий КПД усилителя.

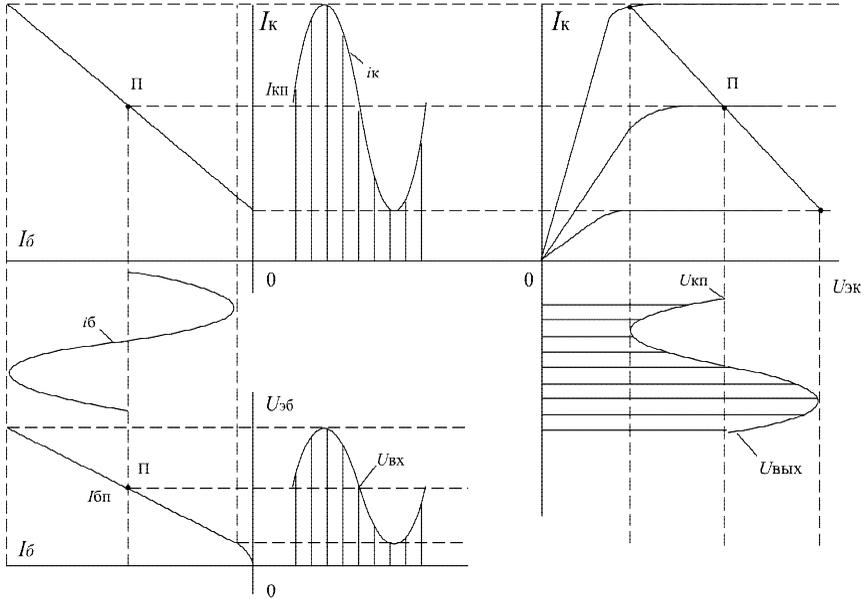


Рис. 6.1. Работа усилителя в режиме  $A$

Режим класса усиления  $B$  используется в двухтактных усилителях мощности. Точка покоя  $\Pi$  располагается в крайней правой части линии нагрузки (рис. 6.2). Данный режим обеспечивает высокий КПД усилительного каскада, но нелинейные искажения очень велики.

Режим класса усиления  $AB$  является промежуточным между режимами классов  $A$  и  $B$ . Точка покоя  $\Pi$  занимает среднее положение между точками покоя для режимов  $A$  и  $B$ . В этом случае нелинейные искажения увеличиваются по сравнению с режимом  $A$  и уменьшаются по сравнению с режимом  $B$ . Данный режим обеспечивает более высокий КПД, чем режим  $A$ , но более низкий КПД, по сравнению с режимом  $B$ .

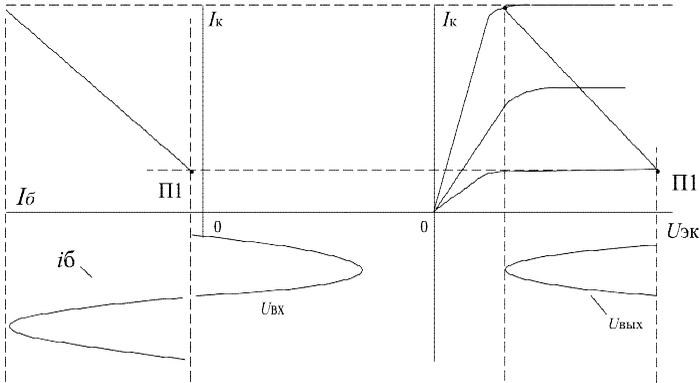


Рис. 6.2. Работа усилителя в режиме В

### Подготовка к работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить теоретический материал по разделу работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### Методика выполнения работы на компьютере

1. Исследовать однотактный трансформаторный усилитель мощности.
  - 1.1. Запустить программу *MICROCAP*.
  - 1.2. Открыть файл «ЛАБ\_6\_1», на экране появится схема однотактного трансформаторного усилителя мощности (рис. 6.3).

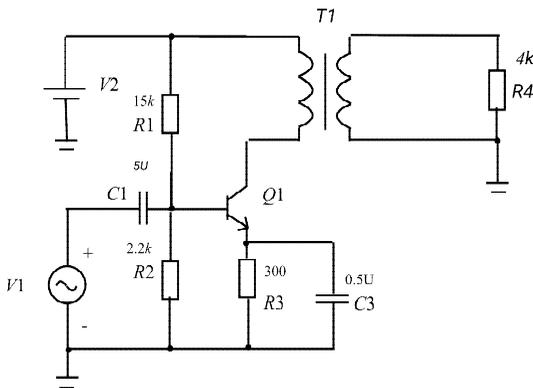


Рис. 6.3. Схема однотактного трансформаторного усилителя мощности

1.3. Снять амплитудную характеристику усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  при частоте  $f = 1000$  Гц:

– изменять значения входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  от нуля до появления заметных искажений сигнала (примерно до 250 мВ) на источнике входного сигнала V1, измерить при этом значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где входное напряжение показано синим цветом, выходное напряжение показано красным цветом, входной ток – черным цветом, а выходной ток – зеленым цветом;

– значения занести в табл. 6.1;

– измерить значения входного тока  $i_{\text{ВХ}}$  и выходного тока  $i_{\text{ВЫХ}}$  на линейном участке амплитудной характеристики (при  $U_{\text{ВХ}} = 100$  мВ), значения занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты исследования амплитудной характеристики

Однотактный трансформаторный		Двухтактный трансформаторный		Двухтактный бестрансформаторный	
$U_{\text{ВХ}}$ , мВ	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$U_{\text{ВХ}}$ , мВ	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$U_{\text{ВХ}}$ , мВ	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В
0		0		0	
1		1		25	
50		5		50	
100		10		100	
150		15		150	
250		20		200	
при $U_{\text{ВХ}} = 100$ мВ		при $U_{\text{ВХ}} = 10$ мВ		при $U_{\text{ВХ}} = 50$ мВ	
$i_{\text{ВХ}}$ , мкА	$i_{\text{ВЫХ}}$ , мА	$i_{\text{ВХ}}$ , мкА	$i_{\text{ВЫХ}}$ , мА	$i_{\text{ВХ}}$ , мкА	$i_{\text{ВЫХ}}$ , мА

1.4. По полученным данным рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ , коэффициент усиления по току  $K_I$ , коэффициент усиления по мощности  $K_P$ . Расчетные значения занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты расчетов коэффициентов усиления

Однотактный трансформаторный		Двухтактный трансформаторный		Двухтактный бестрансформаторный	
$K_U$		$K_U$		$K_U$	
$K_I$		$K_I$		$K_I$	
$K_P$		$K_P$		$K_P$	

1.5. Получить АЧХ усилителя мощности, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **AC Analysis** (Частотный анализ), **Run** (Запустить) (см. приложение):

– на верхнем графике показана зависимость  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  от частоты  $f$ ;

– на нижнем графике показана зависимость  $K_{U\text{дб}} = 20 \lg K_U$  от частоты  $f$ ;

1.6. По графикам рассчитать значения коэффициентов усиления по напряжению на нижней и верхней частотах ( $K_{U\text{н}} = K_{U\text{в}}$ ), коэффициент  $K_{U\text{дб}}$  усиления по напряжению, выраженный в децибелах, значения нижней  $f_{\text{н}}$  и верхней  $f_{\text{в}}$  граничных частот (если возможно), полосу пропускания усилителя  $\Delta f$ , выходную мощность  $P_{\text{вых н}} = P_{\text{вых в}}$  усилителя на  $f_{\text{н}}$  и  $f_{\text{в}}$  при  $R_{\text{н}} = 4$  кОм и занести в табл. 6.3. Перерисовать графики в тетрадь.

Таблица 6.3

Результаты расчетов параметров усилителя

Тип схемы усилителя мощности	Однотактный трансформаторный	Двухтактный трансформаторный	Двухтактный бестрансформаторный
$K_{U\text{н}} = K_{U\text{в}}$			
$K_{U\text{дб}}$			
$f_{\text{н}}$			
$f_{\text{в}}$			
$\Delta f$			
$P_{\text{вых н}} = P_{\text{вых в}}$			

1.7. Открыть файл «ЛАБ\_6\_2», на экране появится схема двухтактного трансформаторного усилителя мощности (рис. 6.4).

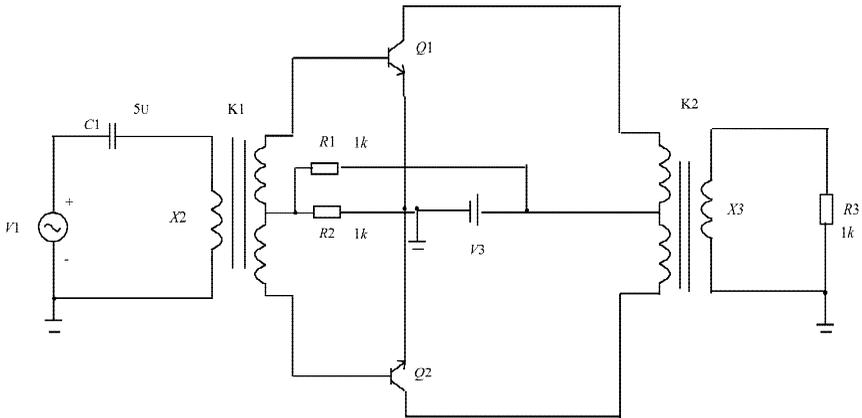


Рис. 6.4. Схема двухтактного трансформаторного усилителя мощности

1.8. Снять амплитудную характеристику усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  при частоте  $f = 1000$  Гц:

- изменять значения входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  от нуля до появления заметных искажений сигнала (примерно до 20 мВ) на источнике входного сигнала V1, измерить при этом значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где входное напряжение показано синим цветом, выходное напряжение показано красным цветом, входной ток – черным цветом, а выходной ток – зеленым цветом, напряжения на вторичных полуобмотках трансформатора (между узлами 2,3 и 3,4) – фиолетовым и оранжевым цветами;

- значения занести в табл. 6.1;

- измерить значения входного тока  $i_{\text{ВХ}}$  и выходного тока  $i_{\text{ВЫХ}}$  на линейном участке амплитудной характеристики (при  $U_{\text{ВХ}} = 10$  мВ), значения занести в табл. 6.1.

1.9. По полученным данным рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ , коэффициент усиления по току  $K_I$ , коэффициент усиления по мощности  $K_P$ . Расчетные значения занести в табл. 6.2.

1.10. Получить АЧХ усилителя мощности, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **AC Analysis** (Частотный анализ), **Run** (Запустить) (см. приложение):

- на верхнем графике показана зависимость  $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$  от частоты  $f$ ;

- на нижнем графике показана зависимость  $K_{U\text{дб}} = 20 \lg K_U$  от частоты  $f$ ;

1.11. По графикам рассчитать значения коэффициентов усиления по напряжению на нижней и верхней частотах  $K_{U\text{Н}} = K_{U\text{В}}$ , коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах  $K_{U\text{дб}}$ , значения нижней  $f_{\text{Н}}$  и верхней  $f_{\text{В}}$  граничных частот, полосу пропускания усилителя  $\Delta f$ , выходную мощность  $P_{\text{ВЫХ Н}} = P_{\text{ВЫХ В}}$  усилителя на  $f_{\text{Н}}$  и  $f_{\text{В}}$  при  $R_{\text{Н}} = 1 \text{ кОм}$  и занести в табл. 6.3. Перерисовать графики в тетрадь.

1.12. Открыть файл «ЛАБ\_6\_3», на экране появится схема двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности (рис. 6.5).

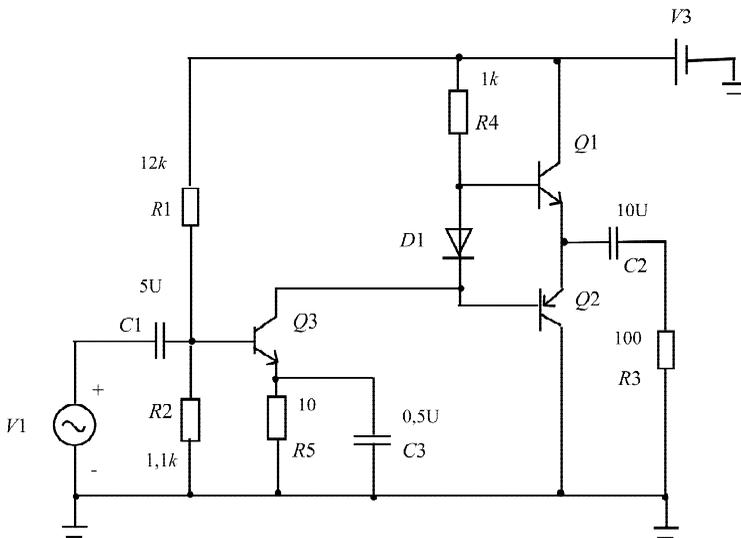


Рис. 6.5. Схема двухтактного бестрансформаторного усилителя мощности

1.13. Снять амплитудную характеристику усилителя  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  при частоте  $f = 1000 \text{ Гц}$ :

- изменять значения входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  от нуля до появления заметных искажений сигнала (примерно до 200 мВ) на источнике

входного сигнала VI, измерить при этом значения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение), где входное напряжение показано синим цветом, выходное напряжение показано красным цветом, входной ток – черным цветом, а выходной ток – зеленым цветом;

– значения занести в табл. 6.1;

– измерить значения входного тока  $i_{\text{вх}}$  и выходного тока  $i_{\text{вых}}$  на линейном участке амплитудной характеристики (при  $U_{\text{вх}} = 50$  мВ), значения занести в табл. 6.1.

1.14. По полученным данным рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_U$ , коэффициент усиления по току  $K_I$ , коэффициент усиления по мощности  $K_P$ . Расчетные значения занести в табл. 6.2.

1.15. Получить амплитудно-частотную характеристику усилителя мощности (АЧХ), воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **AC Analysis** (Частотный анализ), **Run** (Запустить) (см. приложение):

– на верхнем графике показана зависимость  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  от частоты  $f$ ;

– на нижнем графике показана зависимость  $K_{U_{\text{дб}}} = 20 \lg K_U$  от частоты  $f$ ;

1.16. По графикам рассчитать значения коэффициентов усиления по напряжению на нижней и верхней граничных частотах ( $K_{U_{\text{н}}} = K_{U_{\text{в}}}$ ), коэффициент усиления  $K_{U_{\text{ндб}}}$  по напряжению, выраженный в децибелах, значения нижней  $f_{\text{н}}$  и верхней  $f_{\text{в}}$  граничных частот, полосу пропускания усилителя  $\Delta f$ , выходную мощность  $P_{\text{вых н}} = P_{\text{вых в}}$  усилителя на  $f_{\text{н}}$  и  $f_{\text{в}}$  при  $R_{\text{н}} = 100$  Ом и занести в табл. 6.3. Перерисовать графики в тетрадь.

#### **По результатам измерений:**

1) построить амплитудные характеристики  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  всех типов усилителей;

2) привести амплитудно-частотные характеристики усилителей  $K_U = f(f)$ , определить параметры усилителя мощности, занести их в табл. 6.3.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.

3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Объясните назначение элементов схемы усилителя.
2. Укажите причины, ограничивающие линейный участок амплитудной характеристики.
3. Укажите причины, вызывающие появление частотных искажений сигнала на высших и низших частотах усилителя.
4. Перечислите основные параметры усилителя и расскажите о методах их определения.
5. Какими параметрами характеризуется режим усиления класса  $A$ ?
6. Какими параметрами характеризуется режим усиления класса  $AB$ ?
7. Какими параметрами характеризуется режим усиления класса  $B$ ?
8. Опишите принцип построения и принцип работы одноктактных усилителей мощности.
9. Опишите принцип построения и принцип работы двухтактных трансформаторных усилителей мощности.
10. Опишите принцип построения и принцип работы двухтактных бестрансформаторных усилителей мощности.
11. Перечислите преимущества и недостатки различных схем усилителей мощности.

**Лабораторная работа № 7**  
**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ**  
**МАЛОМОЩНЫХ БЛОКОВ ПИТАНИЯ**

**Цель работы:** изучить и исследовать следующие виды выпрямителей: однополупериодный с различными фильтрами; двухполупериодный мостовой с различными фильтрами.

**Лабораторное оборудование:**

1. Лабораторный стенд «Электроника» НТП «Центр».
2. ПЭВМ.

**Краткие теоретические сведения**

Выпрямители предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. В большинстве случаев выпрямитель состоит из следующих блоков:

1. Силового трансформатора, который служит для преобразования напряжения сети до нужного значения.
2. Вентиля (диода), который обладает односторонней проводимостью тока и выполняет основную функцию выпрямителя-преобразователя переменного тока в однополярный пульсирующий.
3. Сглаживающего фильтра, который уменьшает пульсации выпрямленного напряжения и тока.

В данной работе исследуются выпрямители, работающие от однофазной сети переменного тока.

На выходе этих схем для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения подключаются сглаживающие фильтры. Основными элементами сглаживающих фильтров являются конденсаторы, катушки индуктивности и транзисторы, сопротивления которых различны для постоянного и переменного токов. Для постоянного тока сопротивление конденсатора равно бесконечности, а сопротивление катушки индуктивности очень мало. Схемы фильтров представлены на рис. 7.5. Фильтр должен обеспечить снижение пульсации выпрямленного напряжения, то есть должен обладать коэффициентом сглаживания  $q$ , величина которого определяется отношением

$$q = p_1 / p_2, \quad (1)$$

где  $p_1, p_2$  – коэффициенты пульсации без фильтра и со сглаживающим фильтром соответственно.

Величина коэффициента пульсаций определяется по формуле

$$p = U_{\text{осн. max}} / U_0, \quad (2)$$

где  $U_{\text{осн. max}}$  – амплитуда основной гармонической составляющей выпрямленного напряжения, В;

$U_0$  – постоянная составляющая выпрямленного напряжения, В.

Схема однополупериодного выпрямителя представлена на рис. 7.1, а. В этой схеме ток через диод  $VD$  и сопротивление нагрузки  $R_n$  протекает только в течение половины периода переменного напряжения  $U_2$ , действующего на зажимах вторичной обмотки трансформатора.

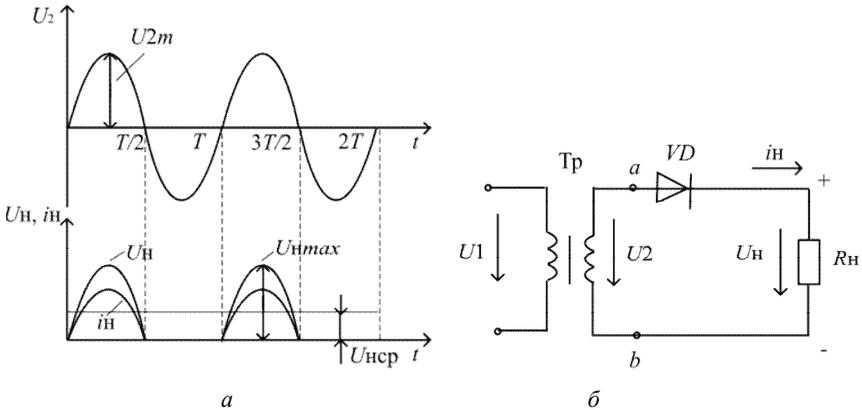


Рис. 7.1. Однополупериодный выпрямитель:

а – схема однополупериодного выпрямителя; б – временные диаграммы

Как видно из рис. 7.1, б, ток имеет пульсирующий характер, то есть протекает в одном направлении и изменяется по величине от максимального значения  $I_{\text{max}}$  до нуля. Постоянная составляющая

выпрямленного тока представляет собой среднее значение тока, протекающего за период через сопротивление нагрузки  $R_n$ .

Схема двухполупериодного выпрямления представлена на рис. 7.2, а. Эта схема выпрямления с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора. Данная схема представляет собой сочетание двух однополупериодных выпрямителей, работающих на общую нагрузку  $R_n$ . Напряжения, подводимые к каждому диоду  $VD1$  и  $VD2$  равны по величине, но противоположны по фазе.

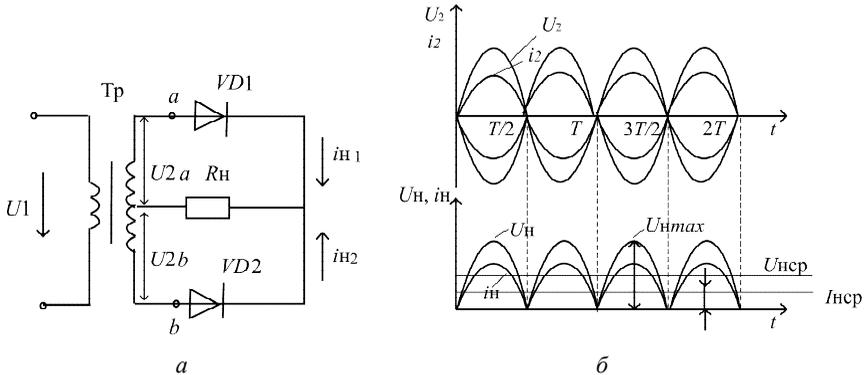


Рис. 7.2. Двухполупериодный выпрямитель:

а – схема двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора; б – временные диаграммы

В один из полупериодов, когда вывод обмотки **2a** положителен по отношению к среднему выводу «0», к диоду  $VD1$  приложено прямое напряжение, а к  $VD2$  – обратное и ток проходит от вывода **a** через диод  $VD1$ , сопротивление  $R_n$  нагрузки и замыкается через вторичную обмотку. В следующий полупериод, когда вывод **2b** положителен по отношению к точке «0», к диоду  $VD_2$  приложено прямое напряжение, а к  $VD1$  – обратное и ток проходит от вывода **b** через диод  $VD2$ , сопротивление  $R_n$  нагрузки и замыкается через вторичную обмотку. Через сопротивление  $R_n$  нагрузки токи проходят в одном направлении, создавая при этом на нем выпрямленное напряжение  $U_n$ .

Мостовая схема выпрямлений представлена на рис. 7.3, а. Схема включает в себя трансформатор  $T$  и диоды  $VD1$ – $VD4$ , включенные по схеме моста, одна диагональ которого подключена к вторичной обмотке трансформатора, в другую диагональ включается нагрузка  $R_n$ .

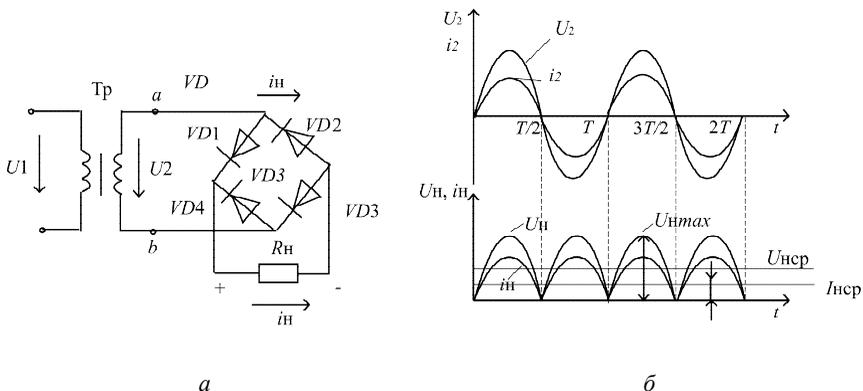


Рис. 7.3. Двухполупериодный мостовой выпрямитель:  
 а – схема двухполупериодного мостового выпрямителя;  
 б – временные диаграммы

В положительный полупериод, когда потенциал точки **a** положителен, а потенциал точки **b** отрицателен, ток проходит от точки **a** через диод *VD1*, сопротивление нагрузки  $R_n$ , диод *VD3* к точке **b** вторичной обмотки трансформатора. В следующий полупериод, когда полярность в точках **a** и **b** вторичной обмотки трансформатора поменяется, ток пойдет от точки **b** через диод *VD4*, сопротивление нагрузки  $R_n$ , диод *VD2*, к точке **a**. Направление тока, проходящего через нагрузочное сопротивление  $R_n$ , в течение обоих полупериодов остается неизменным. Поэтому, как и в схеме со средней точкой, в этой схеме имеет место двухполупериодное выпрямление; графики токов и напряжений аналогичны рис. 7.2, б.

Схема выпрямления с удвоением напряжения представлена на рис. 7.4. В течение положительного полупериода, когда потенциал точки **a** вторичной обмотки трансформатора положителен относительно точки **b**. Конденсатор *C1* заряжается через диод *VD2* до напряжения, равного амплитуде напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Во 2-й полупериод, когда потенциал точки **a** отрицателен, а точки **b** положителен, заряжается конденсатор *C2* через диод *VD1*. Вторичная обмотка трансформатора оказывается соединенной таким образом, что напряжения на ее зажимах складываются. Под воздействием этого суммарного напряжения конденсатор *C2* заряжается почти до удвоенного значения амплитудного

напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора. В процессе заряда  $C2$  происходит разряд конденсатора  $C1$ .

При этом напряжение на сопротивлении нагрузки изменяется с частотой напряжения сети.

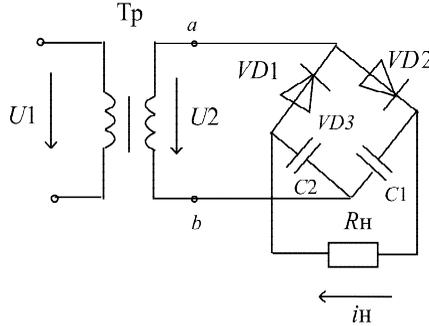


Рис. 7.4. Выпрямитель с удвоением напряжения

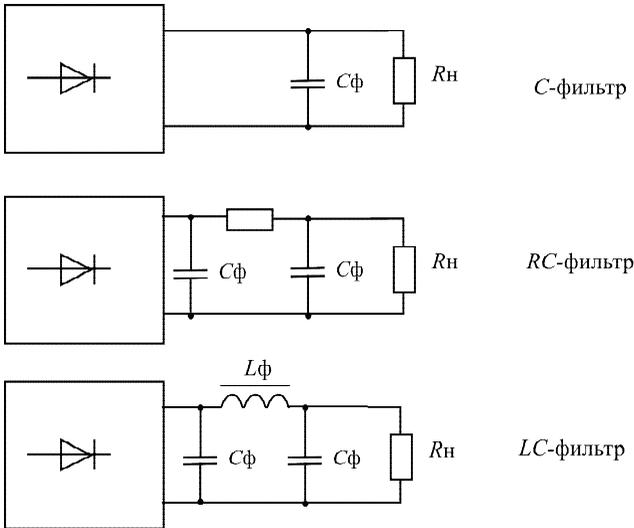


Рис. 7.5. Схемы сглаживающих фильтров

### Подготовка к работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.

3. Изучить схемы и их основные параметры.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### Методика выполнения работы на лабораторном стенде НТЦ-02.05 «Электроника»

#### Порядок выполнения работы:

Убедиться в том, что:

- на панели стенда отсутствуют перемычки;
- автоматический выключатель  $QF1$  выключен;
- регуляторы напряжения питания  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  установлены в положение «0», ручки резисторов  $R44$ ,  $R45$ ,  $R47$  установлены в положение min.

Перевести тумблер выбора режима измерения  $SA1$  приборов  $PV2$ ,  $PA2$  в положение AC.

#### Исследование однофазной однополупериодной схемы выпрямителя без фильтра

1. Собрать схему согласно рис. 7.6 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).
2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .

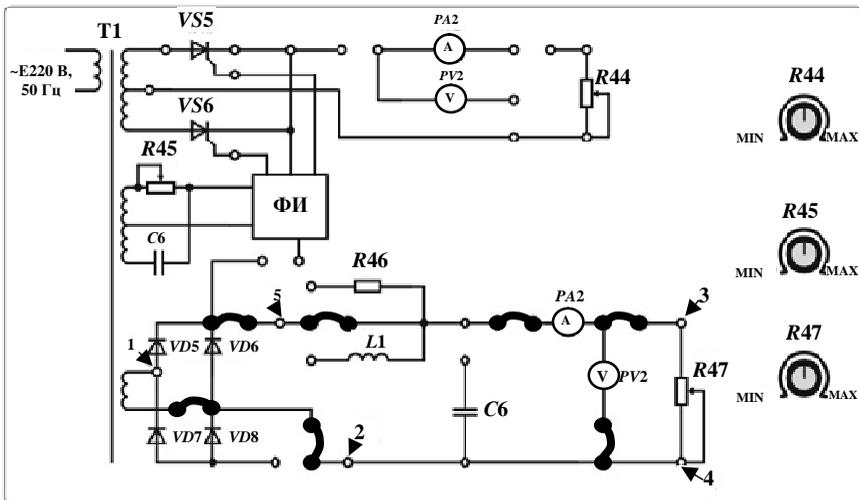


Рис. 7.6. Схема исследования однофазного однополупериодного выпрямителя без фильтров

3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение  $\min$ .

4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:

- входного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **1** и **2**);

- выпрямленного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **3** и **4**).

5. На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. max}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.1.

6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ . Для этого ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения  $\min$  до положения  $\max$  (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Данные опыта для исследования внешней характеристики  $U_n = f(I_n)$  однополупериодного выпрямителя

Схема без фильтра		Схема с $C$ -фильтром		Схема с $RC$ -фильтром		Схема с $LC$ -фильтром	
$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$	$I_n$	$U_n$
$U_{\text{осн. max}}$		$U_{\text{осн. max}}$		$U_{\text{осн. max}}$		$U_{\text{осн. max}}$	

7. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

## Исследование однофазного однополупериодного выпрямителя с C-фильтром

1. Собрать схему согласно рис. 7.7 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).

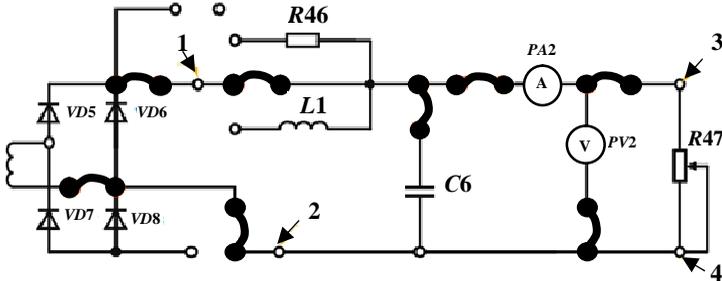


Рис. 7.7. Схема исследования однофазного однополупериодного выпрямителя с C-фильтром

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .  
3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение min.  
4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:

- входного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **1** и **2**);
- выпрямленного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **3** и **4**).

5. На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. max}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.1.

6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ . Для этого ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения min до положения max (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.1.

7. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

## Исследование однофазного однополупериодного выпрямителя с RC-фильтром

1. Собрать схему согласно рис. 7.8 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).

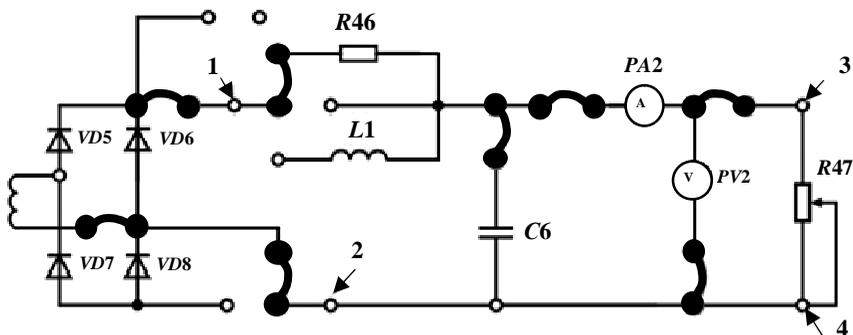


Рис. 7.8. Схема исследования однофазного однополупериодного выпрямителя с RC-фильтром

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение  $\min$ .
4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:
  - входного напряжения (подключить выходы осциллографа между точками 1 и 2);
  - выпрямленного напряжения (подключить выходы осциллографа между точками 3 и 4).

На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. max}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.1.

5. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ . Для этого ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения  $\min$  до положения  $\max$  (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.1.

6. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

### Исследование однофазного однополупериодного выпрямителя с LC-фильтром

1. Собрать схему согласно рис. 7.9 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).
2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение  $\min$ .

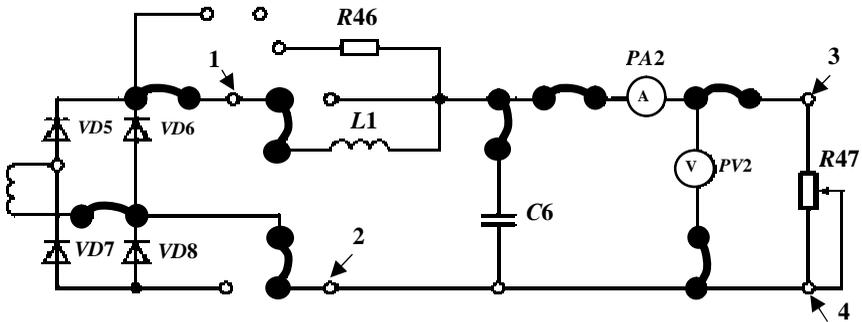


Рис. 7.9. Схема исследования однофазного однополупериодного выпрямителя с LC-фильтром

4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:

- входного напряжения (подключить выходы осциллографа между точками **1** и **2**);
- выпрямленного напряжения (подключить выходы осциллографа между точками **3** и **4**).

На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. max}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.1.

5. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ . Для этого ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения min до положения max (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.1.

6. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

**По результатам измерений:**

1) построить в одном графическом поле внешние характеристики  $U_n = f(I_n)$  выпрямителя в различных режимах фильтрации;

2) определить коэффициенты пульсаций выпрямленного напряжения  $p$  для всех режимов работы выпрямления по формуле  $p = U_{\text{осн. max}} / U_n$ ;

3) определить коэффициент сглаживания  $q$  C-фильтра, RC-фильтра, LC-фильтра по формуле  $q = p_1 / p_2$ , где  $p_1$  – коэффициент пульсаций схемы без фильтра,  $p_2$  – коэффициент пульсаций схемы с соответствующим фильтром.



Данные опыта для исследования внешней характеристики  $U_H = f(I_H)$   
мостового выпрямителя

Схема без фильтра		Схема с $C$ -фильтром		Схема с $RC$ -фильтром		Схема с $LC$ -фильтром	
$I_H$	$U_H$	$I_H$	$U_H$	$I_H$	$U_H$	$I_H$	$U_H$
$U_{\text{осн. max}}$		$U_{\text{осн. max}}$		$U_{\text{осн. max}}$		$U_{\text{осн. max}}$	

4. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

### Исследование однофазного однополупериодного выпрямителя с $C$ -фильтром

1. Собрать схему согласно рис. 7.11 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).

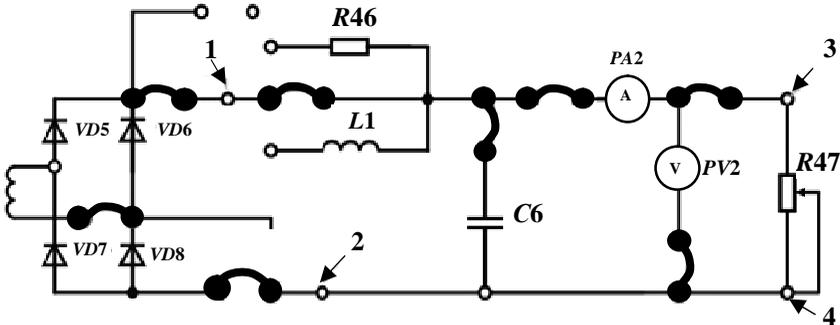


Рис. 7.11. Схема исследования однофазного мостового выпрямителя с  $C$ -фильтром

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение min.

4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:

- входного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **1** и **2**);
- выпрямленного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **3** и **4**).

5. На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. макс}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.2.

6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ . Для этого, ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения min до положения max (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.2.

7. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

### Исследование однофазного мостового выпрямителя с RC-фильтром

1. Собрать схему согласно рис. 7.12 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).

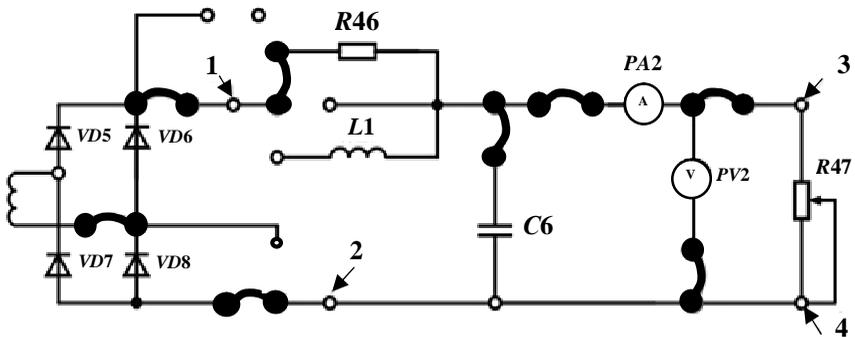


Рис. 7.12. Схема исследования однофазного мостового выпрямителя с RC-фильтром

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение min.

4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:

- входного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **1** и **2**);
- выпрямленного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **3** и **4**).

5. На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. max}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.2.

6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ . Для этого ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения min до положения max (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.2.

7. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

### Исследование однофазного мостового выпрямителя с LC-фильтром

1. Собрать схему согласно рис. 7.13 (блок 5 на лицевой панели лабораторного стенда).

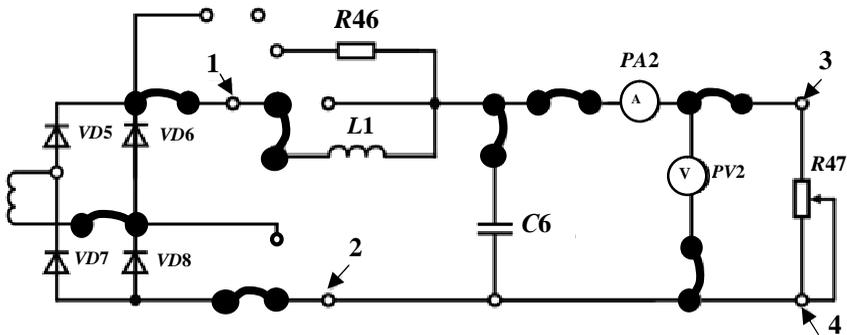


Рис. 7.13. Схема исследования однофазного мостового выпрямителя с LC-фильтром

2. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
3. Ручку потенциометра  $R47$ , задающего сопротивление нагрузки, установить в положение min.

4. С помощью осциллографа получить и зарисовать осциллограммы:

– входного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **1** и **2**);

– выпрямленного напряжения (подключить выводы осциллографа между точками **3** и **4**).

5. На выходной осциллограмме, по осциллографу, измерить амплитудное значение переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн. max}}$ . Занести измеренное значение в табл. 7.2.

6. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$ . Для этого ручкой резистора  $R47$  изменять сопротивление нагрузки от положения  $\text{min}$  до положения  $\text{max}$  (5 точек), регистрировать показания тока (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 7.2.

7. Выключить автоматический выключатель  $QF1$ .

**По результатам измерений:**

1) построить в одном графическом поле внешние характеристики  $U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$  выпрямителя в различных режимах фильтрации;

2) определить коэффициенты пульсаций выпрямленного напряжения  $p$  для всех режимов работы выпрямления по формуле  $p = U_{\text{осн. max}} / U_{\text{н}}$ ;

3) определить коэффициент сглаживания  $q$   $C$ -фильтра,  $RC$ -фильтра,  $LC$ -фильтра по формуле  $q = p_1 / p_2$ , где  $p_1$  – коэффициент пульсаций схемы без фильтра,  $p_2$  – коэффициент пульсаций схемы с соответствующим фильтром.

### Выполнение работы на компьютере

1. Исследовать однополупериодную и двухполупериодную схемы выпрямления, влияние  $C$ -фильтра,  $LC$ -фильтра и  $RC$ -фильтра на характеристики и параметры выпрямителей. Получить временные диаграммы тока и напряжения на компьютере с использованием программы *MICROCAP*.

Напряжение источника входного сигнала – 220 В, частота 50 Гц, сопротивление нагрузки  $R1$ .

2. Запустить программу *MICROCAP*.

3. Исследовать однополупериодную схему выпрямления.

4. Открыть файл «ЛАБ\_7\_1», на экране появится однополупериодная схема выпрямления без сглаживающего фильтра.

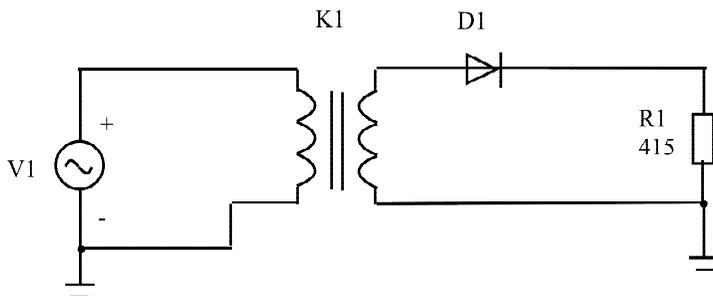


Рис. 7.14. Схема однополупериодного выпрямителя

5. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ :

– изменять сопротивление нагрузки в соответствии со значениями, представленными в табл. 7.3, таким образом изменяя ток нагрузки;

– получить временные диаграммы тока и напряжения, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение):

– на первом верхнем графике показана временная диаграмма напряжения источника входного сигнала;

– на втором графике показана временная диаграмма напряжения вторичной обмотки трансформатора;

– на третьем графике показана временная диаграмма напряжения на нагрузке и среднее значение этого напряжения;

– на четвертом нижнем графике показана временная диаграмма тока нагрузки и среднее значение этого тока;

– измерить среднее значение выпрямленного напряжения  $U_n$  и среднее значение выпрямленного тока  $I_n$ . Полученные данные занести в табл. 7.3;

– по графикам рассчитать коэффициент пульсаций  $p$  и коэффициент сглаживания  $q$  (для схем с фильтрами). Занести полученные данные в табл. 7.4. Для определения  $p$  по второй временной диаграмме определить амплитуду переменной составляющей напряжения  $U_{n, \max}$ . Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь.

Таблица 7.3

Данные опыта для исследования внешней характеристики  $U_n = f(I_n)$  однополупериодного выпрямителя

Однополупериодный выпрямитель					
Режим работы		Без фильтра	Фильтр $C$	Фильтр $LC$	Фильтр $RC$
$R_n$ , Ом	$I_n$ , мА	$U_n$ , В	$U_n$ , В	$U_n$ , В	$U_n$ , В
70					
100					
150					
200					
300					
500					
700					

6. Открыть файл «ЛАБ\_7\_1С», на экране появится однополупериодная схема выпрямления с  $C$ -фильтром (рис. 7.15).

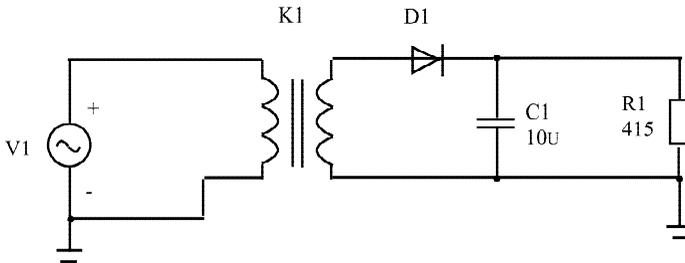


Рис. 7.15. Схема однополупериодного выпрямителя с  $C$ -фильтром

7. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_n = f(I_n)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.3. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

8. Открыть файл «ЛАБ\_7\_1LC», на экране появится однополупериодная схема выпрямления с  $LC$ -фильтром (рис. 7.16).

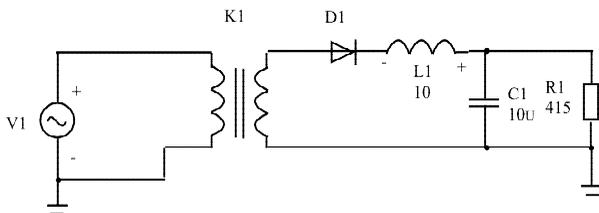


Рис. 7.16. Схема однополупериодного выпрямителя с LC-фильтром

9. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_H = f(I_H)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.3. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

10. Открыть файл «ЛАБ\_7\_1RC», на экране появится однополупериодная схема выпрямления с RC-фильтром (рис. 7.17).

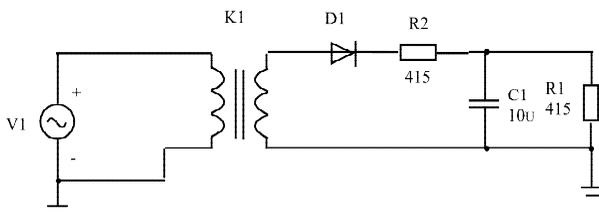


Рис. 7.17. Схема однополупериодного выпрямителя с RC-фильтром

11. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_H = f(I_H)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.3. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

Таблица 7.4

Результаты расчетов коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$

Тип схемы	Схема без фильтра		Схема с C-фильтром		Схема с LC-фильтром		Схема с RC-фильтром	
	Одно- полу- период.	Двух- полу- период.	Одно- полу- период.	Двух- полу- период.	Одно- полу- период.	Двух- полу- период.	Одно- полу- период.	Двух- полу- период.
$p$								
$q$								

12. Исследовать двухполупериодную мостовую схему выпрямления.

13. Открыть файл «ЛАБ\_7\_2», на экране появится двухполупериодная мостовая схема выпрямления без сглаживающего фильтра (рис. 7.18).

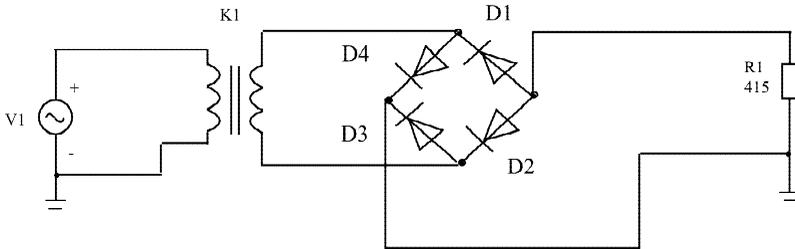


Рис. 7.18. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя без фильтра

14. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_n = f(I_n)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.5. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

15. Открыть файл «ЛАБ\_7\_2С», на экране появится двухполупериодная мостовая схема выпрямления с С-фильтром (рис. 7.19).

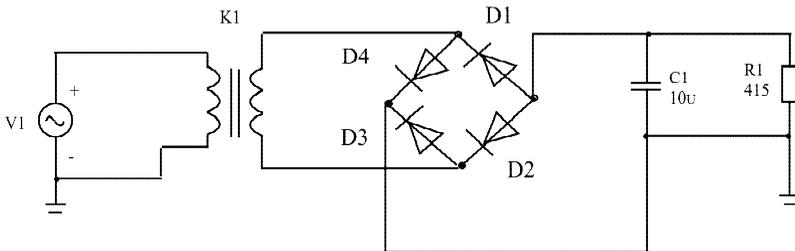


Рис. 7.19. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя с С-фильтром

16. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_n = f(I_n)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.5. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента

сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

17. Открыть файл «ЛИАБ\_7\_2LC», на экране появится двухполупериодная мостовая схема выпрямления с LC-фильтром (рис. 7.20).

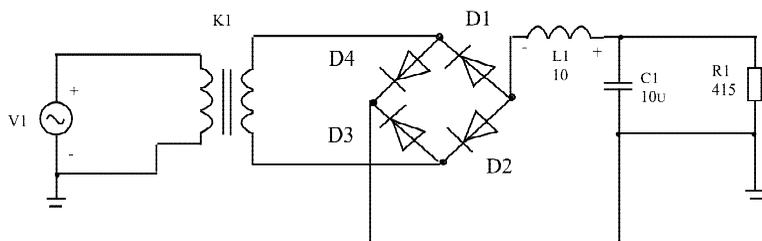


Рис. 7.20. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя с LC-фильтром

18. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_H = f(I_H)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.5. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

19. Открыть файл «ЛИАБ\_7\_2RC», на экране появится двухполупериодная мостовая схема выпрямления с RC-фильтром (рис. 7.21).

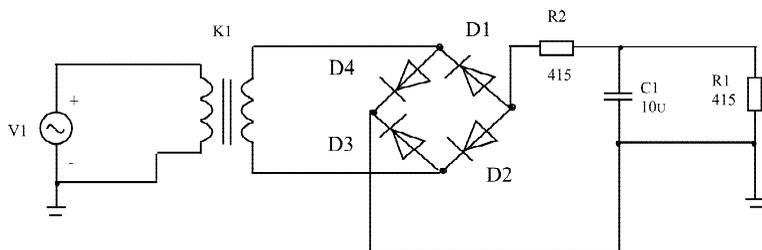


Рис. 7.21. Схема двухполупериодного мостового выпрямителя с RC-фильтром

20. Снять и построить внешние характеристики выпрямителя  $U_H = f(I_H)$  аналогично п. 5. Полученные данные занести в табл. 7.5. Рассчитанные параметры коэффициента пульсаций  $p$  и коэффициента сглаживания  $q$  занести в табл. 7.4. Перерисовать 2-й и 3-й графики в тетрадь на соответствующие координатные поля.

Результаты исследования внешних характеристик выпрямителей

Режим работы		Двухполупериодный мостовой выпрямитель			
		Без фильтра	Фильтр $C$	Фильтр $LC$	Фильтр $RC$
$R_n$ , Ом	$I_n$ , мА	$U_n$ , В	$U_n$ , В	$U_n$ , В	$U_n$ , В
70					
100					
150					
200					
300					
500					
700					

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Графики зависимостей, указанные в работе.
6. Временные диаграммы.
7. Основные формулы, используемые при расчетах.
8. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы и задания

1. Вычертить схему любого выпрямителя с применением параллельного включения диодов.
2. Начертить схему и объяснить работу двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки.
3. Начертить схему и объяснить работу двухполупериодного мостового выпрямителя.
4. Написать формулы для определения коэффициентов пульсаций и коэффициента сглаживания.

5. В каких случаях применяется параллельное и последовательное включение диодов в схемах выпрямителей? Привести схемы.
6. Чем отличаются внешние характеристики для схем выпрямления без фильтра и с различными фильтрами?
7. Вычертить и объяснить временные диаграммы для различных схем выпрямления без фильтров и с фильтрами.
8. Вычертить схемы различных фильтров выпрямителей.
9. Каковы основные характеристики выпрямителей?
10. Какие опыты и замеры нужно произвести для определения коэффициента сглаживания и коэффициента пульсации?
11. По каким параметрам выбираются вентили в различных схемах выпрямления? Как они связаны с напряжением питания и параметрами нагрузки?

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия управляемого однофазного двухполупериодного выпрямителя на тиристоре; исследовать экспериментально его характеристики.

#### Лабораторное оборудование:

1. ПЭВМ.
2. Стенд НТЦ-05.

#### Краткие теоретические сведения

Часто в электротехнических устройствах требуется регулировать величину выпрямленного напряжения или тока. Такое регулирование можно осуществить с помощью реостата или потенциометра в цепи выпрямленного тока или автотрансформатора в цепи переменного тока (рис. 8.1).

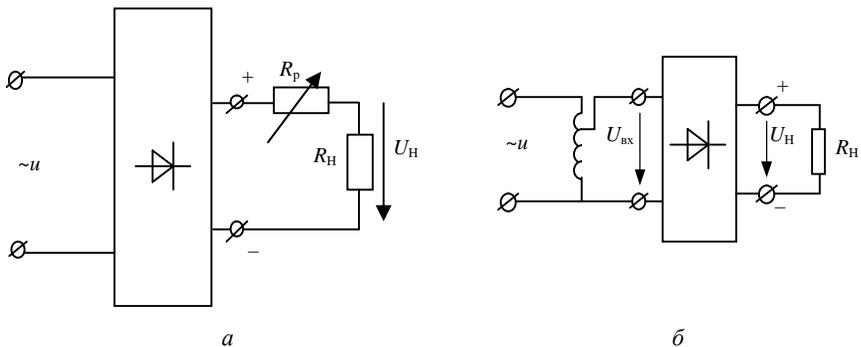


Рис. 8.1. Регулировка величины выпрямленного напряжения:  
а – с помощью реостата в цепи выпрямленного тока;  
б – автотрансформатора в цепи переменного тока

Указанные способы управления выпрямленным напряжением (током) просты, но имеют ряд существенных недостатков: низкий КПД, вследствие значительного потребления энергии регулирующими элементами, громоздкость и высокую стоимость регуляторов.

Наиболее экономичным и удобным, а потому и самым распространенным в настоящее время является управляемый выпрямитель на тиристорах. Управление напряжением на выходе такой схемы сводится к управлению во времени моментом отпирания тиристора. Этот процесс осуществляется за счет сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора. Такой сдвиг называют углом управления и обозначают  $\alpha$ , а способ управления называют фазовым. Для управления тиристорами на их управляющий электрод обычно подаются короткие импульсы тока  $I_y$ , которые вырабатываются блоком управления. Блок управления (БУ) позволяет также смещать управляющие импульсы по времени.

Схема двухполупериодного управляемого выпрямителя на тиристорах приведена на рис. 8.2.

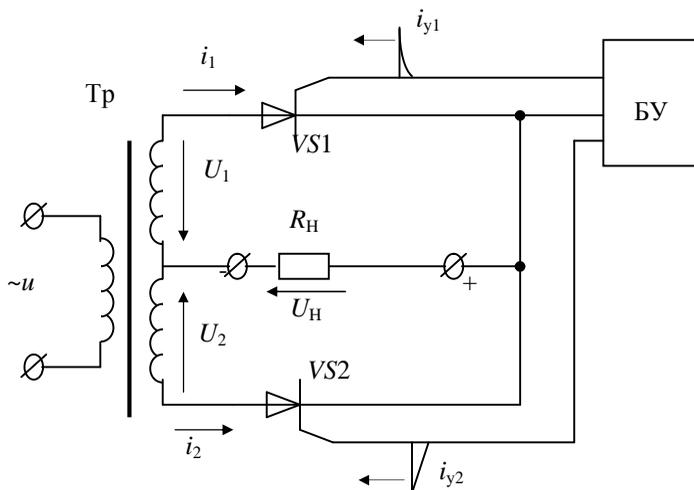


Рис. 8.2. Схема двухполупериодного управляемого выпрямителя на тиристорах

Нагрузка  $R_n$  включена между катодами тиристоров и средней точкой трансформатора, имеющего вторичную обмотку с выводом от средней точки. Напряжения в каждой из полуобмоток  $U_1$ ,  $U_2$  сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $180^\circ$ . Когда анод первого тиристора положителен, анод второго – отрицателен. Амплитуды напряжений  $U_{1\max}$  и  $U_{2\max}$  выбирают меньше напряжения

включения тиристора  $U_{\text{вкл}}$  при  $I_y = 0$ . Следовательно, при отсутствии управляющих импульсов тиристоры закрыты и ток в нагрузке отсутствует. Если управляющие импульсы поступают на управляющий электрод соответствующего тиристора в начале каждого положительного полупериода, то тиристоры открываются в начале этого полупериода и включены весь полупериод. Формы тока нагрузки  $i_n$  и напряжения на ней  $u_n$ , будут такие же, как и при работе в данной схеме обычных полупроводниковых диодов. Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{\text{н.0}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{\text{н. max}} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{\pi} U_{\text{н. max}}.$$

С помощью БУ импульсы тока управления можно смещать по фазе относительно  $u_1$ ,  $u_2$  на угол управления  $\alpha$ . Тогда тиристоры будут открываться с запаздыванием и пропускать ток только часть полупериода от  $\alpha$  до  $\pi$ .

Среднее значение напряжения на нагрузке в этом случае:

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\text{н. max}} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{1}{\pi} U_{\text{н. max}} (1 + \cos \alpha) = U_{\text{н.0}} \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \quad (1)$$

Среднее значение тока:

$$I_{\text{н.ср}} = \frac{U_{\text{н.0}}}{R_{\text{н}}} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} = I_{\text{н.0}} \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, изменяя угол управления  $\alpha$  от 0 до  $\pi$  можно регулировать  $U_{\text{н.ср}}$  (или  $I_{\text{н.ср}}$ ) от максимального значения, равного  $\frac{2}{\pi} U_{\text{н. max}}$ , до нуля.

Возможности управляемого выпрямителя определяют его две основные характеристики:

1. Характеристика управления, то есть зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от угла управления  $U_{\text{н.ср}} = f(\alpha)$  при  $R_{\text{н}} = \text{const}$ .

2. Внешняя характеристика, отражающая зависимость значения выпрямленного напряжения от среднего значения тока нагрузки  $U_{н. ср} = f(I_{н. ср})$  при  $\alpha = \text{const}$ .

### **Подготовка к работе**

1. Познакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить теоретический материал по теме работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### **Методика выполнения работы на лабораторном стенде НТЦ-02.05 «Электроника»**

#### **Порядок подготовки к работе:**

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Убедиться в том, что:
  - на панели стенда отсутствуют переключки;
  - автоматический выключатель  $QF1$  выключен;
  - регуляторы напряжения питания  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  установлены в положение «0»;
  - ручки резисторов  $R44$ ,  $R45$ ,  $R47$  установлены в положение  $\text{min}$ .
3. Перевести тумблер выбора режима измерения  $SA1$  приборов  $PV2$ ,  $PA2$  в положение  $AC$  (вниз).

#### **Исследование схемы управляемого тиристорного выпрямителя**

4. Собрать схему согласно рис. 8.3 (блок 5 на лицевой панели лабораторной установки).
5. Включить автоматический выключатель  $QF1$ .
6. Ручку потенциометра  $R45$ , задающего угол управления  $\alpha$ , перевести в положение  $\text{min}$  ( $\alpha = 0^\circ$ ).
7. С помощью осциллографа понаблюдать и зарисовать осциллограммы:
  - входного напряжения (между точками 5 и 6);
  - выпрямленного напряжения (между точками 7 и 8).

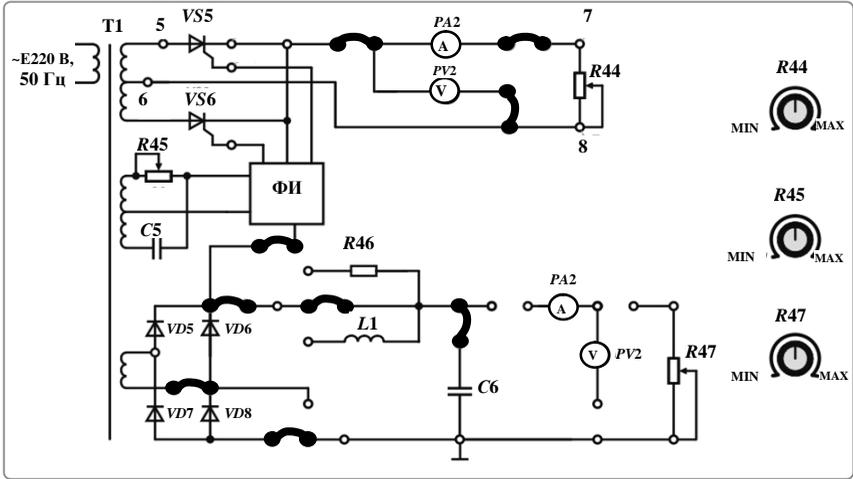


Рис. 8.3. Схема исследования характеристик управляемого выпрямителя

8. С помощью потенциометра  $R45$  установить угол управления  $\alpha = 0^\circ$ .

9. Снять внешнюю характеристику выпрямителя  $U_H = f(I_H)$ . Для этого плавно изменять сопротивление нагрузки  $R44$ , регистрировать показания тока  $I_H$  (смотреть по прибору  $PA2$ ) и выпрямленного напряжения  $U_H$  (смотреть по прибору  $PV2$ ) в табл. 8.1. Для построения характеристики необходимо снять 5 точек.

Таблица 8.1

Данные для исследования внешней характеристики управляемого выпрямителя  $U_H = f(I_H)$

Угол управления $\alpha$	$I_H$ , мА ( $PA2$ )	$U_H$ , В ( $PV2$ )
$0^\circ$		
$60^\circ$		

Угол управления $\alpha$	$I_n$ , мА (РА2)	$U_n$ , В (PV2)
120°		

10. Повторить п. 9 для углов управления 60° и 120°.

11. Снять регулировочную характеристику выпрямителя  $U_n = f(\alpha)$ . Для этого, изменяя угол управления потенциометром R45 (его величины указаны в табл. 8.2), регистрировать напряжение на выходе выпрямителя (PV2). Данные заносить в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты исследования регулировочной характеристики управляемого выпрямителя

$\alpha$	$U_n$ , В (PV2)
0°	
60°	
90°	
120°	

**По результатам измерений:**

- 1) построить внешнюю характеристику выпрямителя  $U_n = f(I_n)$ ;
- 2) построить регулировочную характеристику выпрямителя  $U_n = f(\alpha)$ .

**Методика выполнения работы на компьютере**

1. Запустить программу MICROCAP.
2. Открыть файл «ЛАБ\_8», на экране появится схема управляемого выпрямителя (рис. 8.4). Принципиальная электрическая схема исследуемого на компьютере двухполупериодного выпрямителя (рис. 8.4) включает в себя:
  - мостовую двухполупериодную схему (VD1–VD4), в диагональ которой включен тиристор VS1;

- блок формирования импульсов, которые подаются на управляющий электрод тиристора, в который входят:  $R_f$ ,  $C_f$  – фазовращающая цепь, сопротивления  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , диод Шоттки  $VD_5$ , тиристор  $VS_2$ ;
- источник переменного напряжения  $V_1$  (сигнал подается через сопротивление  $R_1$ );
- активную  $R_n$  или активно-индуктивную  $R_n-L_1$  нагрузку.

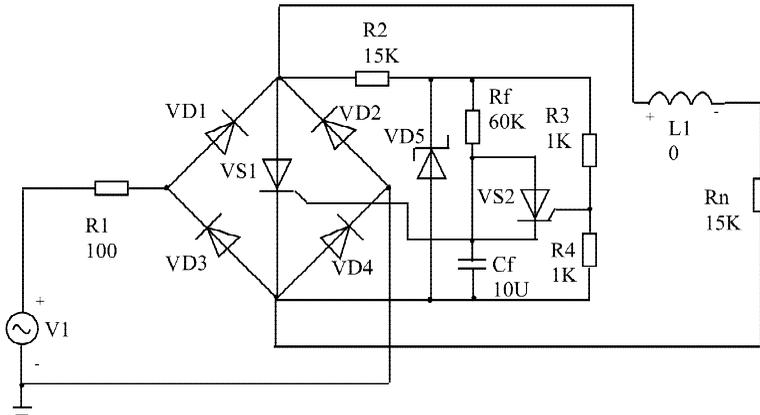


Рис. 8.4. Принципиальная схема управляемого однофазного двухполупериодного выпрямителя на тиристоре

На принципиальной электрической схеме показаны узлы, в которых можно просмотреть величину сигнала.

Элементы схемы имеют следующие параметры:  $R_1 = 100$  Ом,  $R_3 = R_4 = 1$  кОм,  $C_f = 10$  мкФ,  $R_2 = 15$  кОм,  $R_n = 15$  кОм (меняет свое значение в соответствии с табл. 8.4),  $R_f = 60$  кОм (меняет свое значение в соответствии с табл. 8.3),  $L_1 = 0$ .

3. Снять **регулирующую характеристику** двухполупериодного выпрямителя  $U_{н. ср} = f(\alpha)$ :

- при активной нагрузке:
  - установить значение  $L_1 = 0$ ,  $R_n = 15$  кОм;
  - менять значение  $R_f$  в соответствии с табл. 8.3, где приведено соответствие значения  $R_f$  и угла управления  $\alpha$ ;
  - получить временные диаграммы напряжения входного сигнала (показан красным цветом), управляющего сигнала (показан синим цветом), сигнала на тиристоре (показан зеленым цветом), напряжения

на нагрузке (показан розовым цветом), тока на нагрузке (показан черным цветом), воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение);

– определить по временной диаграмме значение напряжения  $U_{н. \max}$  на нагрузке и тока  $I_{н. \max}$  на нагрузке;

– рассчитать по формулам (1) и (2) среднее значение напряжения на нагрузке  $U_{н. \text{cp}}$  и среднее значение тока на нагрузке  $I_{н. \text{cp}}$ ;

– результаты занести в табл. 8.3;

б) при активно-индуктивной нагрузке:

– установить значение  $L1 = 50$  Гн,  $R_n = 15$  кОм;

– менять значение  $R_f$  в соответствии с табл. 8.3, где приведено соответствие значения  $R_f$  и угла управления  $\alpha$ ;

– получить временные диаграммы напряжения входного сигнала (показан красным цветом), управляющего сигнала (показан синим цветом), сигнала на тиристоре (показан зеленым цветом), напряжения на нагрузке (показан розовым цветом), тока на нагрузке (показан черным цветом), воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение);

– определить по временной диаграмме значение напряжения  $U_{н. \max}$  на нагрузке и тока  $I_{н. \max}$  на нагрузке;

– рассчитать по формулам (1) и (2) среднее значение напряжения  $U_{н. \text{cp}}$  на нагрузке и среднее значение тока  $I_{н. \text{cp}}$  на нагрузке;

– результаты занести в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Результаты исследования регулировочной характеристики

$R_f$ , кОм		600	100	60	30	16	6
$\alpha$		0°	30°	60°	90°	120°	150°
$R_n$	$U_{н. \max}$						
	$I_{н. \max}$						
	$U_{н. \text{cp}}$						
	$I_{н. \text{cp}}$						
$R_n, L_1$	$U_{н. \max}$						
	$I_{н. \max}$						
	$U_{н. \text{cp}}$						
	$I_{н. \text{cp}}$						

4. Перерисовать в отчет все временные диаграммы для  $\alpha = 0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ .

5. Снять **внешние характеристики** двухполупериодного выпрямителя при активной нагрузке  $U_{н. ср} = f(I_{н. ср})$  для трех углов управления  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\alpha = 120^\circ$ , регулируя ток нагрузки, изменяя сопротивление нагрузки  $R_n$ :

- установить значение  $L_1 = 0$ ;  $R_n$  изменять в соответствии с табл. 8.4;
- для  $\alpha = 0^\circ$  установить  $R_f = 600$  кОм; для  $\alpha = 60^\circ$  установить  $R_f = 60$  кОм; для  $\alpha = 120^\circ$  установить  $R_f = 16$  кОм;
- получить временные диаграммы напряжения входного сигнала (показан красным цветом), управляющего сигнала (показан синим цветом), сигнала на тиристоре (показан зеленым цветом), напряжения на нагрузке (показан розовым цветом), тока на нагрузке (показан черным цветом), воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение);
- определить по временной диаграмме значение напряжения  $U_{н. max}$  на нагрузке и тока  $I_{н. max}$  на нагрузке;
- рассчитать по формулам (1), (2) среднее значение напряжения  $U_{н. ср}$  на нагрузке и среднее значение тока  $I_{н. ср}$  на нагрузке;
- результаты занести в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Результаты исследования внешних характеристик

$R_n$ , кОм		9	12	15	18	21
$\alpha = 0^\circ$	$U_{н. max}$					
	$I_{н. max}$					
	$U_{н. ср}$					
	$I_{н. ср}$					
$\alpha = 60^\circ$	$U_{н. max}$					
	$I_{н. max}$					
	$U_{н. ср}$					
	$I_{н. ср}$					
$\alpha = 120^\circ$	$U_{н. max}$					
	$I_{н. max}$					
	$U_{н. ср}$					
	$I_{н. ср}$					

## Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Временные диаграммы для трех углов управления.
5. Таблицы опытных и расчетных данных.
6. Графики зависимостей, указанные в работе.
7. Основные формулы, используемые при расчетах.
8. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Каковы возможные методы управления величиной выпрямленного напряжения и тока?
2. Опишите назначение и принцип работы управляемого выпрямителя.
3. Что такое угол управления тиристором?
4. Каковы основные характеристики управляемого выпрямителя и как они определяются?
5. Как меняется среднее значение выпрямленного напряжения при увеличении угла управления?
6. Где применяются управляемые выпрямители?
7. Чем отличаются временные диаграммы однофазных однополупериодного и двухполупериодного управляемого выпрямителей?

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРОВ

**Цель работы:** изучить принцип действия мультивибраторов, работающих в автоколебательном и ждущем режимах; исследовать схемы автоколебательных мультивибраторов, построенных на транзисторах и операционном усилителе (ОУ).

#### Лабораторное оборудование:

1. Измерительный стенд НТЦ-05 (НТЦ-05.100).
2. ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Мультивибраторы относятся к классу устройств импульсной техники, предназначенных для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения заданной формы с требуемыми параметрами (амплитудой, длительностью, частотой следования и др.). По режиму работы мультивибраторы делятся на автоколебательные, ждущие и бистабильные. Они могут быть построены на транзисторах, интегральных микросхемах и операционных усилителях.

Импульсный сигнал характеризуется рядом параметров, которые рассмотрим на примере реального импульса напряжения прямоугольной формы, имеющего характерные участки: передний фронт, вершина (плоская часть), срез (задний фронт) (рис. 9.1).

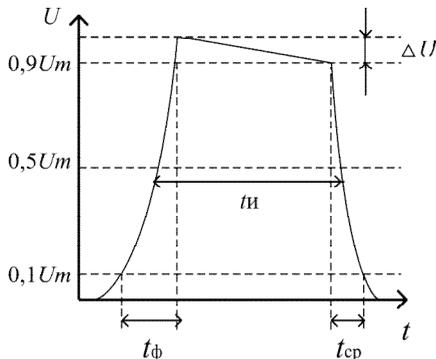


Рис. 9.1. Параметры импульсного сигнала

Параметры одиночного импульсного сигнала:

- 1) амплитуда импульса  $U_{\max}$ ;
- 2) длительность импульса  $t_{\text{и}}$  – измеряют на уровне  $0,5U_{\max}$ , иногда на уровне  $0,1U_{\max}$ , в зависимости от формы сигнала;
- 3) длительность фронта импульса  $t_{\text{ф}}$  – определяется временем нарастания импульса от  $0,1U_{\max}$  до  $0,9U_{\max}$ ;
- 4) длительность среза импульса – определяется временем убывания импульса от  $0,9U_{\max}$  до  $0,1U_{\max}$ ;
- 5) спад вершины импульса  $\Delta U$ .

Обычно используются последовательности импульсных сигналов (рис. 9.2), которые имеют дополнительные параметры.

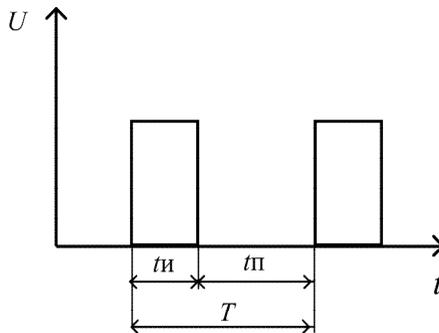


Рис. 9.2. Последовательность импульсных сигналов

Параметры последовательности импульсов:

- 1) период повторения  $T$ ;
- 2) частота повторения  $f = 1 / T$ ;
- 3) длительность паузы  $t_{\text{п}} = T - t_{\text{и}}$  – интервал времени между окончанием одного и началом другого импульса;
- 4) коэффициент заполнения  $\gamma$ , характеризуется отношением длительности импульса к периоду их следования  $\gamma = t_{\text{и}} / T$ ;
- 5) скважность  $q = T / t_{\text{и}} = 1 / \gamma$ .

Подобно генераторам синусоидальных колебаний, мультивибраторы работают в режиме самовозбуждения: для формирования импульсного сигнала в мультивибраторах не требуется внешнее воздействие, например, входных сигналов. Процесс получения импульсного напряжения основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения. Автоколебательные мультивибраторы могут

быть построены на транзисторах (рис. 9.3), на операционном усилителе (рис. 9.4) или на логических элементах (рис. 9.5).

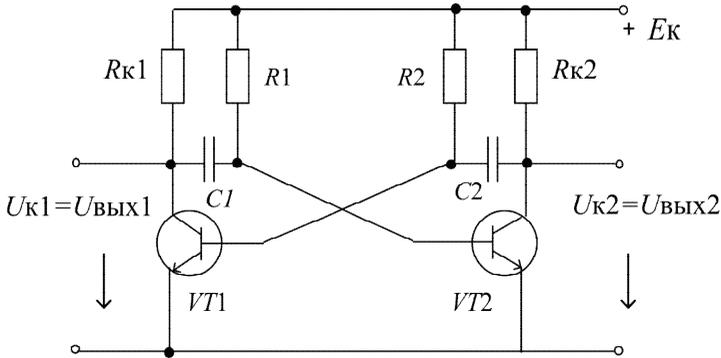


Рис. 9.3. Схема автоколебательного мультивибратора на транзисторах

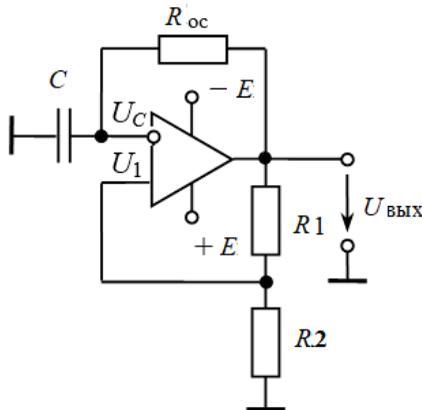


Рис. 9.4. Схема автоколебательного мультивибратора на ОУ

### Автоколебательный мультивибратор на транзисторах

В автоколебательном режиме (см. рис. 9.3) транзисторы поочередно переходят из открытого состояния в закрытое и обратно. При включении источника коллекторного питания  $+E_k$  один из транзисторов окажется открытым, а другой – закрытым. Если открыт, например,  $VT1$ , то конденсатор  $C1$ , зарядившийся во время установления процессов в схеме, начинает разряжаться по двум цепочкам:

через сопротивления  $R_{к1}$  и  $R1$  и коллектор – эмиттер  $VT1$  и эмиттер – база  $VT2$ .

Разрядный ток создает на  $R1$  падение напряжения, убывающее по мере уменьшения этого тока по экспоненте. И это напряжение приложено к базе транзистора  $VT2$  и поддерживает его в закрытом состоянии, то есть  $U_{бэ}$  транзистора  $VT2$  увеличивается по экспоненте.

В это же время конденсатор  $C2$  заряжается от источника  $E_{к}$  через участок эмиттер-база открытого транзистора  $VT1$  и  $R_{к2}$ . По мере заряда  $C2$  ток, протекающий по  $R_{к2}$ , уменьшается и потенциал коллектора  $VT2$  увеличивается по экспоненте. Через время, когда  $C2$  зарядится, потенциал коллектора станет примерно равен  $E_{к}$ . Так как  $R1 \gg R_{к2}$ , то процесс разряда  $C1$  проходит значительно медленнее, чем процесс заряда  $C2$ . Когда потенциал базы  $VT2$  приблизится к нулю, при полной разрядке  $C1$ , транзистор  $VT2$  приоткроется и начнет проводить ток. С этого момента, в результате действия положительной обратной связи, происходит лавинообразный процесс, в результате которого транзистор  $VT2$  открывается, а  $VT1$  закрывается, так как напряжение на  $C2$  приложено обратно к переходу база-эмиттер  $VT1$ . Далее все процессы повторяются, но уже относительно открытого транзистора  $VT2$ . Таким образом параметры элементов  $C1$ ,  $R1$ ,  $C2$ ,  $R2$  определяют длительность импульса соответственно на выходе 1 и выходе 2:

$$t_{и1} = 0,7C2R2;$$

$$t_{и2} = 0,7C1R1.$$

### **Автоколебательный мультивибратор на ОУ**

Мультивибратор на ОУ относится к самовозбуждающимся генераторам (рис. 9.4). ОУ работает в импульсном режиме (на нелинейном участке амплитудной характеристики). Он сравнивает два сигнала: по неинвертирующему входу  $U1$  и по инвертирующему входу  $U_c$  (напряжение конденсатора  $C1$ ). В результате перезарядки конденсатора выходное напряжение скачком изменяется от  $U_{вых\ max}$  до  $U_{вых\ min} = -U_{вых\ max}$ . При  $R3 = R4$  длительность импульса  $t_{и} \approx 1,1R2C1$ , а период импульса  $T = 2t_{и} \approx 2,2R2C1$ . Изменяя величины  $R2$  и  $C1$ , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

Рассмотренные мультивибраторы работают в автоколебательном режиме, то есть в условиях, когда нет устойчивого равновесия, а имеется только два состояния квазиравновесия, которые характеризуются сравнительно медленными изменениями токов и напряжений, приводящими к некоторому критическому состоянию, при котором происходит скачкообразный переход из одного состояния в другое.

### Автоколебательный мультивибратор на логических элементах

Такой мультивибратор работает следующим образом (рис. 9.5). Когда логический элемент Э1 И-НЕ закрыт, а логический элемент Э2 И-НЕ – открыт, то на выходе Э1 действует напряжение высокого уровня и конденсатор  $C_2$  заряжается, напряжение  $U_{\text{вх}2}$  – высокое и поддерживает Э2 в открытом состоянии, напряжение  $U_{\text{с}1} = 0$ , напряжение  $U_{\text{вх}1}$  – низкое.

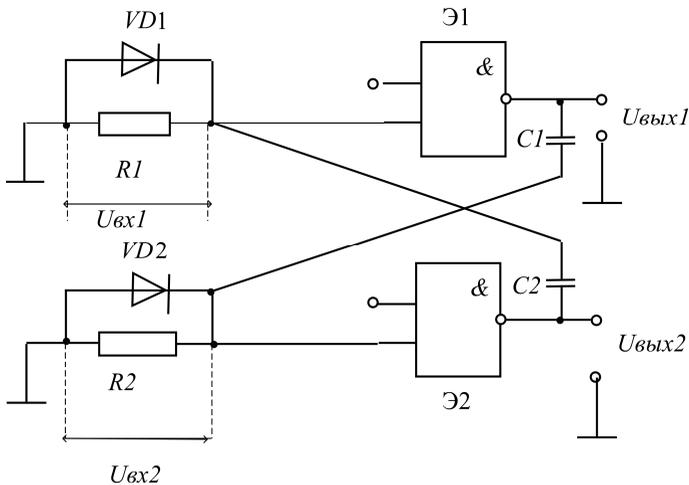


Рис. 9.5. Схема автоколебательного мультивибратора на ЛЭ

При достижении  $U_{\text{вх}2}$  некоторого предельного значения, элемент Э2 запирается,  $U_{\text{вых}2}$  через  $C_1$  передается на вход логического элемента Э1 и он открывается. В результате работы такого мультивибратора на выходе получаются импульсы прямоугольной формы из-за четкого отпираания логических элементов.

## Ждущий мультивибратор на транзисторах

В ждущем режиме имеется одно состояние устойчивого равновесия и одно состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход – самопроизвольно по истечении некоторого времени. Ждущие мультивибраторы называют еще одновибраторами.

Рассмотрим схему ждущего мультивибратора с эмиттерной связью (рис. 9.6).

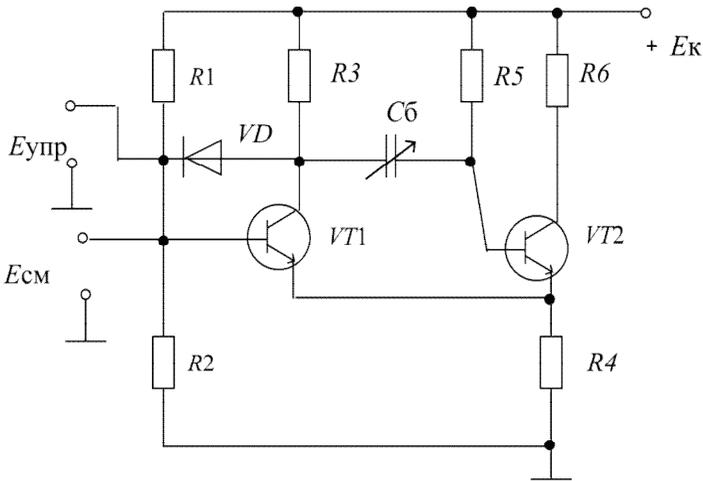


Рис. 9.6. Схема ждущего мультивибратора на транзисторах

В устойчивом состоянии схемы при отсутствии запускающих импульсов транзистор  $VT2$  открыт положительным смещением от источника питания  $+E_k$  через резистор  $R5$ . Протекающий через резистор ток вызывает падение напряжения на  $R4$ . Потенциал базы транзистора  $VT1$  устанавливается делителем  $R1, R2$ . Сопротивления  $R1, R2, R4$  выбирают такими, чтобы  $U_{b1} < U_{э2}$ , поэтому в устойчивом состоянии транзистор  $VT1$  закрыт. Емкость  $C_6$  оказывается подключенной левой обкладкой через  $R3$  к источнику  $E_k$ , а правой – через открытый переход эмиттер-база к резистору  $R4$ .

При поступлении на вход запускающего импульса положительной полярности транзистор  $VT1$  открывается. При этом положительная обкладка конденсатора  $C_6$  присоединяется через

открытый  $VT1$  к эмиттеру транзистора  $VT2$ , а отрицательная обкладка к его базе.

Это приводит к запираанию транзистора  $VT2$  и, следовательно, резкому увеличению потенциала на его коллекторе и прерыванию тока через переход коллектор-эмиттер транзистора  $VT2$ .

Теперь через  $R4$  протекает лишь ток транзистора  $VT1$ , идущий по цепи  $+E_k - R3$  – коллектор-эмиттер транзистора  $VT1 - R4$  – «земля». Сопротивление  $R3$  выбирается большим, чем  $R6$ , поэтому ток открытого транзистора  $VT1$  меньше тока  $VT2$ . Следовательно, при переходе в неустойчивое состояние ( $VT1$  открыт, а  $VT2$  закрыт) напряжение  $U_{32}$  уменьшается. Для обеспечения открытого состояния транзистора  $VT1$   $U_{61} > U_{32}$ , что выполняется подбором резистора  $R3$ .

Когда открывается  $VT1$ , начинается перезаряд емкости током, протекающим по цепи  $+E_k - R5 - C_6$  – коллектор-эмиттер  $VT1 - R4$  – «земля».

Напряжение  $U_{62}$  при этом постепенно возрастает и достигает порога отпираания транзистора  $VT2$ . Он отпирается и по цепи  $+E_k - R6$  – коллектор-эмиттер транзистора  $VT2 - R4$  – «земля» начинает вновь протекать ток, увеличивающий потенциал на эмиттере  $VT2$ . То есть  $U_{32} > U_{61}$ , транзистор  $VT1$  запирается, возвращая схему в исходное состояние. При этом  $U_{k2}$  скачком снижается, заканчивая формирование прямоугольного импульса на выходе схемы. Таким образом, ждущий мультивибратор реагирует на поступление короткого запускающего импульса формированием одиночного прямоугольного импульса, длительность которого определяется параметрами времязадающей цепи мультивибратора  $R5, C$  с постоянной времени  $\tau$ .

В устойчивом состоянии схемы при отсутствии запускающих импульсов транзистор  $VT2$  открыт положительным смещением от источника питания  $+E_k$  через резистор  $R5$ . Протекающий через резистор ток вызывает падение напряжения на  $R4$ . Потенциал базы транзистора  $VT1$  устанавливается делителем  $R1, R2$ . Сопротивления  $R1, R2, R4$  выбирают такими, чтобы  $U_{61} < U_{32}$ , поэтому в устойчивом состоянии  $VT1$  закрыт. Емкость  $C_6$  оказывается подключенной левой обкладкой через  $R3$  к источнику  $E_k$ , а правой – через открытый переход эмиттер-база к резистору  $R4$ .

При поступлении на вход запускающего импульса положительной полярности транзистор  $VT1$  открывается. При этом

положительная обкладка конденсатора  $C_6$  присоединяется через открытый  $VT1$  к эмиттеру  $VT2$ , а отрицательная обкладка – к его базе.

Это приводит к запираанию  $VT2$  и, следовательно, резкому увеличению потенциала на его коллекторе, прерыванию тока через коллектор-эмиттер.

Теперь через  $R4$  протекает только ток транзистора  $VT1$  по цепи  $+E_k - R3$  – коллектор-эмиттер  $VT1 - R4$  – «земля». Сопротивление  $R3$  выбирается большим, чем  $R6$ , поэтому ток открытого  $VT1$  меньше тока  $VT2$ . Следовательно, при переходе в неустойчивое состояние ( $VT1$  открыт, а  $VT2$  закрыт) напряжение  $U_{32}$  уменьшается. Для обеспечения открытого состояния  $VT1$   $U_{61} > U_{32}$ , что выполняется подбором резистора  $R3$ .

С моментом отпирания  $VT1$  начинается перезаряд емкости током, протекающим по цепи  $+E_k - R5 - C_6$  – коллектор-эмиттер  $VT1 - R4$  – «земля».

Напряжение  $U_{62}$  при этом постепенно возрастает и достигает порога отпирания транзистора  $VT2$ . Отпирается  $VT2$  и по цепи  $+E_k - R6$  – коллектор-эмиттер  $VT2 - R4$  – «земля» начинает вновь протекать ток, увеличивающий потенциал на эмиттере  $VT2$ . То есть  $U_{32} > U_{61}$ , транзистор  $VT1$  запирается, возвращая схему в исходное состояние. При этом  $U_{k2}$  скачком снижается, заканчивая формирование прямоугольного импульса на выходе схемы. Таким образом, ждущий мультивибратор реагирует на поступление короткого запускающего импульса формированием одиночного прямоугольного импульса, длительность которого определяется параметрами времязадающей цепи мультивибратора  $R5, C$  с постоянной времени  $\tau \cong R5C$ .

### **Ждущий мультивибратор на логических элементах (рис. 9.7)**

В исходном состоянии на входе логического элемента Э1 действует напряжение высокого уровня – логическая единица.

Напряжение на входах логического элемента Э2 равно напряжению на резисторе  $R$ , которое создается на нем входным током логического элемента Э2. На входах логического элемента Э2 имеется логический ноль, на выходе – логическая единица, которая передается на второй вход логического элемента Э1. Таким образом, на каждом входе логического элемента Э1 имеется логическая единица. Следовательно, Э1 открыт и напряжение на его выходе

соответствует логическому нулю. Напряжение на конденсаторе  $C$  также близко к нулю.

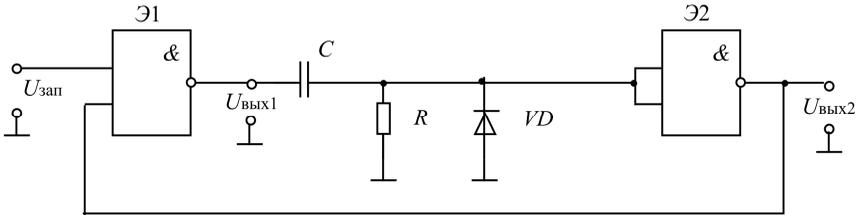


Рис. 9.7. Схема ждущего мультивибратора на логических элементах

При поступлении на вход отрицательного импульса, соответствующего нулю, на выходе логического элемента Э1 устанавливается логическая единица, соответствующая напряжению высокого уровня. Начинается зарядка конденсатора  $C$ . Ток зарядки протекает от выхода логического элемента Э1 через конденсатор  $C$  и резистор  $R$ . На резисторе создается положительное напряжение, которое в виде логической единицы поступает на входы логического элемента Э2 и открывает его. На выходе логического элемента Э2 образуется низкое напряжение (логический ноль), которое передается на второй вход логического элемента Э1 и поддерживает его в закрытом состоянии после прекращения действия входного импульса.

При  $U_{вых2} > U_{пор}$  на входах логического элемента Э1 будет логическая единица, элемент Э1 откроется, на его выходе будет напряжение логического нуля. Начнется разрядка конденсатора  $C$ , напряжение на входах логического элемента Э2 станет меньше порогового, элемент Э2 закроется до прихода следующего импульса. Таким образом, на выходе будет сформирован прямоугольный импульсный сигнал.

### Подготовка к работе

1. Познакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить теоретический материал по теме работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

## Методика выполнения работы на измерительном стенде НТЦ-05 (НТЦ-05.100)

### Исследование ждущего мультивибратора на ОУ

1. Собрать схему ждущего мультивибратора (одновибратора) на ОУ, представленную на рис. 9.8.

2. Установить рассчитанное значение резистора  $R48$ , подать на схему одновибратора напряжение питания и прямоугольные импульсы частотой 1 кГц от генератора ГС2.

3. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения, подключив осциллограф к гнездам 1 и 3.

4. Измерить по осциллографу частоту выходного сигнала  $f$ , период колебаний  $T$ , длительность импульса  $t_{и}$  и длительность паузы  $t_{п}$ , амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{вых max}}$  при различных значениях (положениях)  $R48$ . Данные занести в табл. 9.1.

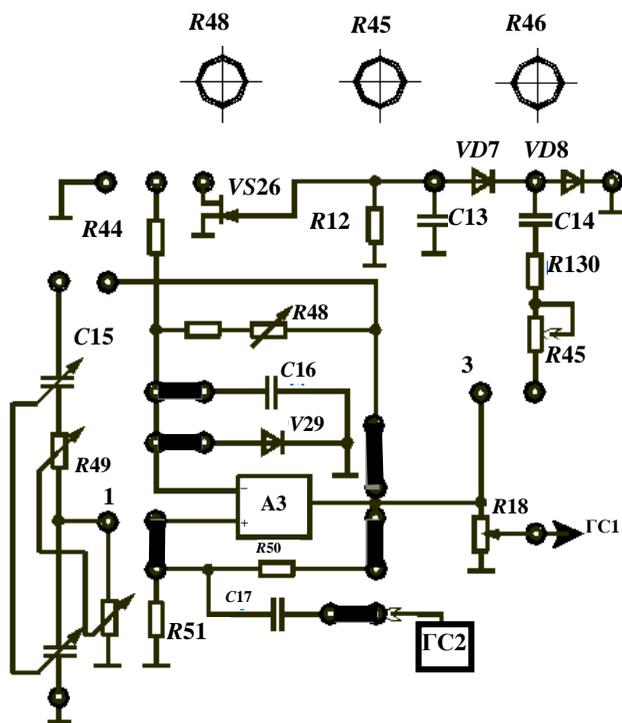


Рис. 9.8. Схема ждущего мультивибратора (одновибратора) на ОУ

5. Зарисовать осциллограммы выходного напряжения для трех положений R48.

6. Оформить отчета в соответствии с пунктом «Содержание отчета».

Таблица 9.1

Результаты измерений

R48	1	2	3
Для мультивибратора			
$t_{и}, \text{ мс}$			
$t_{п}, \text{ мс}$			
$T, \text{ мс}$			
$f, \text{ Гц}$			
$U_{\text{вых max}}, \text{ В}$			
Для одновибратора			
$t_{и}, \text{ мс}$			
$t_{п}, \text{ мс}$			
$T, \text{ мс}$			
$f, \text{ Гц}$			
$U_{\text{вых max}}, \text{ В}$			

### Методика выполнения работы на компьютере

#### Исследование автоколебательного мультивибратора на транзисторах

1. Запустить программу *MICROCAP*.
2. Открыть файл «ЛАБ\_9\_1», на экране появится схема автоколебательного мультивибратора на транзисторах с начальными параметрами элементов:  $R1 = R2 = 20 \text{ кОм}$ ,  $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $C2 = 0,01 \text{ мкФ}$ ,  $R3 = R4 = 2 \text{ кОм}$ , транзисторы с *n-p-n*-переходом (модель: Q1 - 2N1613, Q2 - SXT2222A из американской номенклатуры транзисторов).

3. Получить временные диаграммы напряжения, формируемого мультивибратором, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение): синим цветом показан входной сигнал, а красным цветом – выходной сигнал.

4. Определить по временным диаграммам длительность импульса  $t_{и}$ , длительность паузы  $t_{п}$ , период  $T$ , частоту выходного напряжения мультивибратора  $f$  и величину амплитудного значения импульса  $U_{\text{вых max}}$ . Перерисовать временные диаграммы в тетрадь.

5. Повторить п. 3, изменяя значения  $R2$ ,  $C2$  и  $R1$ ,  $C1$  (см. приложение) в соответствии с таблицами 10.2 и 10.3. Результаты исследований занести в табл. 9.2 и 9.3.

Таблица 9.2

Результаты измерений

$R2$ , кОм	20	20	15	10	10
$C2$ , мкФ	0,01	0,1	0,1	0,15	0,01
$t_{и}$ , мс					
$t_{п}$ , мс					
$T$ , мс					
$f$ , Гц					
$U_{\text{вых max}}$ , В					

Таблица 9.3

Результаты измерений

$R1$ , кОм	20	20	15	10	10
$C1$ , мкФ	0,1	0,01	0,01	0,15	0,01
$t_{и}$ , мс					
$t_{п}$ , мс					
$T$ , мс					
$f$ , Гц					
$U_{\text{вых max}}$ , В					

### Исследование мультивибратора на ОУ

1. Запустить программу *MICROCAP*.

2. Открыть файл «ЛАБ\_9\_2», на экране появится схема автоколебательного мультивибратора на ОУ с начальными параметрами элементов:  $R2 = 10$  кОм,  $R3 = 10$  кОм,  $R4 = 10$  кОм,  $C1 = 0,1$  мкФ, ОУ типа *LM709* из библиотеки программы.

3. Получить временные диаграммы напряжения, формируемого мультивибратором, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение): синим цветом показан входной сигнал, а красным цветом – выходной сигнал.

4. Определить по временным диаграммам длительность импульса  $t_{и}$ , длительность паузы  $t_{п}$ , период  $T$ , частоту выходного напряжения мультивибратора  $f$  и величину амплитудного значения импульса  $U_{\text{вых max}}$ . Перерисовать временные диаграммы в тетрадь.

5. Повторить п. 3, 4, изменяя значения  $R2$  и  $C1$  (см. приложение) в соответствии с табл. 9.4. Результаты исследований занести в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Результаты измерений

$R2$ , кОм	10	10	10	20	5
$C1$ , мкФ	0,1	0,2	0,05	0,1	0,1
$t_{и}$ , мс					
$t_{п}$ , мс					
$T$ , мс					
$f$ , Гц					
$U_{\text{вых max}}$ , В					

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Временные диаграммы.
5. Таблицы опытных и расчетных данных.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип работы автоколебательного мультивибратора на транзисторах.

2. Объясните принцип работы автоколебательного мультивибратора на ОУ.
3. Объясните принцип работы автоколебательного мультивибратора на логических элементах.
4. Объясните принцип работы ждущего мультивибратора на транзисторах.
5. Объясните принцип работы ждущего мультивибратора на логических элементах.
6. Назовите основные параметры одиночного импульсного сигнала и параметры последовательности импульсов.
7. Объясните влияние резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  на форму и параметры импульсов.
8. Назовите примеры практического применения мультивибраторов.

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРОВ

**Цель работы:** изучение принципов построения основных типов триггеров и исследование их функционирования.

**Лабораторное оборудование:**

1. Измерительный стенд НТЦ-05 (НТЦ-05.100).
2. ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Триггером называют логическое устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями («0» или «1») и способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием выходного сигнала.

Триггер относится к базовым элементам цифровой техники. Строится триггер в простейшем случае на двух или более логических элементах И-НЕ или ИЛИ-НЕ с применением обратных связей, имеет 2 выхода (прямой и инверсный), сигналы на которых определяют состояние триггера.

По функциональному признаку различают триггеры типов *R-S*, *D*, *T*, *J-K*. По способу управления триггеры подразделяются на асинхронные и синхронные (или тактируемые).

В асинхронных триггерах переключение из одного состояния в другое осуществляется непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход.

В синхронных триггерах помимо информационных входов имеется вход тактовых импульсов, и переключение производится только при помощи разрешающего, тактирующего импульса.

В зависимости от комбинации выходных сигналов триггер или хранит предыдущую информацию или принимает новую информацию. Любой сколь угодно сложный триггер представляет собой сочетание простейшего асинхронного *RS*-триггера и комбинационной схемы управления этим триггером.

**Асинхронные *RS*-триггеры.** Асинхронные *RS*-триггеры требуют для своего построения два двухвходовых логических элемента типа ИЛИ-НЕ (рис. 10.1) или И-НЕ (рис. 10.2).

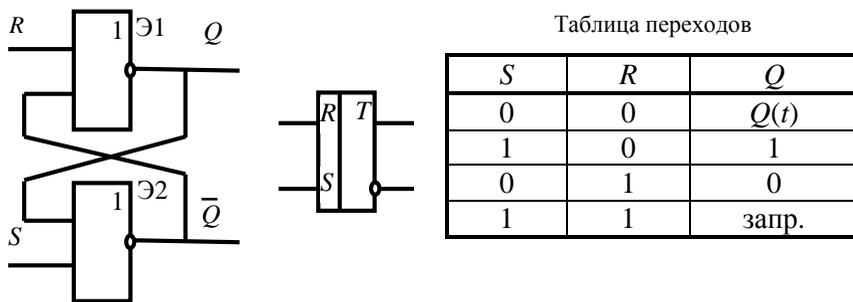


Рис. 10.1. Схема асинхронного  $RS$ -триггера на элементах ИЛИ-НЕ, его условное изображение и таблица переходов

По информационному входу  $S$  (*set* – устанавливать) производится установка триггера в состояние логической «1», а по информационному входу  $R$  (*reset* – вновь устанавливать) установка триггера в исходное состояние логического «0».

Принцип действия триггера определяется поведением в нем элементов ИЛИ-НЕ и И-НЕ. В асинхронном  $RS$ -триггере на элементах ИЛИ-НЕ активным сигналом является уровень логической «1». Входы  $S$  и  $R$  – прямые. Такой триггер работает в соответствии со своей таблицей переходов (рис. 10.1). Запрещенной является комбинация, когда  $S = 1$  и  $R = 1$ .

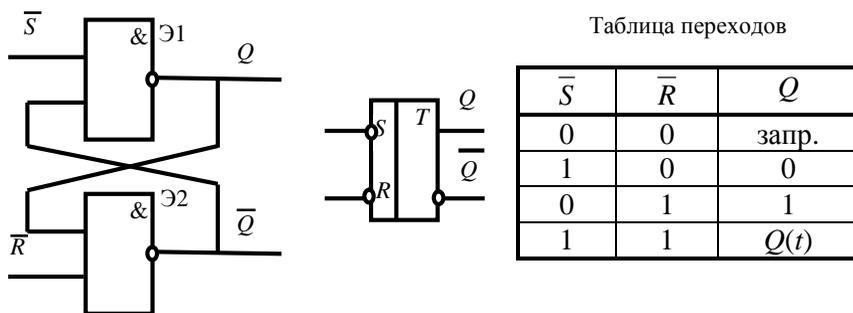


Рис. 10.2. Схема асинхронного  $RS$ -триггера на элементах И-НЕ, его условное изображение и таблица переходов

В асинхронном  $RS$ -триггере на элементах И-НЕ активным сигналом по входам  $S$  и  $R$  является уровень логического «0». Входы  $S$

и  $R$  – инверсные. Функционирование триггера определяется в соответствии с таблицей переходов (рис. 10.2).

Как видно из таблицы подача «0» на вход  $S$  устанавливает триггер в состояние «1», а подача «0» на вход  $R$  переводит триггер в состояние «0». Одновременная подача на  $S$ - и  $R$ -входы «1» не изменяет состояния триггера (то есть триггер хранит информацию, которая была записана в предыдущий момент времени), а одновременная подача на  $S$  и  $R$ -входы «0» переводит триггер в неопределенное состояние. Такая комбинация сигналов является запрещенной.

**Синхронный RS-триггер.** Синхронный RS-триггер построен на основе асинхронного триггера, у которого к входам подсоединены два управляющих элемента И-НЕ (рис. 10.3).

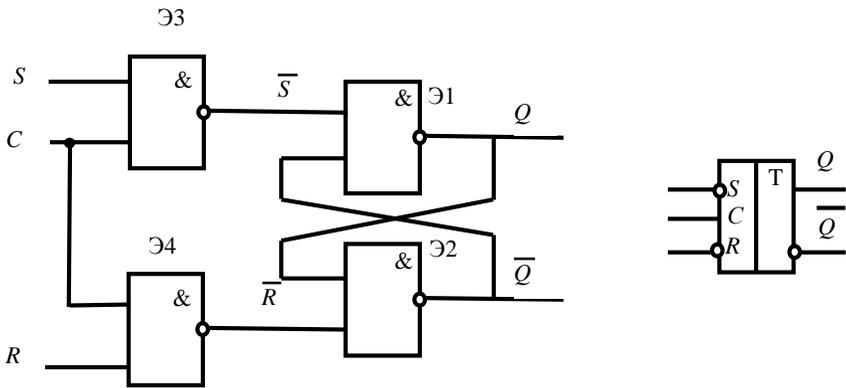


Таблица переходов

$C$	$S$	$R$	$Q$
1	1	0	1
1	0	1	0
0	0	0	$Q(t)$
0	1	0	$Q(t)$
0	0	1	$Q(t)$
1	1	1	–

Рис. 10.3. Схема одноступенчатого синхронного RS-триггера, его условное обозначение и таблица переходов

Переключение такого триггера происходит только при наличии разрешающего сигнала, подаваемого на вход  $C$  ( $C = 1$ ). Функционирование триггера осуществляется в соответствии с таблицей переходов (рис. 10.3).

То есть переключение триггера осуществляется при двух первых комбинациях сигналов на входах  $C$ ,  $R$ ,  $S$ . При трех последующих комбинациях сигналов информация в триггерах сохраняется. Комбинация  $C = R = S = 1$  должна быть исключена, так как в этом случае  $\bar{S} = \bar{R} = 0$ , что запрещено для асинхронного триггера на элементах И-НЕ. В одноступенчатом триггере прием и передача информации происходит одновременно. Это приводит к тому, что во время записи информации может произойти нарушение информационного состояния на выходах схемы. Чтобы избежать этого, используют двухступенчатые триггеры.

Двухступенчатый синхронный  $RS$ -триггер строится на базе двух последовательно соединенных одноступенчатых синхронных  $RS$ -триггеров со специальной организацией цепи синхронизации с использованием элемента НЕ (рис. 10.4).

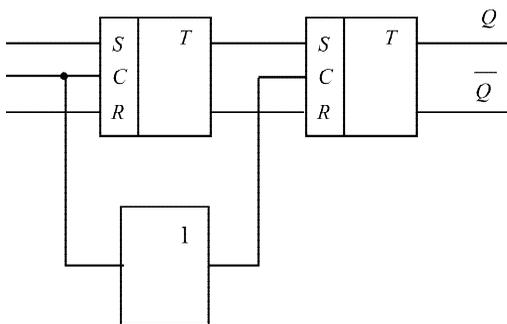


Рис. 10.4. Схема двухступенчатого синхронного  $RS$ -триггера

При  $C = 1$  осуществляется запись информации в первый триггер, а при  $C = 0$  осуществляется передача информации из первого триггера во второй и блокируются информационные входы первого триггера.

Наибольшее применение нашли  $RS$ -триггеры на элементах И-НЕ ввиду большей распространенности этих элементов в сериях интегральных микросхем. Синхронные  $RS$ -триггеры широко применяются

в цифровых устройствах для хранения двоичной информации в течение времени, большего ее существования в исходном источнике, например, для хранения промежуточной информации, передаваемой от счетчиков импульсов и регистров.

**D-триггер.** D-триггер строится на основе асинхронного RS-триггера путем подсоединения дополнительных логических элементов И-НЕ (рис. 10.5).

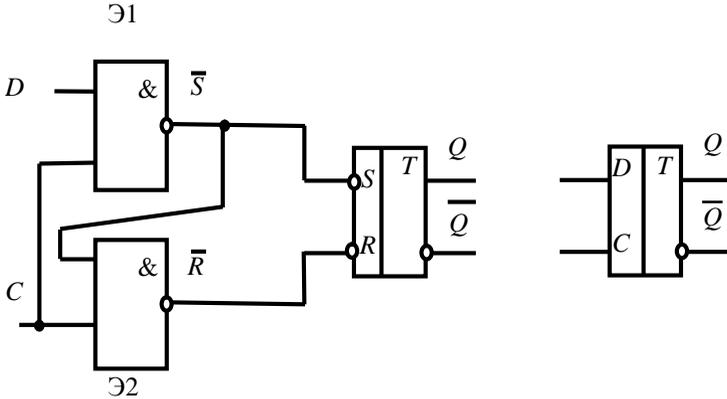


Таблица переходов

$C$	$D$	$Q$
1	1	1
1	0	0
0	1	$Q(t)$
0	0	$Q(t)$

Рис. 10.5. Схема одноступенчатого синхронного D-триггера на основе асинхронного RS-триггера, его условное обозначение и таблица переходов

Как видно из таблицы переходов D-триггер переходит в состояние «1» ( $Q = 1$ ), если в момент перехода синхронизирующего сигнала  $C = 1$ , на его информационном входе  $D$  сигнал «1» ( $D = 1$ ). В этом состоянии триггер остается и после окончания сигнала на входе  $D$  до прихода очередного синхронизирующего сигнала,

возвращающего триггер в состояние «0». То есть  $D$ -триггер «задерживает» поступившую на его вход информацию на время, равное периоду синхронизирующих сигналов.

**$T$ -триггер.**  $T$ -триггер или счетный триггер имеет один информационный вход и переходит в противоположное состояние в результате воздействия на его вход каждого очередного сигнала. Название «счетный» связано с широким применением  $T$ -триггеров в счетчиках импульсов.  $T$ -триггеры делятся на асинхронные и синхронные, одноступенчатые и двухступенчатые.

Асинхронный двухступенчатый  $T$ -триггер может быть выполнен на базе двух последовательно соединенных синхронных  $RS$ -триггеров с применением обратных связей (рис. 10.6), асинхронный одноступенчатый может быть выполнен на основе  $D$ -триггера также с использованием обратных связей. При этом вход синхронизации  $C$  преобразуется в счетный вход  $T$ -триггера.

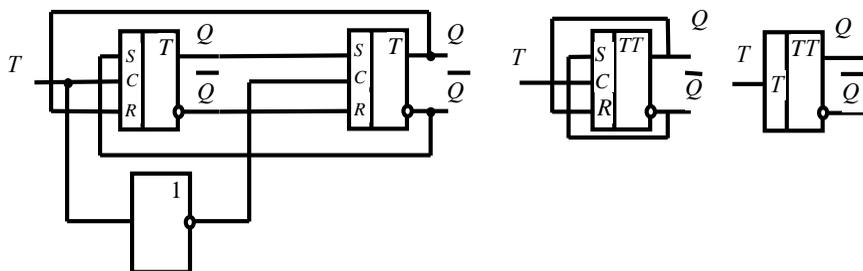


Рис. 10.6. Схема асинхронного двухступенчатого  $T$ -триггера на базе двух последовательно соединенных синхронных  $RS$ -триггеров и его условное обозначение

Состояние такого  $T$ -триггера меняется на противоположное при каждом изменении сигнала на  $T$ -входе от «1» к «0», то есть по заднему фронту каждого импульса на  $T$ -входе, так как в момент начала импульса информация записывается в первый (основной) триггер, а после его окончания передается во второй (вспомогательный) триггер, с выхода  $Q$  которого мы снимаем информацию.

Одноступенчатый  $T$ -триггер показан на рис. 10.7. Работает такой асинхронный  $T$ -триггер следующим образом. Когда  $Q = 1$ , а  $\bar{Q} = 0$ , то на входе логического элемента Э1 за счет обратной связи будет действовать сигнал «0», так как этот вход соединен

с выходом  $\bar{Q}$ . После поступления тактового импульса на вход  $T$  на выходах установится  $Q = 0$ ,  $\bar{Q} = 1$ , а на входе логического элемента Э1 будет действовать сигнал «1» и при поступлении следующего тактового импульса опять произойдет смена состояния.

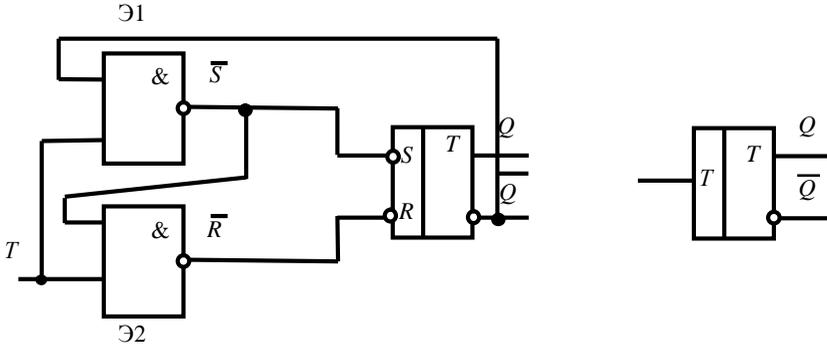


Рис. 10.7. Схема одноступенчатого  $T$ -триггера

В отличие от схемы на рис. 10.6, срабатывание такого  $T$ -триггера происходит по переднему фронту импульсного сигнала на  $T$ -входе, то есть при каждом изменении сигнала от «0» к «1».

Синхронный  $T$ -триггер получают путем введения дополнительного элемента И, подключаемого к  $T$ -входу (рис. 10.8).

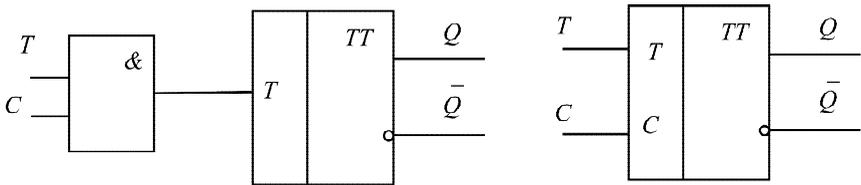


Рис. 10.8. Схема синхронного  $T$ -триггера и его условное обозначение

Синхронный  $T$ -триггер, в отличие от асинхронного  $T$ -триггера, реагирует на импульсы, поступающие на вход синхронизации только при подаче на управляющий вход активного уровня ( $T = 1$ ).

**JK-триггер.** JK-триггер может быть построен на базе двухступенчатого  $T$ -триггера путем использования элементов И-НЕ в выходных цепях первого (ведущего) триггера (рис. 10.9). Эти элементы

позволяют иметь два дополнительных входа  $J$  и  $K$ , за счет которых расширяются функциональные возможности триггера, в связи с чем  $JK$ -триггер называют универсальным. При соответствующем подключении входов триггер может выполнять функции  $RS$ -,  $D$ -,  $T$ -триггеров. При этом вход  $J$  соответствует входу  $S$ , а вход  $K$  – входу  $R$ .

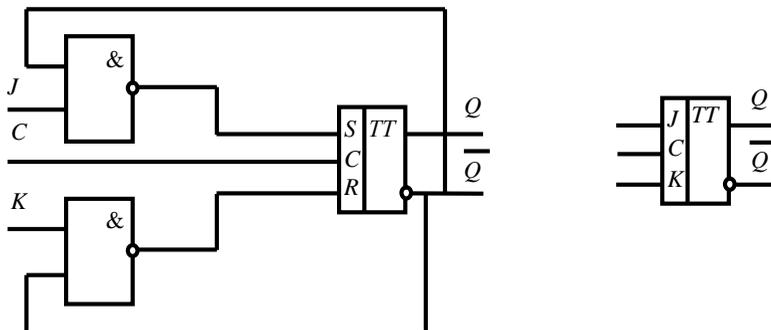


Таблица переходов

$J$	$K$	$Q$
1	1	$Q(t)$
1	0	1
0	1	0
0	0	$Q(t)$

Рис. 10.9. Схема, условное обозначение и таблица переходов  $JK$ -триггера

Функционирование  $JK$ -триггера описывается таблицей переходов, приведенной в таблице на рис. 10.9.

В отличие от  $RS$ -триггера, состояние которого является неопределенным при  $S = 1$  и  $R = 1$ ,  $JK$ -триггер при  $J = 1$  и  $K = 1$  по синхроимпульсу изменяет свое состояние на противоположное, то есть реализует функции  $T$ -триггера. Поэтому на базе  $JK$ -триггера легко реализуется  $T$ -триггер путем объединения входов и использования их в качестве  $T$ -входа. Добавляя инвертор на входе  $JK$ -триггера, можно получить  $D$ -триггер.

Все типы триггеров, реализуемые на основе  $JK$ -триггера, дают задержку в появлении выходных сигналов, равную длительности синхронизирующего сигнала.

## Подготовка к работе

1. Познакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета (нарисовать исследуемые схемы триггеров на логических элементах И-НЕ);
3. Изучить теоретический материал по теме работы (изучить принцип работы и функциональные свойства всех типов триггеров на логических элементах); ответить на контрольные вопросы.

### Методика выполнения работы на измерительном стенде НТЦ-05 (НТЦ-05.100)

1. Исследовать схему асинхронного RS-триггера на логических элементах И-НЕ;
  - 1.1. В соответствии с рис. 10.10 собрать схему асинхронного RS-триггера, который представляет собой генератор одиночных импульсов (ГОИ).

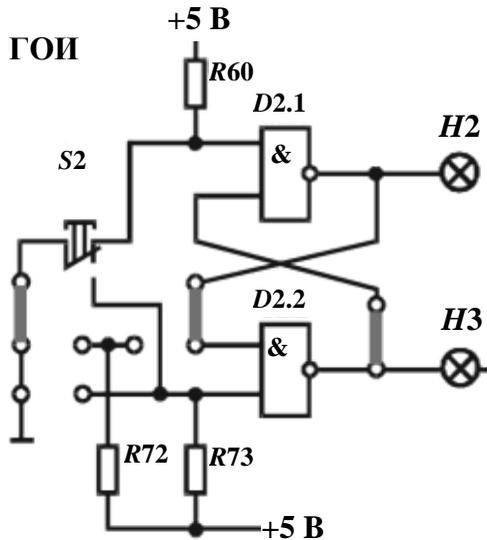


Рис. 10.10. Схема асинхронного RS-триггера

- 1.2. Составить таблицу истинности, снять и зарисовать временные диаграммы.

Таблица истинности для асинхронного RS-триггера

$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q$	$\bar{Q}$
0	1		
1	1		
1	0		
1	1		

1.3. Подача управляющих сигналов на  $S$ -вход осуществляется с помощью кнопки  $S2$ , а на  $R$ -вход – подключением этого входа к шине питания (+5 В) либо к общему проводу («земля»). Состояние выходов триггера регистрируется по индикаторам Н2 и Н3. Если светодиод горит, значит на данном выходе сигнал логической «1», если нет, то сигнал логического «0». Данную схему (с кнопкой  $S2$ ) можно рассматривать как генератор одиночных импульсов (ГОИ).

2. Исследовать схему синхронного RS-триггера на логических элементах И-НЕ;

2.1. Собрать схему синхронного RS-триггера в соответствии с рис. 10.11.

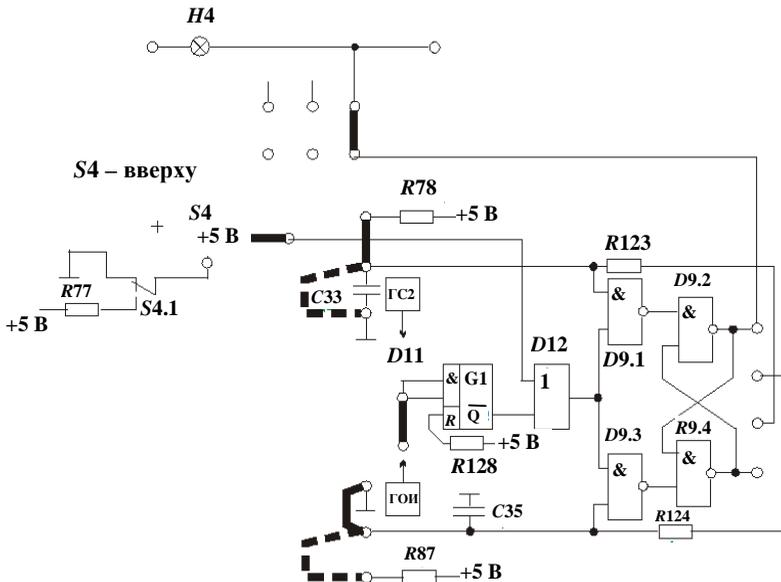


Рис. 10.11. Схема синхронного RS-триггера

2.2. Составить таблицу истинности и зарисовать временные диаграммы для синхронного  $RS$ -триггера при подаче на синхровход  $C$  (тактируемый вход) одиночных импульсов от генератора ГОИ, схема которого представлена на рис. 10.11.

2.3. Подача единичного сигнала на  $S$ -вход показана на рис. 10.11 сплошной линией, а подача нулевого сигнала – штриховой линией. Подача единичного сигнала на  $R$ -вход показана штриховой линией, а нулевого сигнала – сплошной линией. Подача единичного сигнала на  $C$ -вход осуществляется с помощью нажатия кнопки  $S2$  (светодиод  $H2$  – «горит»). Состояние прямого выхода синхронного  $RS$ -триггера регистрируется по индикатору  $H4$ .

Таблица 10.2

Таблица истинности для синхронного  $RS$ -триггера

$C$	$S$	$R$	$Q$
1	1	0	
1	0	1	
1	1	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	0	0	
1	0	1	

Ситуация при  $C = S = R = 1$  должна быть исключена, так как такая комбинация сигналов является запрещенной в синхронном  $R$ - $S$ -триггере.

3. Исследовать счетный  $T$ -триггер.

3.1. Собрать схему  $T$ -триггера в соответствии с рис. 10.12.

3.2. Составить таблицу истинности и зарисовать временные диаграммы для  $T$ -триггера при подаче на синхровход  $C$  (тактируемый вход  $T$ ) одиночных импульсов от генератора ГОИ, схема которого представлена на рис. 10.3.

3.3. Подача единичного сигнала на  $C$ -вход осуществляется с помощью нажатия кнопки  $S2$  (светодиод  $H2$  – «горит»). Состояние прямого выхода  $T$ -триггера регистрируется по индикатору  $H4$ .

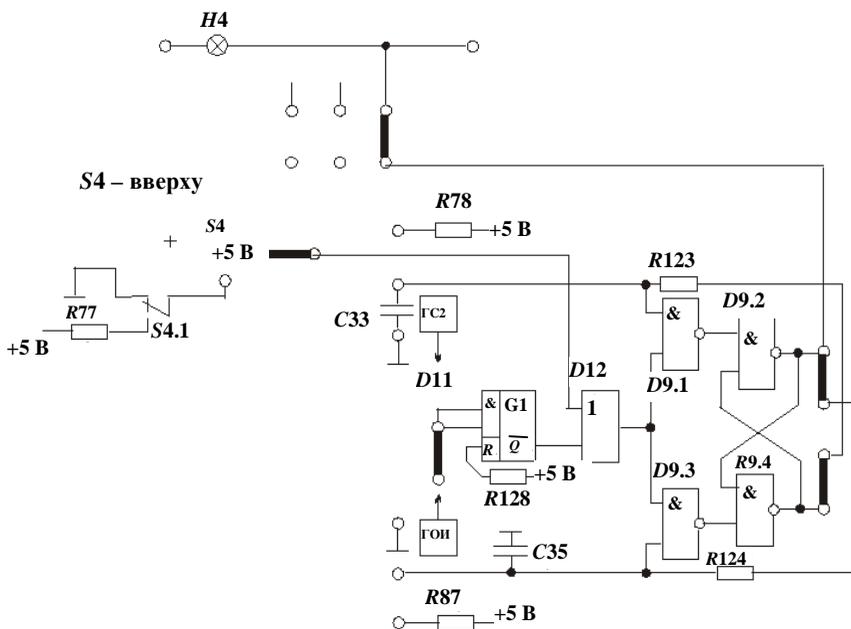


Рис. 10.12. Схема T-триггера

Таблица 10.3

Таблица истинности для T-триггера

$T$							
$Q$							

## Методика выполнения работы на компьютере

### Исследование асинхронного RS-триггера

1. Запустить программу *MICROCAP*. Открыть папку «ЛАБ\_10».
2. Открыть файл «RS\_A.CIR», на экране появятся 2 элемента И-НЕ, 2 источника сигналов для S- и R-входов и «земля». На основе этих элементов собрана схема асинхронного RS-триггера.
3. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).
4. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение, п. 3).

5. Перерисовать временные диаграммы:
  - синим цветом показан сигнал на  $S$ -входе (узел 1);
  - красным – на  $R$ -входе (узел 4);
  - зеленым – на выходе  $Q$  (узел 3).
6. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).
7. По временным диаграммам составить таблицы истинности.

### **Исследование синхронного $RS$ -триггера одноступенчатого**

1. Открыть файл « $RS\_C.CIR$ », на экране появятся 4 элемента И-НЕ, 2 источника сигналов для  $S$ - и  $R$ -входов, источник синхросигналов для  $C$ -входа и «земля». На основе этих элементов собрана схема синхронного  $RS$ -триггера.

2. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).
3. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение, п. 3).
4. Перерисовать временные диаграммы:
  - синим цветом показан сигнал на  $S$ -входе (узел 6);
  - красным – на  $C$ -входе (узел 7);
  - зеленым – на  $R$ -входе (узел 5).
  - красным – на выходе  $Q$  (узел 3).
5. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).
6. По временным диаграммам составить таблицы истинности.

### **Исследование синхронного $RS$ -триггера двухступенчатого**

1. Открыть файл « $2\_RS\_C.CIR$ », на экране появится готовая к анализу схема синхронного двухступенчатого  $RS$ -триггера.

2. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение, п. 3).
3. По временным диаграммам определить время задержки сигнала между моментом записи в первую ступень  $RS$ -триггера (узел 6) и моментом считывания с выхода второй ступени  $RS$ -триггера (узел 10).

### **Исследование синхронного $D$ -триггера**

1. Открыть файл « $D\_C.CIR$ », на экране появятся 4 элемента И-НЕ, 2 источника сигналов для  $D$ - и  $C$ -входов и «земля». На основе этих элементов собрана схема синхронного  $D$ -триггера.

2. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6)

3. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение, п. 3).

4. Перерисовать временные диаграммы:

– синим цветом показан сигнал на  $D$ -входе (узел 5);

– красным – на  $C$ -входе (узел 6);

– зеленым – на выходе  $Q$  (узел 3);

– красным – на инверсном выходе  $Q$  (узел 2).

5. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).

6. По временным диаграммам составить таблицы истинности.

### **Исследование асинхронного $T$ -триггера**

1. Открыть файл «*T\_A.CIR*», на экране появится схема асинхронного  $T$ -триггера, построенного на базе  $D$ -триггера.

2. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).

3. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение, п. 3).

4. Перерисовать временные диаграммы:

– красным цветом показан сигнал на  $T$ -входе (узел 3);

– зеленым – на выходе  $Q$  (узел 5);

5. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).

6. По временным диаграммам составить таблицы истинности.

### **Исследование $JK$ -триггера асинхронного**

1. Открыть файл «*JK\_A.CIR*», на экране появится схема асинхронного  $JK$ -триггера.

2. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).

3. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение, п. 3).

4. Перерисовать временные диаграммы:

– красным цветом показан сигнал на  $J$ -входе (узел 7);

– синим – сигнал на  $K$ -входе (узел 6);

– зеленым – на выходе  $Q$  (узел 4);

5. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).

6. По временным диаграммам составить таблицы истинности.

### **Исследование $JK$ -триггера синхронного**

1. Открыть файл «*JK\_C.CIR*», на экране появится схема синхронного  $JK$ -триггера.

2. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).

3. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение, п. 3).
4. Перерисовать временные диаграммы:
  - синим цветом показан сигнал на  $J$ -входе (узел 4);
  - зеленым – на  $K$ -входе (узел 5);
  - красным – на  $C$ -входе (узел 3);
  - розовым – на выходе  $Q$  (узел 6);
5. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).
6. По временным диаграммам составить таблицы истинности.

### Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Временные диаграммы.
5. Таблицы опытных и расчетных данных.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип работы асинхронного  $RS$ -триггера, построенного на элементах И-НЕ и ИЛИ-НЕ.
2. Объясните работу двухступенчатого синхронного  $RS$ -триггера. В каких случаях он применяется?
3. Объясните принцип действия  $D$ -триггера. Чем он отличается от  $RS$ -триггера?
4. Чему равно время задержки распространения входного сигнала в  $D$ -триггере?
5. Объясните принцип построения и работы  $T$ -триггера.
6. Чем отличается асинхронный  $T$ -триггер от синхронного  $RS$ -триггера?
7. Объясните принцип построения и работы  $JK$ -триггера, укажите его особенности.
8. Каким образом  $JK$ -триггер может реализовать функции  $T$ -триггера?
9. Как на основе  $JK$ -триггера построить  $D$ -триггер?

## Лабораторная работа № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИСТРОВ

**Цель работы:** изучить принципы построения различных видов регистров; исследовать работу параллельного и последовательного регистров; изучить применение регистров в микропроцессоре.

#### Лабораторное оборудование:

1. Измерительный стенд НТЦ-05 (НТЦ-05.100).
2. Измерительный стенд УМ-12.
3. ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

Регистрами называют устройства, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации в виде двоичного числа или другой кодовой комбинации. Основные элементы регистра – двоичные ячейки, в качестве которых применяются триггеры. Число триггеров, входящих в состав регистра (то есть разрядность регистра), определяется числом двоичных разрядов «слова» (то есть разрядностью двоичного числа).

В зависимости от способа записи информации в регистр различают:

- 1) параллельные регистры;
- 2) последовательные (сдвиговые) регистры;
- 3) параллельно-последовательные регистры.

**Параллельный регистр.** На рис. 11.1 приведена структурная схема параллельного  $n$ -разрядного регистра, построенного на  $RS$ -триггерах:  $T_1$  – триггер младшего разряда,  $T_n$  – триггер старшего разряда.

Запись двоичного числа («слова») осуществляется параллельным кодом, то есть во все разряды регистра одновременно. Информация в ячейки регистра (по входам 1, 2 и  $n$ ), то есть в триггеры регистра, записывается по команде **Ввод** (то есть на входе «Ввод» должна быть «1»).

Для записи информации в регистр используются асинхронные  $S$ -входы.

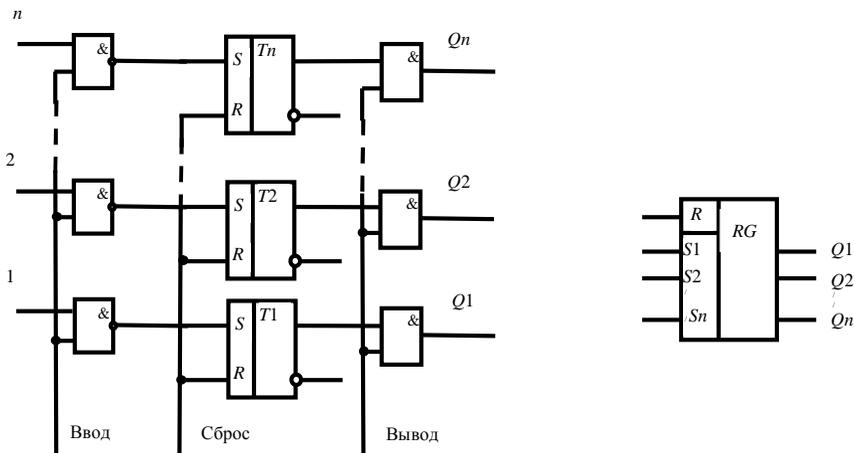


Рис. 11.1. Структурная схема параллельного  $n$ -разрядного регистра

Считывание информации также осуществляется в параллельном коде при подаче сигнала «1» на шину «Вывод», открывающего выходные элементы И. При этом число, записанное в регистр, сохраняется, а на выходах  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_n$  получаем информацию, которая была записана в регистр.

Если мы хотим обнулить регистр для того, чтобы записать туда новое число, необходимо подать сигнал логической «1» на линию «Сброс», объединяющую  $R$ -входы  $RS$ -триггеров.

Регистр с параллельным приемом и выдачей информации называется регистром памяти. Их функция сводится только к приему, хранению и передаче считанной информации.

**Последовательный регистр.** Регистр состоит из последовательно соединенных  $D$ -триггеров, состояния которых передаются (сдвигаются) на последующие триггеры под действием тактовых импульсов, поэтому последовательные регистры называются регистрами сдвига. Запись информации в них осуществляется последовательным кодом. Структурная схема четырехразрядного сдвигового регистра приведена на рис. 11.2.

Перед записью информации регистр устанавливается в ноль. Для этого в отсутствии сигнала на входе подается серия тактовых импульсов на  $S$ -вход с числом импульсов, равным количеству разрядов в регистре. При записи информации одновременно

с поступлением кода числа подаются тактовые импульсы на  $C$ -вход. С помощью тактовых импульсов, осуществляется продвижение информации от младшего разряда регистра к старшему (то есть от  $T1$  к  $T4$ ). В результате для данной схемы после четвертого тактового импульса, ячейки регистра (то есть каждый из триггеров регистра) принимают состояния, соответствующие коду входного четырехразрядного числа.

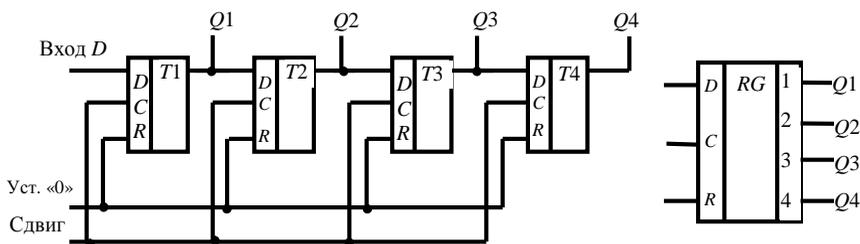


Рис. 11.2. Структурная схема и условное графическое обозначение последовательного регистра

Состояние каждого триггера в различные моменты времени показано на временных диаграммах (рис. 11.3).

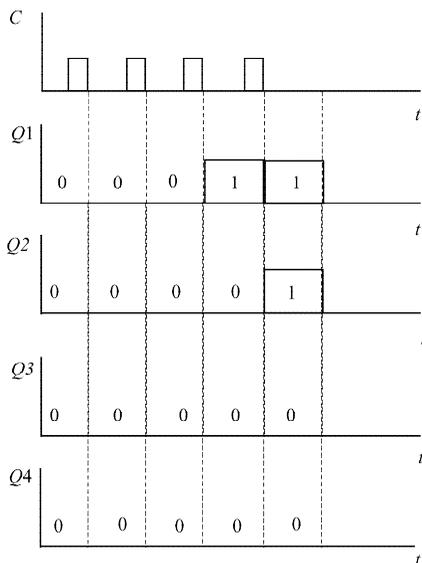


Рис. 11.3. Временные диаграммы последовательного регистра при записи числа 0011

Если на  $D$ -вход подается число 3 (в двоичном коде 0011). Считывать информацию из сдвигового регистра можно либо в последовательном коде, продвигая информацию через все разряды регистра к выходу с помощью тактовых импульсов, либо в параллельном коде одновременно с выходов каждого разряда.

**Параллельно-последовательный регистр.** Этот регистр позволяет осуществлять запись информации как в последовательном, так и в параллельном коде, и поэтому может быть использован для преобразования кодов из последовательного в параллельный и обратно.

Для преобразования последовательного кода в параллельный с помощью серии тактовых импульсов (так же как в сдвиговом регистре) в регистр записывается информация в последовательном коде. Выходы разрядов регистра представляют эту информацию в параллельном коде. Для обратного преобразования информацию вводят в регистр по параллельным входам, а считывают ее в последовательном коде с выхода последнего разряда регистра, продвигая ее с помощью тактовых импульсов. Структурная схема такого регистра приведена на рис. 11.4.

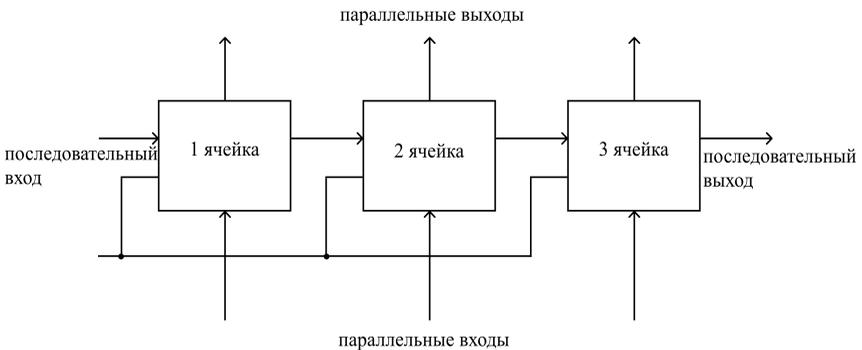


Рис. 11.4. Структурная схема параллельно-последовательного регистра

### Подготовка к работе

1. Познакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.

3. Изучить теоретический материал по теме работы.
4. Ответить на контрольные вопросы.

### **Методика выполнения работы на измерительном стенде НТЦ-05 (НТЦ-05.100)**

#### **Ознакомиться с порядком сборки и исследования схемы регистра К155ИР1 на стенде**

Регистр К155ИР1 – это четырехразрядный универсальный сдвиговый регистр. Он имеет четыре параллельных входа  $D0–D3$  и один последовательный вход  $S1$ , а также четыре выхода  $Q0–Q3$ . Регистр имеет два тактовых входа  $C1$  и  $C2$  и вход разрешения параллельной загрузки  $PE$ .

Если на вход  $PE$  подано напряжение высокого уровня, то разрешается работа тактовому входу  $C2$ . При этом в регистр загружаются данные от входов  $D0–D3$ , то есть осуществляется параллельная запись информации.

Если на вход  $PE$  подать напряжение низкого уровня, то разрешается работа по входу  $C1$ . С приходом тактового импульса на  $C1$  данные последовательно сдвигаются от входа  $S1$  на выход  $Q0$ , затем на  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  (то есть вправо). Таким образом реализуется последовательная запись информации.

С помощью входов  $D0–D3$  задается код числа, записываемого в регистр. Запись этого кода разрешается при единичном уровне сигнала на входе  $PE$  и поступлении на  $C2$  тактовых импульсов.

При нулевом уровне на входе  $PE$  и поступлении импульсов на вход  $C1$  происходит сдвиг данных по регистру вправо. Причем данные сдвигаются на такое число разрядов, сколько тактовых импульсов поступило на вход  $C1$ .

#### **Сбор схемы для исследования последовательного регистра, представленной на рис. 11.6**

1. Подать на схему напряжение питания и обнулить регистр.
2. Для этого перевести регистр в режим загрузки последовательного кода ( $PE = 0$ ) и загрузить код 0000, подав на соответствующий тактовый вход ( $C1$ ) четыре тактовых импульса. Подача тактовых импульсов на регистр осуществляется с помощью кнопки  $S2$  (генератор одиночных импульсов ГОИ), а подача последовательного кода с помощью переключателя  $S4$  (положение  $S4$  вверх

соответствует сигналу логического «0», а положение  $S4$  вниз сигналу логической «1»).

3. Загрузить в регистр, заданный преподавателем последовательный четырехразрядный код.

4. В процессе загрузки регистрировать состояние выходов регистра по индикаторам после подачи каждого тактового импульса зафиксировать исходные данные в табл. 11.1.

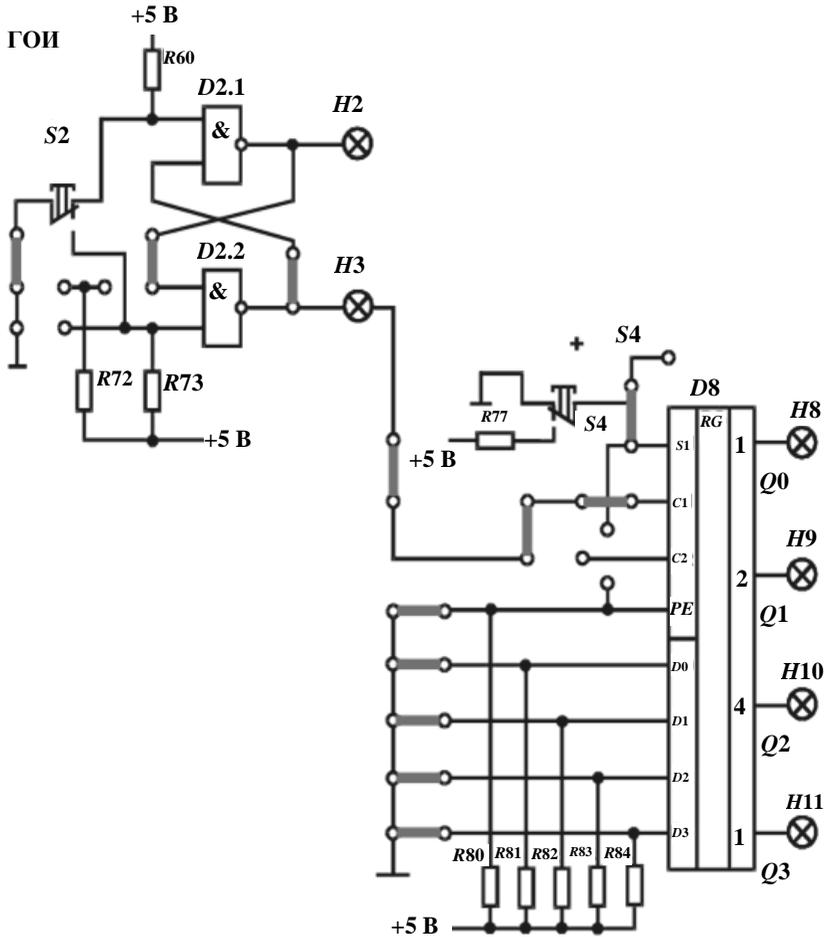


Рис. 11.6. Схема для исследования регистра

Таблица 11.1

Состояние выходов регистра

Выходной сигнал	Исходные данные	Количество импульсов сдвига			
		1	2	3	4
$Q_0$					
$Q_1$					
$Q_2$					
$Q_3$					

5. Осуществить сдвиг записанного кода на число разрядов по заданию преподавателя. Регистрировать состояние выходов регистра после подачи каждого тактового импульса. Результаты занести в табл. 11.1.

### **Сбор схемы для исследования параллельного регистра, представленной на рис. 11.7**

Записать в регистр число, заданное в параллельном коде. Для этого с помощью перемычек установить заданный код на входах  $D_0$ – $D_3$  регистра (соединение с общим проводом позволяет подать сигнал логического «0», а соединение с источником питания – сигнал логической «1»).

1. Подать один тактовый импульс на соответствующий тактовый вход ( $C_2$ ). Подача тактовых импульсов на регистр осуществляется с помощью кнопки  $S_2$  (генератор одиночных импульсов ГОИ), при этом сигнал на  $PE = 1$ . Зарегистрировать состояние выходов регистра. Результаты занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Состояние выходов регистра

Входные данные				Выходные данные			
$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$

### **Преобразование в регистре параллельного кода в последовательный код**

1. Записать в регистр двоичное четырехразрядное число 1010 в параллельном коде.

2. Осуществить сдвиг записанного параллельного кода, подавая тактовые импульсы на тактовый вход  $C1$  от ГОИ, при этом  $PE = 0$  (количество импульсов сдвига равно разрядности двоичного числа). Регистрировать состояние выхода старшего разряда регистра после подачи каждого тактового импульса, наблюдая таким образом преобразование информации из параллельного кода в последовательный код. Результаты занести в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Состояние выхода старшего разряда регистра

№ импульса сдвига	1	2	3	4
Состояние старшего разряда $Q3$				

### Преобразование в регистре последовательного кода в параллельный код

1. Записать в регистр в последовательном коде двоичное четырехразрядное число 0110.

2. Убедиться, что записанное в последовательном коде двоичное число появляется на выходах регистра и, следовательно, может быть считано в параллельном коде, то есть одновременно со всех выходов регистра.

### Методика выполнения работы на компьютере

#### Исследование параллельного регистра

1. Запустить программу *MICROCAP*.
2. Открыть файл «ЛАБ\_11\_1.CIR», на экране появится готовая для анализа схема четырехразрядного параллельного регистра.
3. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).
4. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню *Analysis* (Анализ), *Transient Analysis* (Анализ переходных процессов), *Run* (Запустить) (см. приложение, п. 3).
5. Перерисовать временные диаграммы:
  - сигналы на выходах триггеров  $T1, T2, T3, T4$ ;
  - сигналы на параллельных выходах регистра  $Q1, Q2, Q3, Q4$ ;
  - сигнал по линии «Сброс» (*Clear*);
  - сигнал по линии «Вывод» (*Out*).

6. Заполнить таблицу состояний (табл. 11.4):

Таблица 11.4

Результаты исследования параллельного регистра

	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$Q1$	$Q2$	$Q3$	$Q4$
Сброс (Clear) = 1 Вывод (Out) = 0								
Сброс (Clear) = 0 Вывод (Out) = 1								

7. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).

### Исследование последовательного регистра

1. Открыть файл «ЛАБ\_11\_2.CIR», на экране появится готовая для анализа схема четырехразрядного последовательного регистра.

2. Обозначить узлы схемы (см. приложение, п. 2.6).

3. Получить временные диаграммы, воспользовавшись кнопками меню **Analysis** (Анализ), **Transient Analysis** (Анализ переходных процессов), **Run** (Запустить) (см. приложение, п. 3).

4. Перерисовать временные диаграммы:

– сигналы на выходах регистра  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$ ,  $Q4$ ;

– сигнал по синхролинии  $C$  ( $Clk$ );

– сигнал по линии «Вход  $D$ » ( $Din$ ).

5. Заполнить таблицу состояний (табл. 11.5).

Таблица 11.5

Результаты исследования последовательного регистра

Количество импульсов	3	4	6	7	9	10
Состояние триггеров	$Q1$					
	$Q2$					
	$Q3$					
	$Q4$					
Десятичный эквивалент						

6. Выйти из режима анализа схемы (см. приложение, п. 4).

## Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Временные диаграммы.
5. Таблицы опытных и расчетных данных.
6. Основные формулы, используемые при расчетах.
7. Выводы по работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Приведите классификацию регистров.
2. Приведите структуру параллельного регистра и опишите принцип его работы.
3. Приведите структуру последовательного регистра и опишите принцип его работы.
4. Как производится преобразование последовательной информации в параллельную форму?
5. Как производится преобразование параллельной информации в последовательную форму?
6. Поясните работу регистра памяти.
7. Какие операции может выполнять регистр?
8. Приведите примеры применения регистров в микропроцессорных системах.

## Лабораторная работа № 12

### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРА

**Цель работы:** ознакомиться со структурой микропроцессора и МП-системы; изучить порядок выполнения основных команд микропроцессора.

**Лабораторное оборудование:** ПЭВМ.

#### Краткие теоретические сведения

*Микропроцессор* – это программно-управляемое устройство обработки информации, выполненное конструктивно в виде одной или нескольких больших интегральных схем (БИС).

Микропроцессор не используется как самостоятельное вычислительное устройство. Он рассчитан на совместную работу с запоминающими устройствами и устройствами ввода и вывода информации. Набор совместимых БИС с согласованными связями, предназначенный для построения микропроцессорных систем, называют *микропроцессорным комплектом* (МПК). Типовой МПК содержит следующие основные типы БИС: микропроцессор (МП), запоминающее устройство (ЗУ), программируемый периферийный интерфейс ввода и вывода (ППИ).

Технические средства обработки цифровой информации, построенные на базе микропроцессорных комплектов БИС, называют *микропроцессорными устройствами* (МП-устройства).

Собранная в единое целое совокупность взаимодействующих БИС микропроцессорного комплекта, организованная в работающую систему обработки информации, образует *микропроцессорную систему* (МП-система).

Конструктивно законченная МП-система, реализованная на базе МПК БИС и имеющая свой источник питания, пульт управления, устройства ввода и вывода информации, которые позволяют использовать ее в качестве автономного устройства со своим программным обеспечением, называется микропроцессорной электронной вычислительной машиной, или микроЭВМ.

Устройство логического управления, выполненное на основе одной или нескольких микропроцессорных устройств, называют *микромикроконтроллером*. Он может быть программируемым и непрограммируемым.

Совокупность технических и программных средств, предназначенных для автоматизации сбора, хранения, преобразования и выдачи информации по заданной программе, которая построена на базе МПК БИС и оснащена специальным программным обеспечением, называется *микропроцессорной техникой* (МПТ).

В зависимости от сложности и объема решаемых задач можно выделить два основных направления применения микропроцессорных устройств. Во-первых, они используются как универсальные логические компоненты автоматических цифровых устройств измерения, контроля и управления. Во-вторых, микропроцессорные устройства применяются для создания микроЭВМ, в том числе управляющих. Для реализации этих машин используются МП с длиной слова 8, 16, 32, 64 разрядов.

В системах автоматического управления микропроцессорные устройства и микроЭВМ, как правило, встраиваются непосредственно в контур объектов и являются их частью. Поэтому они оснащаются памятью, устройствами ввода–вывода и программным обеспечением, необходимым только для выполнения функций управления. С появлением микропроцессоров и микроЭВМ создалась новая техническая база для автоматизации производства. Применение микропроцессорной техники привело к расширению возможностей, изменению состава и способов разработки, резко уменьшению габаритов и стоимости систем автоматизации управления различными технологическими процессами, в том числе и в сельском хозяйстве.

### **Архитектура и структура МП-системы**

Под архитектурой МП-систем понимается абстрактное представление о системе, определяющее ее возможности по аппаратурной и программной реализации необходимых функций. Архитектура объединяет аппаратурные, микропрограммные и программные средства МПТ.

Микропроцессорная система (рис. 12.1), или микроЭВМ, включает в себя один или несколько микропроцессоров, БИС постоянной (ПЗУ) и оперативной (ОЗУ) памяти, БИС управления вводом и выводом информации, генератор тактовых импульсов и некоторые

другие схемы. Связаны эти устройства между собой посредством системы шин. Шина – это совокупность проводников, каждый из которых предназначен для передачи соответствующего бита информации. Различают:

1) шину данных (ШД) – двунаправленная шина, по которой данные могут следовать либо в микропроцессор, либо из него. Передача данных в определенный момент возможна только в одном направлении;

2) шину адреса (ША) – однонаправленную, по которой информация передается только в одном направлении, – от микропроцессора к устройствам памяти или ввода-вывода;

3) шину управления (ШУ), по которой передаются управляющие сигналы на блоки МП-системы.

Обрабатываемая в МП-системе информация вводится или выводится с помощью специальных устройств ввода и вывода информации, называемых периферийными устройствами (ПУ). Информация, необходимая для функционирования МП-системы (программы и данные), хранится в блоке памяти (в ОЗУ и ПЗУ). Контроллеры обмена предназначены для согласования интерфейсов периферийных устройств (ПУ) и микропроцессора.

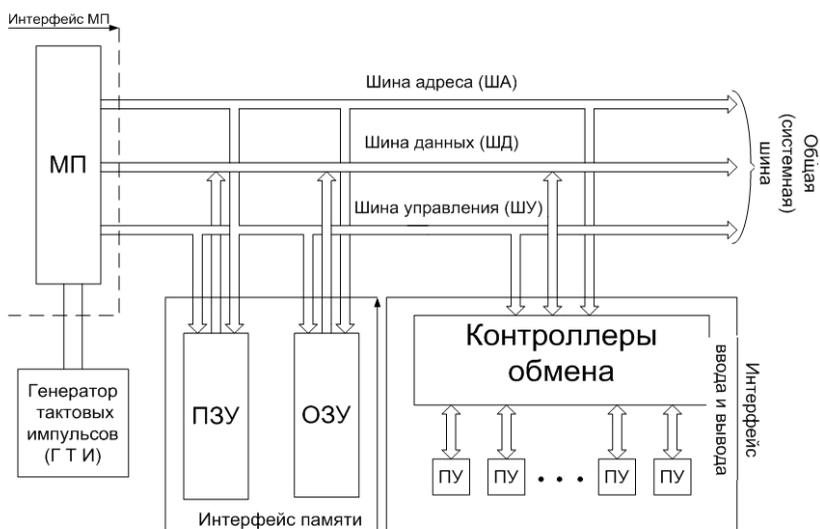


Рис. 12.1. Структурная схема микропроцессорной системы

## Архитектура и структура МП

Основным модулем МП является арифметико-логическое устройство (АЛУ) (рис. 12.2), выполняющее операции сложения, вычитания, а также логические операции «И», «ИЛИ» над двумя числами (операндами) с выдачей результата по одному выходу. Ввод данных осуществляется с помощью аккумулятора *A* и регистра временного хранения. В процессе обработки участвуют две величины, которые вводятся в указанные регистры. Результат вычисления возвращается в аккумулятор *A*. Оба входных регистра могут загружаться из источника данных, присоединенных к шине данных. Таким источником могут быть внутренние регистры *B*, *C*, *D*, *E*, *H* и *L*, устройство ввода-вывода и внешнее ЗУ. Внутренние регистры предназначены для хранения промежуточных результатов вычислений. Обозначения регистров в некоторых микропроцессорах могут быть представлены цифрами, например, *R16* или *R17* и т. д.

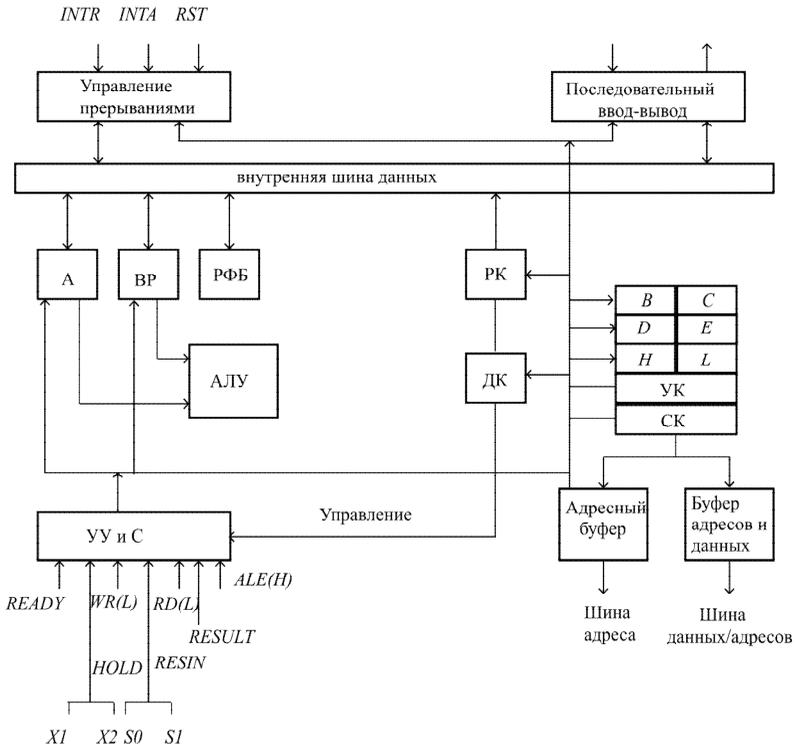


Рис. 12.2. Типовая структура МП

Требуемый порядок следования этих операций обеспечивает устройство управления (УУ), или контроллер МП. Устройство управления не только управляет работой МП, но и запускает в определенные моменты времени ряд внешних устройств. К ним относятся внешние ЗУ и порты ввода–вывода информации.

С помощью блока «Управление прерываниями» производится прерывание выполнения основной программы и переход к выполнению требуемой подпрограммы.

С помощью блока «Последовательный ввод–вывод» можно вывести последовательно из МП параллельный набор битов или ввести в МП последовательный набор битов и преобразовать его в параллельный набор. Такое преобразование требуется, если необходимо передавать данные по одной линии, например, в процессе обмена данными.

Связь МП с внешними схемами осуществляется через буферы (адресный, данных и адресов).

В структурной схеме МП для временного хранения данных имеются регистр указателя стека и счетчик команд. Указатель стека сообщает, по какому адресу стекового ЗУ, то есть в зарезервированной части ЗУ, записан последний байт.

В счетчике команд производится подсчет адресов команд программы во время выполнения вычислений. В зависимости от номера выполненной команды изменяется содержимое указателя стека.

С регистром команд соединен дешифратор, предназначенный для выбора источников, приемников и операций АЛУ.

Регистр команд и дешифратор команды используются для получения дешифрации кода команды.

Микропроцессорная система оперирует информацией в двоичной форме исчисления. Каждый разряд двоичного числа называется битом.

Информация, которую обрабатывает МП, представляется группой битов, составляющих «слово».

Количество битов в слове зависит от типа микропроцессора. Количеством битов в слове определяется, например, число разрядов приемных регистров, входящих в оперативную память микропроцессора. Кроме того, количество битов в слове, предназначенное для передачи данных, равно числу проводников, составляющих тракт передачи команд и данных МП.

Биты, образующие слово, подразделяются на группы. Группа, состоящая из 8 бит, называется байтом. Деление слова на байты позволяет упростить представление двоичного слова, применив шестнадцатеричную форму записи. Представление двоичного слова шестнадцатеричным кодом позволяет уменьшить вероятность появления ошибок при составлении программы работы МП и упростить технику ее трансляции.

Соответствие между двоичными, десятичными и шестнадцатеричными числами представлено в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Таблица соответствия между числами в различных системах счисления

Двоичное число	Шестнадцатеричное число	Десятичное число	Двоичное число	Шестнадцатеричное число	Десятичное число
0000	0	0	1000	8	8
0001	1	1	1001	9	9
0010	2	2	1010	A	10
0011	3	3	1011	B	11
0100	4	4	1100	C	12
0101	5	5	1101	D	13
0110	6	6	1110	E	14
0111	7	7	1111	F	15

Например, двоичное число 11000101 соответствует шестнадцатеричному числу *C5* и десятичному числу 197 ( $197:16 = 12 + 5 = C5$ ). Но даже в таком виде команды запомнить очень трудно, поэтому их записывают сокращенными английскими словами. Такая запись составляет язык программирования нижнего уровня – «Ассемблер». Использование языка «Ассемблер» позволяет существенно уменьшить зависимость программы от типа микропроцессора.

**Группы команд языка «Ассемблер».** «Ассемблер» принимает мнемонические инструкции от набора команд, которые представлены в табл. 12.2. Здесь приведены некоторые команды, используемые при выполнении лабораторной работы.

## Группы команд языка «Ассемблер»

Мнемоника	Операнды	Описание	Операции	Флаги
Арифметические и логические команды				
ADD	Rd, Rr	Сложение без переноса	$Rd = Rd + Rr$	Z, C, N, V, H, S
ADC	<u>Rd</u> , Rr	Сложение с переносом	$Rd = Rd + Rr + C$	Z, C, N, V, H, S
SUB	<u>Rd</u> , <u>Rr</u>	Вычитание без переноса	$Rd = Rd - Rr$	Z, C, N, V, H, S
SUBI	Rd, K8	Вычитание непосредственное	$Rd = Rd - K8$	Z, C, N, V, H, S
SBC	Rd, Rr	Вычитание с переносом	$Rd = Rd - Rr - C$	Z, C, N, V, H, S
AND	<u>Rd</u> , Rr	Логическое <b>И</b>	$Rd = Rd \cdot Rr$	Z, N, V, S
ANDI	Rd, K8	Логическое <b>И</b> с константой	$Rd = Rd \cdot K8$	Z, N, V, S
OR	Rd, Rr	Логическое <b>Или</b>	$Rd = Rd \vee Rr$	Z, N, V, S
ORI	Rd, K8	Логическое <b>Или</b> с константой	$Rd = Rd \vee K8$	Z, N, V, S
CLR	<u>Rd</u>	Очистка регистра	$Rd = 0$	Z, C, N, V, S
Команды перехода				
JMP	k	Переход	$PC = k$	None
CP	Rd, Rr	Сравнить	$Rd - Rr$	Z, C, N, V, H, S
CPC	Rd, Rr	Сравнить с учетом переноса	$Rd - Rr - C$	Z, C, N, V, H, S

Мнемо-ника	Операнды	Описание	Операции	Флаги
CPI	Rd, K8	Сравнить с учетом константы	Rd – K	Z, C, N, V, H, S
Команды передачи данных				
MOV	Rd, Rr	Скопировать регистр	Rd = Rr	None
LDI	Rd, K8	Загрузить константу	Rd = K	None
LDS	Rd, k	Загрузить значение переменной	Rd = (k)	None

Операнды имеют следующие формы:

- Rd: регистр-приемник – любые регистры от R16 до R23;
- Rr: регистр-источник – любые регистры от R16 до R23;
- b: константа (0–7), может быть выражением;
- K8: константа (0–255);
- k: константа, значение ряда, зависит от инструкции, может быть выражением.

**Примеры использования команд:**

**LDI Rd, K** – загрузка константы в регистр;

**ADD Rd, Rr** – сложение двух регистров;

**ADC Rd, Rr** – сложение двух регистров с переносом;

**SUB Rd, Rr** – вычитание двух регистров;

**SBC Rd, Rr** – вычитание двух регистров с заемом;

**MOV Rd, Rr** – пересылка между регистрами;

**AND Rd, Rr** – логическое И;

**OR Rd, Rr** – логическое ИЛИ.

### Подготовка к работе

1. Изучить краткие теоретические сведения по теме работы.
2. Выполнить индивидуальное задание.

## Индивидуальное задание

Перевести число  $X$  из десятичной формы в шестнадцатеричную форму и в двоичную форму счисления (число  $X = 8 \cdot \text{номер по журналу} + \text{номер группы}$ ).

### Методика выполнения работы

1. Открыть программу *aStudio4*.
2. Создать новый проект программы (при этом следует указать место сохранения).
3. Ввести имя проекта с использованием букв латинского алфавита и(или) цифр, например, *pr1*.
4. Выбрать платформу, в данном случае ATtiny2313.
5. Ввести предварительно разработанную программу в соответствии с заданием и вариантом.
6. Провести компиляцию программы (кнопка **Build**).
7. Запустить отладку программы (кнопка **Start Debudding**).
8. Используя клавишу F10 (команда **Step Over** меню **Debug**), просмотреть (команда **Watch** из раскрывающегося списка в меню **View**) пошагово изменения в регистрах и проанализировать результат (для этого в окне результата набрать имена соответствующих регистров).
9. Ввести ту же программу, предварительно нажав кнопку **Stop**; записать в регистры входные данные в шестнадцатеричном коде и повторить п. 6–8. Просмотреть результат в шестнадцатеричном коде.
10. Повторить п. 3–9 для задания 2.
11. Для задания 3, 4, 5 и 6 повторить п. 3–8, вводя разработанные программы в соответствии с заданиями.
12. Записать в отчет разработанные программы и результаты их выполнения.

### Задание 1

1.1. Занести в регистры  $r16$ ,  $r17$  входные данные в десятичном коде по вариантам в соответствии с табл. 12.3, сложить содержимое регистров, просмотреть и записать полученный результат. Использовать команды, представленные в табл. 12.2.

1.2. Занести в регистры  $r16$ ,  $r17$  входные данные в шестнадцатеричном коде по вариантам в соответствии с табл. 12.3, сложить

содержимое регистров, просмотреть и записать полученный результат.

Таблица 12.3

Данные для написания программы

Вариант	<i>r16</i>	<i>r17</i>	<i>r16</i>	<i>r17</i>
	в десятичной форме		в шестнадцатеричной форме	
1	5	16	0x5	0x10
2	15	26	0xF	0x1A
3	25	36	0x9	0x24
4	35	46	0x23	0x2E

### Задание 2

2.1. Занести в регистры *r16*, *r17* входные данные в десятичном коде по вариантам в соответствии с табл. 13.3, вычесть из регистра *r17* содержимое регистра *r16*, просмотреть и записать полученный результат.

2.2. Занести в регистры *r16*, *r17* входные данные в шестнадцатеричном коде по вариантам в соответствии с табл. 13.3, вычесть из регистра *r17* содержимое регистра *r16*, просмотреть и записать полученный результат.

### Задание 3

3.1. Составить программу для сложения с переносом двух десятичных чисел в соответствии с табл. 12.4, просмотреть и записать полученный результат.

Таблица 12.4

Данные для написания программы

Вариант	1-е слагаемое	2-е слагаемое
	в десятичной форме	
1	254	20
2	252	23
3	250	25
4	255	18

3.2. Составить программу для сложения с переносом двух шестнадцатеричных чисел, соответствующих десятичному, приведенным в табл. 12.4, просмотреть и записать полученный результат. При составлении программы учесть, что перенос осуществляется во второй (старший) байт, то есть необходимо выделить для этого дополнительный регистр.

#### **Задание 4**

Составить программу для вычитания с заемом двух десятичных чисел в соответствии с табл. 12.5, просмотреть и записать полученный результат. Данные вводить в шестнадцатеричной форме, выделяя регистры для младшего и старшего байтов.

*Таблица 12.5*

Данные для написания программы

Вариант	Уменьшаемое	Вычитаемое
	в десятичной форме	
1	65520	65265
2	65517	65263
3	65515	65261
4	65512	65259

#### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Индивидуальное задание.
4. Программы для сложения и вычитания содержимого регистров в десятичном и шестнадцатеричном кодах в соответствии с вариантом и результаты вычислений (для заданий 1, 2).
5. Программы для сложения с переносом и вычитания с заемом двух десятичных чисел (в программе их шестнадцатеричных эквивалентов) в соответствии с вариантом и результаты вычислений (для заданий 3, 4).
6. Выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как перевести заданное десятичное число в двоичное и шестнадцатеричное?

2. Как перевести заданное двоичное число в десятичное, восьмеричное и шестнадцатеричное?
3. Что представляет собой язык «Ассемблер»? Назовите области его использования.
4. Какие группы команд МП имеются на языке «Ассемблер»?
5. Каково назначение портов ввода–вывода? Перечислите их особенности.
6. Какие основные регистры имеются в составе МП?
7. Каково назначение АЛУ? Как оно функционирует?
8. Для какой цели предназначены программные счетчики в МП?
9. Назовите и кратко опишите состав и назначение трех системных шин МП.
10. Приведите структуру ОЗУ и ПЗУ.
11. Опишите принцип функционирования МП системы.
12. Опишите принцип функционирования МП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Основная*

1. Матвееенко, И. П. Электроника : пособие / И. П. Матвееенко – Минск : БГАТУ, 2020. – 286 с.
2. Миловзоров, О. В. Электроника : учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2015. – 408 с.
3. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник для студентов вузов по специальности телекоммуникационного и радиотехнического профилей / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Новое знание, 2011; М. : ИНФРА–М, 2011. – 688 с.
4. Электроника [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс / Минсельхозпрод РБ, УО «БГАТУ», АЭФ, Кафедра АСУП ; сост.: И. П. Матвееенко, Т. А. Костикова. – Электронные данные (16 642 048 байт). – Минск : БГАТУ, 2020.
5. Бладыко, Ю. В. Электроника. Практикум : учебное пособие / Ю. В. Бладыко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2016. – 190 с.
6. Новиков, Ю. В. Основы микропроцессорной техники : учебное пособие / Ю. В. Новиков, П. К. Скоробогатов. – 4-е изд., испр. – М. : Интернет-Университет Информационных Технологий : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 358 с.
7. Червяков, Г. Г. Электронные приборы : учебное пособие / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – 334 с.
8. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учебник / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – 2-е изд., стереотип. – М. : Горячая линия-телеком, 2016. – 768 с.
9. Новожилов, О. П. Основы микропроцессорной техники : учебное пособие. В 2 т. Т. 1 / О. П. Новожилов. – 3-е изд. – М. : РадиоСофт, 2014. – 432 с.
10. Новожилов, О. П. Основы микропроцессорной техники : учебное пособие. В 2 т. Т. 2 / О. П. Новожилов. – 3-е изд. – М. : РадиоСофт, 2014. – 336 с.

### *Дополнительная*

11. Гальперин, М. В. Электронная техника : учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ : ИНФРА–М, 2014. – 352 с.

12. Ямпурин, Н. П. Электроника : учебное пособие / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. – М. : Академия, 2011. – 238 с.
13. Васильков, А. В. Источники электропитания : учебное пособие / А. В. Васильков, И. А. Васильков. – М. : ФОРУМ, 2012. – 400 с.
14. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника : учебное пособие. – 3-изд. перераб. и доп. / Е. П. Угрюмов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. – 816 с.
15. Иванов, В. Н. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Н. Иванов, И. О. Мартынова. – М. : Академия, 2016. – 282 с.

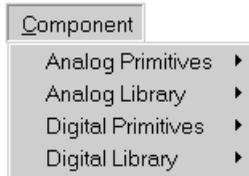
## ПРИЛОЖЕНИЕ

*MICROCAP* является программным продуктом, который позволяет: разрабатывать различные виды аналоговых и цифровых электронных схем, используя большую библиотеку активных и пассивных компонентов, а также базовых элементов цифровой техники; исследовать работу созданных схем, анализируя полученные временные диаграммы с возможностью просмотра сигнала в любом узле электронной схемы.

1. Содержание меню программы *MICROCAP-5*:



2. При построении схемы использовать кнопку меню:

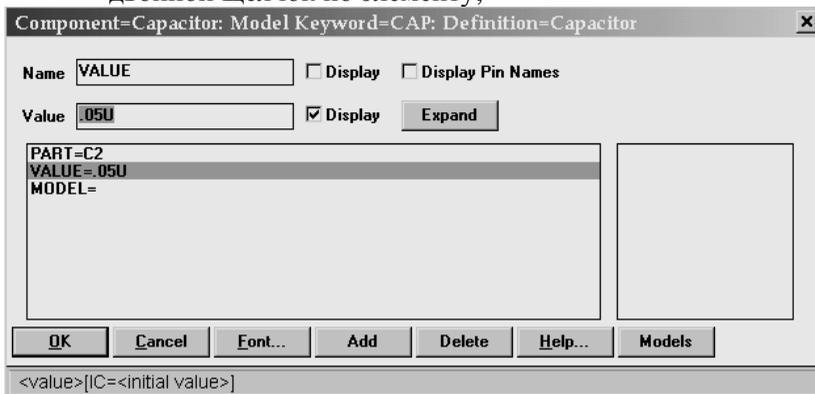


- 2.1. Для выбора резисторов и конденсаторов:

- 2.1.1. Component



- 2.1.2. Установить требуемое номинальное значение  $R$  или  $C$ .  
– двойной щелчок по элементу;



- изменение значения в строке *Value*.

## 2.2. Для выбора источников напряжения:

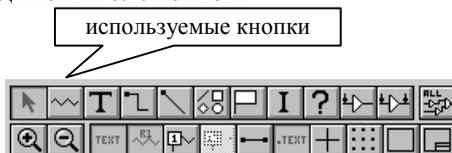


2.2.2. Установить требуемое максимальное значение напряжения источника.

## 2.3. Для заземления:

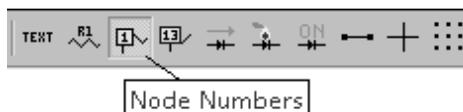


## 2.4. Для соединения элементов:

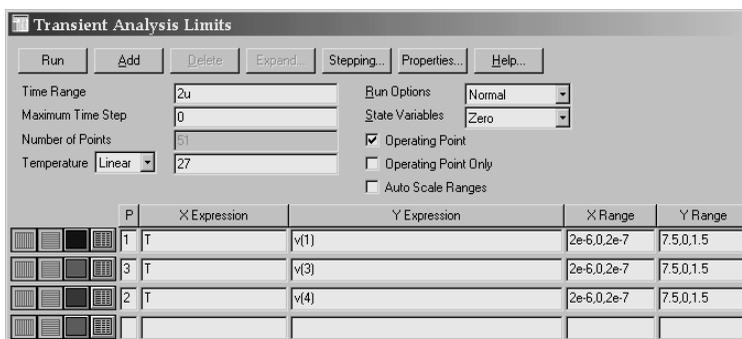


2.5. При ошибочном соединении, ненужную связь необходимо выделить, подведя курсор к линии, и, сделав один щелчок, нажать **Delete**.

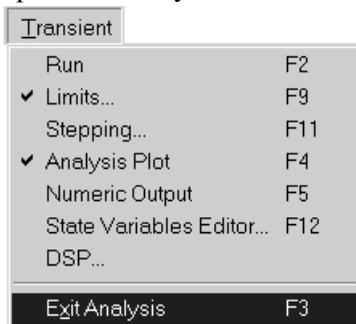
2.6. Для обозначения узлов в схеме нажать кнопку **Node Numbers**:



## 3. Для получения временных диаграмм:



4. Для выхода из режима *Analysis* использовать кнопку меню:



Учебное издание

**Матвеевко** Ирина Петровна,  
**Костикова** Татьяна Анатольевна

ЭЛЕКТРОНИКА.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *Н. М. Матвейчук*  
Редактор *Д. О. Бабакова*  
Корректор *Д. О. Бабакова*  
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 10.01.2022. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 7,64. Тираж 98 экз. Заказ 466.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.