

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра автоматизированных систем управления
производством

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ

*Практикум
по выполнению лабораторных работ*

Минск
БГАТУ
2010

УДК 621.38(076.5)
ББК 32.85я7
Э-45

*Рекомендовано научно-методическим советом
агроэнергетического факультета БГАТУ.
Протокол № 3 от 12 ноября 2009 г.*

Составители:

кандидат технических наук, доцент И. П. Матвееenko,
ассистент Т. А. Костикова,
старший преподаватель В. В. Матвееenko

Рецензенты:

зав. кафедрой «Электротехника и электроника»
Учреждения образования «Белорусский национальный технический
университет», кандидат технических наук *Ю. В. Бладыко*;
доцент кафедры вычислительной техники БГАТУ,
кандидат технических наук, доцент *А. И. Шакирин*

Элементная база электроники: практикум / сост. : И. П.
Э-45 Матвееenko, Т. А. Костикова, В. В. Матвееenko. – Минск:
БГАТУ, 2010. – 104 с.

ISBN 978-985-519-260-3.

Лабораторный практикум освещает теоретические вопросы курса «Электроника» и предоставляет методику изучения принципов работы элементов электронной техники на лабораторных стендах и на компьютере с использованием пакета прикладных программ «Microsar».

Предназначен для студентов специальностей 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство), 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства, 1-74 06 01 Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства, 1-74 06 02 Техническое обеспечение процессов хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, 1-36 12 01 Проектирование и производство сельскохозяйственной техники.

УДК 621.38(076.5)
ББК 32.85я7

ISBN 978-985-519-260-3

© БГАТУ, 2010

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ.....	5
Подготовка студентов к выполнению лабораторных работ.....	6
Порядок работы в лаборатории.....	6
Оформление отчетов и порядок отчетности по лабораторным работам.....	7
Лабораторная работа №1	
Исследование полупроводниковых диодов.....	9
Лабораторная работа №2	
Исследование стабилитронов и стабилизатора напряжения.....	22
Лабораторная работа №3	
Изучение биполярных транзисторов.....	32
Лабораторная работа № 4	
Изучение фотоэлектронных приборов и фотореле.....	42
Лабораторная работа № 5	
Исследование полевого транзистора.....	57
Лабораторная работа №6	
Исследование тиристоров.....	65
Лабораторная работа №7	
Изучение приемно-усилительных ламп.....	78
Лабораторная работа №8	
Схемы включения транзистора.....	89
ЛИТЕРАТУРА.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

Данный лабораторный практикум составлен в соответствии с программой курсов «Электроника и основы микропроцессорной техники», «Автоматика и электроника», «Электротехника и электроника» агроэнергетического и агроμηχανического факультетов БГАТУ.

Согласно учебному плану студенты выполняют цикл лабораторных работ и сдают зачеты и экзамены по теоретическому материалу.

Теоретический материал лабораторной части курса электроники изучается студентами на лекциях и самостоятельно, используя конспект лекций и рекомендуемые учебной программой учебники и учебные пособия. 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 относится следующее:

- требования техники безопасности;
- рекомендации и требования к подготовке, выполнению и отчету по выполненным работам;
- краткие теоретические сведения по материалу выполняемых работ;
- вопросы для самоподготовки;
- рекомендуемая литература;
- условные обозначения основных элементов.

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 рекомендованной 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 вопросами самопроверки, заданием к подготовке и целям, поставленным в каждой работе.

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 электроники используются напряжения 220, 30 В и некоторые другие; представляют опасность ЭДС самоиндукции, возникающие при коммуникации 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 уста-

новки (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 занятия 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

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

Содержание отчета

Отчет должен содержать формулировку цели работы, основных, решаемых в данной работе задач, электрические схемы используемых установок, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, графики зависимостей или другие графические построения, перечень используемых приборов и оборудования, расчетные фор-

мулы, 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.

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.

Если отчет не представляется, то студент не допускается к очередной работе. 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 оценкой «удовлетворительно», «хорошо», «отлично», а лабораторная работа засчитывается.

У студента на руках должно быть не более двух незащищенных отчетов по лабораторным работам, иначе он не допускается к выполнению очередной работы, которую отрабатывает во внеучебное время.

Лабораторные работы выполняются по циклам. После одного цикла работ выполняется следующий цикл.

К выполнению нового цикла работ допускаются студенты, защитившие не менее трех лабораторных работ предыдущего цикла.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Исследование полупроводниковых диодов

Цель работы: изучить систему обозначений, конструкцию и принцип работы некоторых типов полупроводниковых диодов; снять основные характеристики и определить по ним параметры диодов.

Лабораторное оборудование

1. Лабораторные установки с полупроводниковыми диодами типа ЛОЭ-2.
2. Миллиамперметр постоянного тока (0...200) мА.
3. Микроамперметр постоянного тока (0...200) мкА.
4. Вольтметр *PV* – электронный вольтметр В7-26 или др.
5. ПЭВМ.

Таблица 1.1

Основные параметры диодов

Тип приборов	$U_{пр.}$ В	$U_{обр.}$ В	$I_{выпр.}$ А	$I_{обр.}$ мкА	Диапазон раб. температур t , °С	Гарант. наработка, ч
Д 226	1	400	0,3	300	-60...+80	5000
Д 311	0,4	30	0,04	100	-40... +60	8000
Д 242В	1,5	400	10		-55... +125	8000
КД 202А	0,9	400	3,5	0,8	-60... +130	10000

Краткие теоретические сведения

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним *p-n*-переходом и двумя внешними выводами. 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. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) всех диодов имеют нелинейный характер.

Полупроводниковый диод состоит из двух слоев полупроводников с *p*- и *n*-электропроводностью. Это элемент с односторонней проводимостью, возникающей на границе раздела двух материалов

с проводимостью различного типа, которая называется электронно-дырочным или *p-n*-переходом.

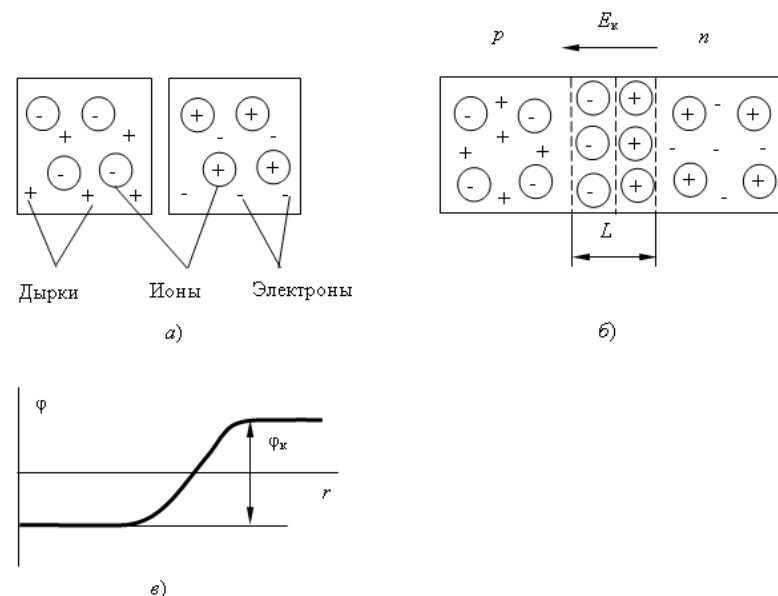


Рис. 1.1. Образование электронно-дырочного перехода:
 а – распределение носителей зарядов в *p*- и *n*-областях до контакта;
 б – образование *p-n*-перехода; в – потенциальный барьер

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, а). На границе областей возникают градиенты концентраций электронов и дырок, вследствие чего происходит диффузия дырок из *p*-области и электронов из *n*-области полупроводника. Диффузия электронов и дырок создает диффузионный ток через *p-n*-переход. В результате диффузии носителей заряда в приграничном слое происходит рекомбинация, *p*-область приобретает нескомпенсированный отрицательный заряд, а *n*-область – нескомпенсированный положительный заряд.

ный заряд, обусловленный соответственно отрицательными и положительными ионами (на рис.1.1 ионы показаны кружками). В граничном слое образуется электрическое поле, направленное от n -области к p -области (рис. 1.1, б). Электрическое поле в этом слое, называемое полем контактной разности потенциалов, вызывает дрейф неосновных носителей заряда (дырок из n -области в p -область и электронов наоборот), создающий дрейфовый ток, встречный по направлению диффузионному току.

Результирующий ток через p - n -переход отсутствует (внешняя цепь разомкнута), поэтому диффузионный ток должен быть равен по абсолютной величине дрейфовому току. Это равенство устанавливается при определенной контактной разности потенциалов ϕ_k между p - и n -областями, составляющей в германии и кремнии величину в несколько десятых долей вольта. Величина ϕ_k определяет высоту потенциального барьера p - n -перехода (рис. 1.1, в). Потенциальный барьер препятствует диффузии основных носителей заряда, следовательно, с увеличением потенциального барьера диффузионный ток должен убывать.

Если к p - n -переходу приложить внешнее электрическое поле напряженностью $E_{вн}$ путем подключения полупроводника к источнику ЭДС таким образом, что полярность основных носителей будет совпадать с полярностью внешнего источника (рис. 1.2, а), то напряженность результирующего поля в переходе $E_{рез} = E_k - E_{вн}$. При этом почти все внешнее напряжение будет приложено к запирающему слою, поскольку его сопротивление значительно больше сопротивления остальной части полупроводника. Высота потенциального барьера уменьшится и станет равной $\phi = \phi_k - E$ (рис. 1.2, б), ширина его также уменьшится. Дрейфовый ток снизится, а диффузионный возрастет, в результате чего динамическое равновесие нарушится и возникнет ток через p - n -переход. Этот ток называют прямым током, а включение p - n -перехода - прямым включением.

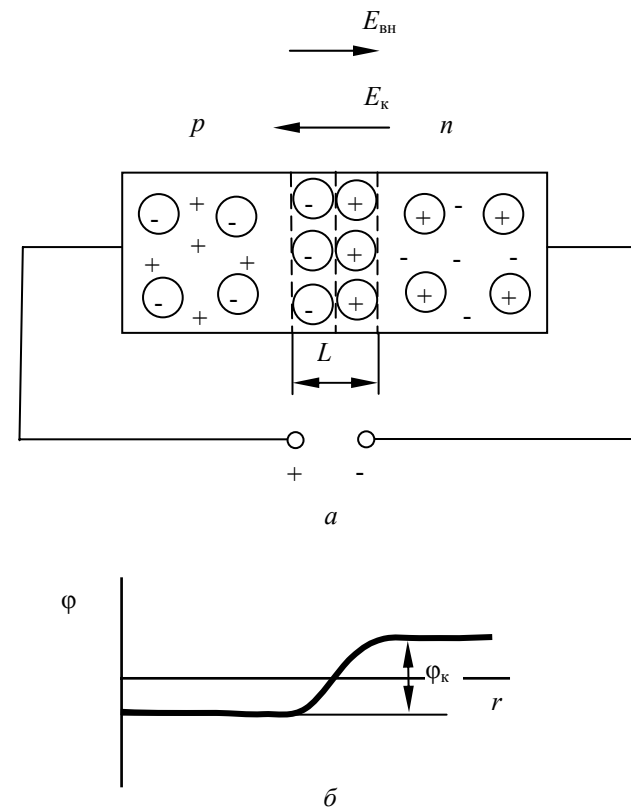


Рис. 1.2. Прямое включение p - n -перехода (а), уменьшение высоты и ширины потенциального барьера (б)

При обратном включении p - n -перехода (рис. 1.3, а) $E_{рез} = E_k + E_{вн}$, высота потенциального барьера $\phi = \phi_k + E$ (рис. 1.3, б), ширина его также увеличится. Диффузионный ток, обусловленный движением основных носителей заряда, уменьшается из-за противодействия электрического поля в запирающем слое. Дрейфовый ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда, увеличивается благодаря увеличению потенциального барьера. Таким образом, через p - n -переход возникает результирующий ток, создаваемый движением не-

основных носителей заряда. Поле запирающего слоя как бы «вытягивают» неосновные носители заряда из полупроводника. Попадая в запирающий слой, они подхватываются его полем и перемещаются через p - n -переход. 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 вентильные свойства p - n -перехода, т.е. способность проводить ток только в одном направлении.

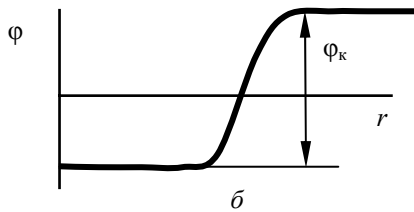
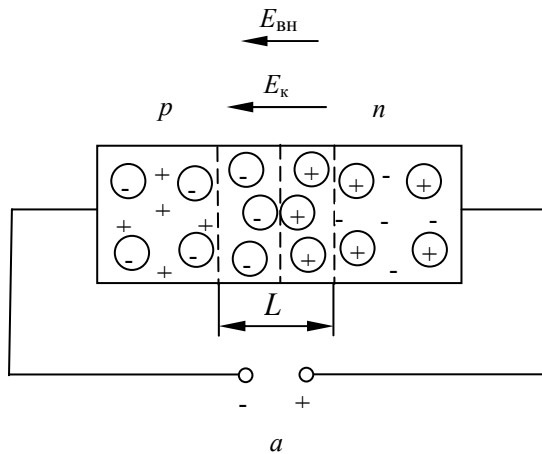


Рис. 1.3. Обратное включение p - n -перехода (а), увеличение высоты и ширины потенциального барьера (б)

На вольтамперной характеристике (ВАХ) диода (рис. 1.4) могут быть выделены четыре характерных участка. На участке AB ВАХ имеет крутой наклон и малое значение динамического сопротивления.

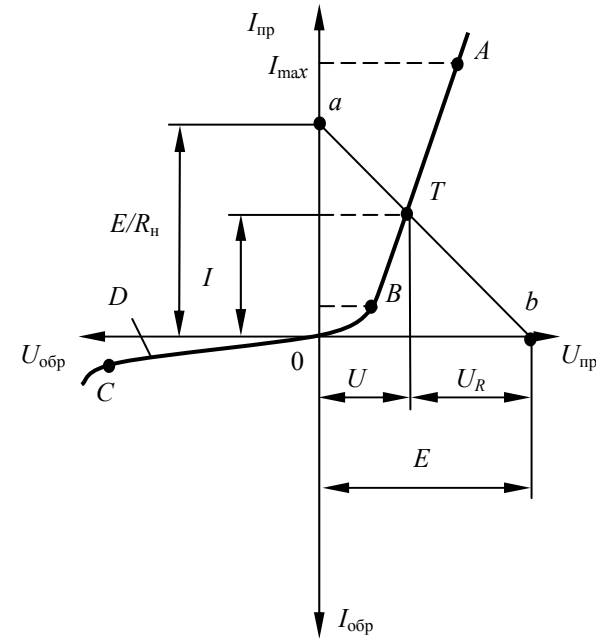


Рис. 1.4. Вольтамперная характеристика выпрямительного диода

Это участок нормальной работы диода в выпрямительном режиме. Прямой ток $I_{пр}$ ограничивается максимально допустимым значением I_{max} , гарантирующим равновесие диода, при превышении которого диод может перегреться и разрушиться. Участок от точки B с координатами $U_{пр}$, $I_{пр}$ до точки 0 характеризуется переменной крутизной.

Для выпрямительного режима этот участок не используется, однако он находит применение в схемах автоматической регулировки усиления.

Участок $0C$ отличается малыми значениями динамической проводимости и обратного тока диода, включенного в запирающем направлении. Часто его задают значением тока $I_{обр}$, которому соответствует заданное обратное напряжение $U_{обр}$.

Участок за точкой C характеризуется резким увеличением обратного тока. Величина U_{\max} (точка C) ограничивает максимальное допустимое обратное напряжение на диоде, начиная с которого в нем развивается электрический пробой, выводящий его из строя. Этот участок нерабочий.

Статические параметры диода $U_{\text{пр}}$, U_{\max} , $I_{\text{обр}}$, I_{\max} приведены в справочниках. Диод характеризуют также динамические параметры, определяющие его частотные свойства.

Выпрямительные диоды применяют в цепях управления и дискретной логики, в узлах питания, для развязок в электрических цепях, ограничения выброса напряжений при коммутации цепей.

На практике в цепь диода включается нагрузка (рис. 1.5). Расчет тока этой цепи выполняют графически. Для этого на вольт-амперной характеристике диода $I = f(U)$ строят линию нагрузки ab (рис. 1.4) по уравнению $I = U/R_n = E - U/R_n$, соединив точки E/R_n (при $U = 0$) и E (при $I = 0$) прямой.

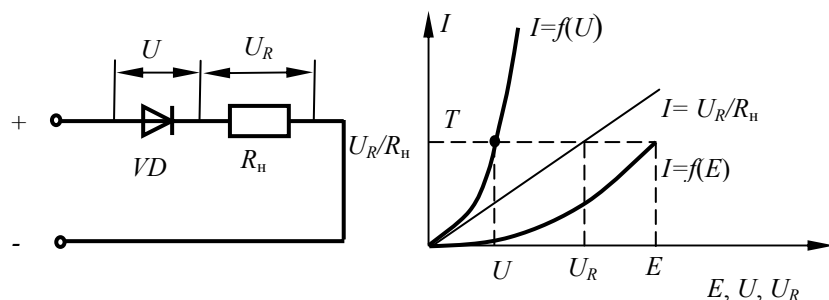


Рис. 1.5. Включение диода в цепь и графический расчет тока цепи

Рабочая точка T определяет режим при E и R_n , т.е. определяет значение I и U . Характеристика $I = f(E)$ такой цепи можно снять экспериментально или построить графически. В последнем случае на графике $I = f(U)$ диода наносят точку, соответствующую, произвольному напряжению U_R и точку U_R/R_n . Через эту точку и начало координат проводится прямая $I = U_R/R_n$. Складывая для нескольких

значений тока напряжения U и U_R (т.к. $E = U + U_R$), получают точки результирующей характеристики $I = f(E)$. Если $R_n \gg r_{\text{пр}}$, графический расчет можно не производить.

Подготовка к работе

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

Программа и методика выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 1.6), подключив к стенду необходимые приборы.

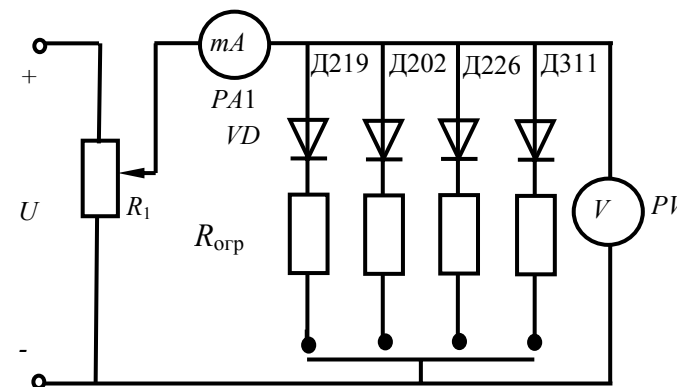


Рис. 1.6. Схема лабораторной установки

Таблица 1.2

Результаты измерений для построения вольтамперных характеристик диодов

Тип диода	Результаты измерений
Д 226	$I_{пр}, \text{мА}$ $U_{пр}, \text{В}$ $I_{обр}, \text{мА}$ $U_{обр}, \text{В}$
Д 219	$I_{пр}, \text{мА}$ $U_{пр}, \text{В}$ $I_{обр}, \text{мА}$ $U_{обр}, \text{В}$
Д 202	$I_{пр}, \text{мА}$ $U_{пр}, \text{В}$ $I_{обр}, \text{мА}$ $U_{обр}, \text{В}$
Д 311	$I_{пр}, \text{мА}$ $U_{пр}, \text{В}$ $I_{обр}, \text{мА}$ $U_{обр}, \text{В}$



Рис. 1.7. Передняя панель лабораторного стенда ЛОЭ-2

2. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики $I_{пр} = f(U_{пр})$:

а) потенциометр регулировки напряжения питания R_1 установить в крайнее левое положение против часовой стрелки, переключатель S_1 лабораторной панели установить в положение «прямое», переключателем S_2 подключить диод в положение Д226, SA_3 – положение «U». Включить выключатель напряжения питания SA , при этом загорится сигнальная лампа зеленого цвета;

б) с помощью R_1 изменять напряжение на входе цепи от нуля до U_{max} . Получить не менее (7–8 точек). Измерить прямое напряжение $U_{пр}$ и прямой ток диода $I_{пр}$ миллиамперметром. Повторить эти же измерения для диодов Д311, Д242, КД202. Результаты измерений для каждого из диодов занести в таблицу 1.2.

3. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики $I_{обр} = f(U_{обр})$:

а) установить переключатель S_1 в положение «Обратное», установить R_1 в крайнее левое положение, переключатель S_2 в положение «Д226», включить выключателем SA напряжение питания;

б) изменять с помощью R_1 напряжение на входе цепи $U_{вх}$ от нуля до U_{max} (7–8 точек). Измерить обратное $U_{обр}$ напряжение и обратный ток диода $I_{обр}$ вольтметром и микроамперметром. У некоторых диодов можно сделать измерения только в 2–3 точках;

в) повторить эти же намерения для другого типа диода, изменяя положение переключателя S_2 .

Результаты занести в таблицу 1.2.

Методика выполнения работы на компьютере

1. Вызвать программу «MICROCAP».

2. Открыть файл «LAB 1»: на экране появится схема для исследования трех различных типов полупроводниковых диодов (рис. 1.8), 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 таблице 1.3.

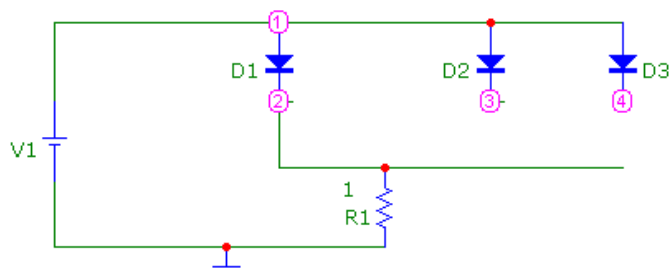


Рис. 1.8. Схема для исследования полупроводниковых диодов

Таблица 1.3

Основные параметры диодов

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

3. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики диода $D1$ $I_{пр} = f(U_{пр})$, изменяя $U_{пр}$ от нуля до максимального рабочего напряжения, указанного в таблице 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), где ток $I_{пр}$ показан зеленым цветом, напряжение $U_{пр}$ – синим цветом. Результаты занести в таблицу 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 таблице 1.3 для данного типа диода (снять 5–6 точек), в соответствии с методикой п. 3.

7. Руководствуясь методикой п. 3 и п. 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 таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Результаты измерений для построения вольтамперных характеристик диодов

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

По результатам измерений:

а) построить на одном графике экспериментально снятые вольт-амперные характеристики всех диодов. Масштаб для прямой и обратной ветвей характеристик может быть различным;

б) определить для исследуемых диодов по характеристикам дифференциальное сопротивление $r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}}$, прямое сопротивление постоянному току $R_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / I_{\text{пр}}$, обратное сопротивление постоянному току $r_{\text{обр}} = U_{\text{обр}} / I_{\text{обр}}$. Данные расчетов занести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5.

Тип диодов	Сопротивление (Ом, МОм)		
	$r_{\text{д}}$	$R_{\text{пр}}$	$r_{\text{обр}}$

Содержание отчета

2. Цель работы.
3. Схемы исследуемых цепей.
4. Спецификация приборов.
5. Таблицы опытных и расчетных данных.
6. Графики зависимостей, указанные в работе.
7. Основные формулы, используемые при расчетах.
8. Выводы по работе.
9. Ответы на приведенные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о конструкции плоскостных и точечных диодов.
2. Объясните принцип действия полупроводникового диода.
3. Объясните процессы, происходящие в области p - n -перехода при отсутствии внешнего источника питания.
4. Объясните процессы, происходящие в области p - n -перехода при включении внешнего источника в прямом и обратном направлениях.
5. Какими основными параметрами характеризуются полупроводниковые диоды?
6. Как влияет температура окружающей среды на характеристики и параметры диода?
7. Как рассчитываются сопротивления диода $R_{\text{пр}}$, $r_{\text{обр}}$, $r_{\text{диф}}$?
8. Приведите примеры практического использования диодов.
9. Проанализируйте ВАХ диода.
10. Расскажите о маркировке диодов.
11. Расскажите о классификации диодов.

Исследование стабилитронов и стабилизатора напряжения

Цель работы: изучить систему обозначений, конструкцию и принцип работы некоторых типов полупроводниковых стабилитронов; снять основные характеристики и определить по ним параметры стабилитронов; исследовать работу стабилизаторов напряжения.

Лабораторное оборудование

1. Лабораторные установки с полупроводниковыми стабилитронами.
2. Миллиамперметр $PA1$ 150 мА.
3. Миллиамперметр $PA2$ 150 мА.
4. Вольтметр $PV1$ 30 В.
5. Вольтметр $PV2$ – электронный вольтметр В7-26 или др.
6. ПЭВМ.

Таблица 2.1

Основные параметры стабилитронов

Тип прибора	$U_{\text{ст}}$ В	$I_{\text{стmin}}$ мА	$I_{\text{стmax}}$ мА	R , Ом	Диапазон раб. температур T , °С	Гарант. наработка, ч
Д814Е	8...9,5	3	36	10	-55...+100	8000
Д815Е	15	25	550	3,8	-60...+100	5000

Краткие теоретические сведения

Стабилитрон представляет собой плоскостной диод, изготовленный из кремния с большой концентрацией примеси.

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 $R_{\text{огр}}$ 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. Напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ стабилитрона определяется напряжением пробоя. Рабочий участок на вольтамперной характеристике

(рис. 2.1) ограничен минимально и максимально допустимым током стабилизации $I_{ст\ min}$, $I_{ст\ max}$.

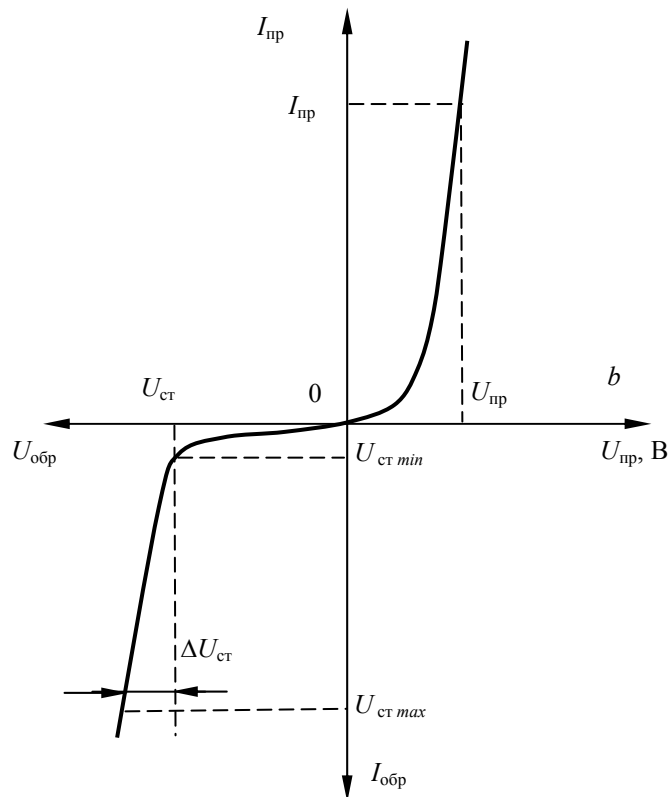


Рис. 2.1. Вольтамперная характеристика стабилизатора

Максимально допустимый ток стабилизации определяется максимальной допустимой мощностью рассеяния стабилизатора P_{max} , а минимальный ток - началом устойчивого пробоя. Все изменения напряжения источника E при его нестабильности почти полностью поглощаются $R_{орг}$. Это наиболее частый режим работы стабилизатора (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;

$U_{ст}$ - напряжение стабилизации;

$E = |E - E|$ - отклонение величины напряжения источника от его среднего значения, соответствующего $U_{ст}$;

$\Delta U_{ст} = (U_{ст} - U_{ст})$ - изменение напряжения стабилизации, соответствующее изменению на ΔE напряжения источника.

Полупроводниковый стабилизатор практически может обеспечить $K_{ст}$ порядка десятков.

Подготовка к работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы и подготовить бланк для выполнения отчета.
2. Изучить конструкции, условные обозначения и основные параметры полупроводниковых стабилизаторов, размещенных на стенде.
3. Ответить на приведенные в работе вопросы.

Программа и методика выполнения работы

1. Изучить основные параметры и условные обозначения полупроводниковых стабилизаторов, размещенных на стенде.

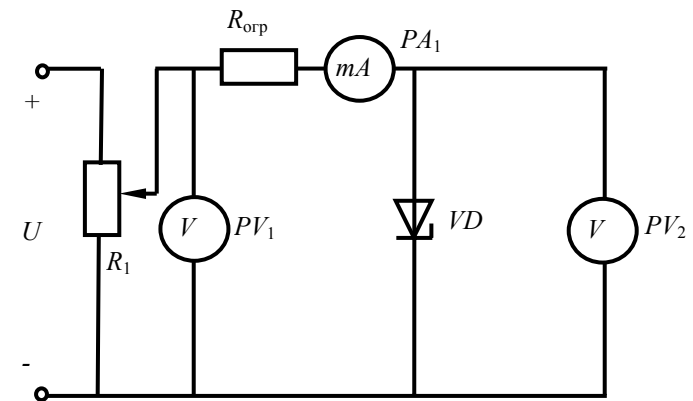


Рис. 2.2. Схема включения стабилизатора для снятия прямой и обратной ветви вольтамперной характеристики

2. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики полупроводникового стабилитрона $I_{пр} = f(U_{пр})$. При этом стабилитрон включается по схеме (рис. 2.2):

а) переключатель SA на лабораторной панели установить в положение «прямое»;

➤ потенциометр регулировки напряжения питания R_1 установить в крайнее левое против часовой стрелки положение, соответствующее минимальному значению напряжения питания;

➤ переключатель SA_3 в положение «Вкл.»;

➤ переключатель SA_4 в положение «Д814Е»;

➤ включить выключатель напряжения питания SA , при этом загорится сигнальная лампа;

б) изменять с помощью R_1 напряжение на входе цепи $U_{вх}$ от нуля до $U_{вх\ max}$ (7–8 точек). Измерить прямое напряжение $U_{пр}$ и прямой ток стабилитрона $I_{ст\ пр}$;

в) повторить эти же измерения для стабилитрона Д815Е.

Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерений для построения прямой ветки вольтамперной характеристики

Д814Б			Д815Е		
$U_{вх}, В$	$U_{пр}, В$	$I_{ст}, мА$	$U_{вх}, В$	$U_{пр}, В$	$I_{ст}, мА$

3. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики стабилитрона $I = f(U_{обр})$:

а) установить переключатель S_4 в положение «0»; установить R_1 в крайнее левое положение, установить переключатель S_2 в положение «обратное», переключатель S_3 - в положение «Д814Б»;

б) напряжение на входе цепи изменять от нуля до $U_{вх\ max}$, фиксируя при этом напряжение на входе и выходе схемы и ток стабилитрона до значения $I_{max} = 36 мА$;

в) повторить эти же измерения для стабилитрона типа Д815Е. Результаты измерений занести таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Результаты измерений для построения обратной ветки вольтамперной характеристики

Д814Б			Д815Е		
$U_{вх}, В$	$U_{обр}, В$	$I_{ст}, мА$	$U_{вх}, В$	$U_{обр}, В$	$I_{ст}, мА$

4. Изучить режимы работы стабилизатора напряжения со стабилитроном Д814 (Д815Е).

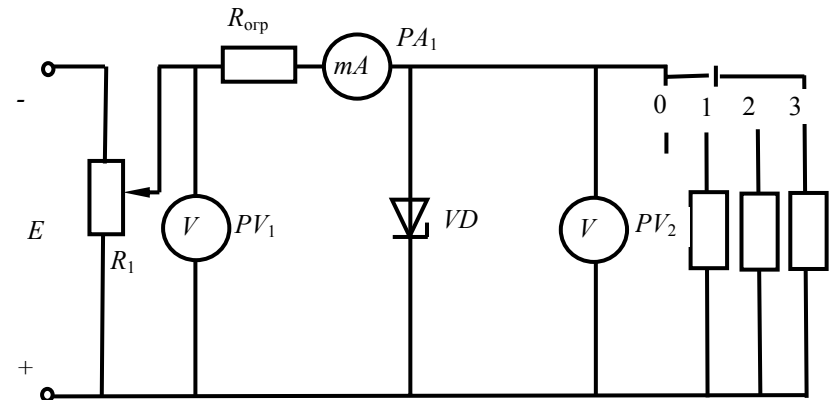


Рис. 2.3. Схема включения стабилитрона для изучения работы стабилизатора напряжения

Режим работы при $R_H = const$; $U_{вх} = var$:

а) переключатель S_3 поставить в положение «Д814Б»;

б) установить переключатель S_4 в положение «3» ($R_H = 3 кОм$);

в) с помощью R_1 установить для Д814Б значение $I_{ст} = 20 мА$.

Измерить входное напряжение $U_{вх} = E$, общий ток I , U . Ток на-

грузки I_H вычисляется по 1-му закону Кирхгофа.

Результаты измерений занести в таблицу 2.4.

Изменять при помощи R_1 входное напряжение до получения значения $I_{ст\ min} = 3\ \text{мА}$, затем до $I_{ст\ max} = 30\ \text{мА}$. Измерить и рассчитать в обоих случаях значения $U_{вх}$, I , I_H , $I_{ст}$, U .

Таблица 2.4

Результаты измерений для изучения режима работы стабилизатора напряжения при $R_H = \text{const}$; $U_{вх} = \text{var}$

$I_{ст}$, мА	Измерено			Вычислено		
	$U_{вх}$	I , мА	$U_{ст}$	I_H , мА	$\Delta U_{вх}/U_{вх}$	$\Delta U_{ст}/U_{ст}$
3						
10						
15						
20						
25						
30						

Режим работы при $U_{вх} = \text{const}$, $R_H = \text{var}$:

г) установить значение $I_{ст} = 20\ \text{мА}$;

д) переключатель нагрузок SA установить поочередно в положения «1» ($R_H = 0,5\ \text{кОм}$), «2» ($R_H = 1,5\ \text{кОм}$) и «3» ($R_H = 3\ \text{кОм}$). Для этих опытов занести в таблицу 2.5 значения параметров I , $I_{ст}$, I_H , $U_{ст}$;

Таблица 2.5

Результаты измерений для изучения режима работы стабилизатора напряжения при $R_H = \text{var}$; $U_{вх} = \text{const}$

R_H , кОм	Измерено			Вычислено	
	I , мА	$I_{ст}$, мА	$U_{ст}$, В	I_H , мА	$\Delta U_{ст}/U_{ст}$
0,5					
1,5					
3,0					

е) повторить эксперименты для второго стабилизатора типа Д815Е.

Методика выполнения работы на компьютере

1. Вызвать программу «MICROCAP».

2. Открыть файл «LAB 2»: на экране появится схема для исследования двух различных типов полупроводниковых стабилизаторов (рис. 2.4), где $V1$ – источник напряжения; $D1$ – диод D2C133A; $D2$ – диод D2C515A; $R1$ – сопротивление нагрузки, равное 100 Ом; $R2$, $R3$, $R4$ – сопротивления нагрузки, равные, соответственно, 0,5 кОм, 1,5 кОм, 3 кОм.

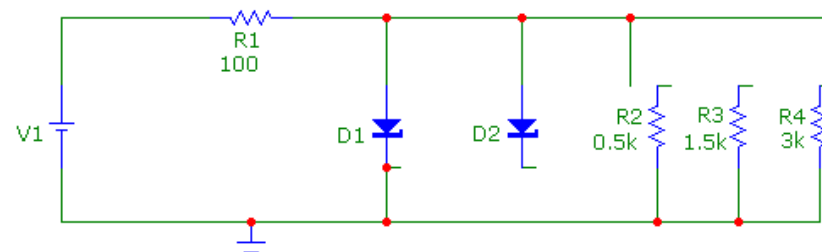


Рис. 2.4. Схема для исследования полупроводниковых диодов

3. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики диода $D1$ $I_{пр} = f(U_{пр})$, изменяя $U_{вх}$ от нуля до максимального рабочего напряжения, 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 $I_{пр}$ и прямого напряжения $U_{пр}$, воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где ток $I_{пр}$ для диода $D1$ показан черным цветом, а напряжение $U_{пр}$ для диода $D1$ – зеленым цветом. Результаты занести в таблицу 2.2.

6. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики диода $D2$ $I_{пр} = f(U_{пр})$, изменяя $U_{вх}$ от нуля до максимального рабочего напряжения, снять 8–10 точек.

7. Установить прямое напряжение источника напряжения $V1$ (значение напряжения на $V1$ устанавливается двойным щелчком по элементу - см. приложение);

8. 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 ток $I_{пр}$ для диода D2 показан фиолетовым цветом, а напряжение $U_{пр}$ для диода D2 – красным цветом. Результаты занести в таблицу 2.2.

9. Снять обратную ветвь вольтамперной характеристики диода D1 $I_{обр} = f(U_{обр})$, изменяя $U_{обр}$ от нуля до максимального значения обратного напряжения (–8 В), снять 8–10 точек в соответствии с методикой п. 3. Результаты занести в таблицу 2.3.

10. 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 8–10 точек в соответствии с методикой п. 4. Результаты занести в таблицу 2.3.

11. Изучить режимы работы стабилизатора напряжения со стабилитроном D1 (или D2).

11.1. В первом режиме работы стабилизатора напряжения:

- установить сопротивление нагрузки $R_4 = 3$ кОм;
- изменять входное напряжение $U_{вх}$ в соответствии со значениями, приведенными в таблице 2.6;
- измерить значения напряжения стабилизации $U_{ст}$, тока стабилитрона $I_{ст}$, входного тока $I_{вх}$ (показаны на временных диаграммах синим цветом). Ток нагрузки $I_{н}$ вычисляется по 1-му закону Кирхгофа. Результаты занести в таблицу 2.6.

Таблица 2.6

$U_{вх}$	Измерено			Вычислено		
	$U_{ст}$	$I_{ст}$	$I_{вх}$	$I_{н}$	$\Delta U_{ax} / U_{ax}$	$\Delta U_{cm} / U_{cm}$
-4						
-5						
-6						
-7						
-8						

11.2. Во втором режиме работы стабилизатора напряжения: установить входное напряжение $U_{вх} = -5,5$ В, что соответствует току стабилизации $I_{ст} = 20,5$ мА. Измерить параметры работы стабилизатора во втором режиме при $U_{вх} = \text{const}$, $R_{н} = \text{var}$: ток стабилизации $I_{ст}$, входной ток $I_{вх}$, напряжение стабилизации $U_{ст}$. Ток нагрузки $I_{н}$ вычисляется по 1-му закону Кирхгофа. Результаты занести в таблицу 2.6.

По результатам измерений следует:

- построить на одном графике в одной системе координат вольтамперные характеристики стабилитронов D814В и D815Е;
- определить основные параметры стабилитронов:
 $U_{ст}$, $U_{обр}$, $I_{обр}$, $I_{ст \text{ min}}$, $I_{ст \text{ max}}$, $r_{ст}$, $R_{ст}$.
Найденные значения занести в таблицу 2.7;

Таблица 2.7

Определение основных параметров стабилитрона

Тип стаби-литрона	Основные параметры						
	$U_{ст}$, В	$U_{обр}$, В	$I_{обр}$, мА	$I_{ст \text{ min}}$, мА	$I_{ст \text{ max}}$, мА	$r_{ст}$, Ом	$R_{ст}$, Ом

- определить относительное изменение напряжения стабилизации $\Delta U_{ст} / U_{ст}$;
- определить коэффициент стабилизации $K_{ст}$.

Содержание отчета

- Цель и программа работы.
- Схемы исследуемых цепей.
- Спецификация приборов.
- Таблицы опытных и расчетных данных.
- Графики зависимостей, указанные в работе.
- Основные формулы, используемые при расчетах.
- Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- В чем состоит принцип работы полупроводникового стабилизатора?

2. Почему в качестве материала для изготовления данного типа диода используется кремний?

3. Расскажите о конструктивном оформлении и условном обозначении полупроводниковых стабилитронов.

4. Начертите и объясните схему включения полупроводникового стабилитрона.

5. Начертите вольтамперную характеристику полупроводникового стабилитрона и объясните ее.

6. Перечислите основные параметры полупроводникового стабилитрона и объясните, как они определяются по характеристикам?

7. Как изменяются токи I , $I_{ст}$ и $I_{н}$ при изменении E ?

8. Каковы режимы работы стабилизатора напряжения?

9. Как можно увеличить коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения?

10. Как можно увеличить напряжение стабилизации стабилизатора?

11. Для каких целей можно использовать стабилитроны в электрических схемах?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Изучение биполярных транзисторов

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

Лабораторное оборудование

1. Биполярный транзистор МП42А, (КТ315Б). Основные параметры транзистора приведены в таблице 3.1.

2. Вольтметр электронный универсальный В7-26.

3. Лабораторная установка типа ЭО-4, ЛОЭ-2.

4. ПЭВМ.

Таблица 3.1

Основные параметры транзисторов

Тип транзистора	P_{\max} , мВт	$U_{кэ\max}$, В	$I_{к\max}$, мА	$h_{21, \varepsilon}$	F_{β} , МГц	$U_{кэнас}$, В	$U_{бэнас}$, В	t_s , °C
МП42А	200	15	150	30...50	1	0,2	0,4	-60... +70
КТ315Б	100	30	100	20...250	120	0,4	0,6	-40...+100

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. 3.1).

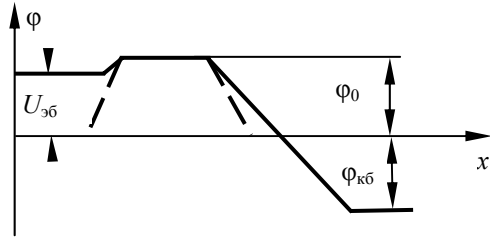


Рис. 3.1. Потенциальные барьеры на границах *p*- и *n*-областей

При включении эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного – в обратном (сплошная линия, рис. 3.1), число дырок, которые могут преодолеть барьер эмиттерного перехода, увеличивается, концентрация их в базе возрастает.

Подходя к коллекторному переходу, дырки вытягиваются полем перехода в коллекторную область. Часть их рекомбинирует в базе (1...10%). Токи в транзисторе связаны соотношением $I_э = I_к + I_б$. Связь между токами и приложенными напряжениями выражается входными и выходными характеристиками. Вид их зависит от схемы включения транзистора. Наибольшее распространение получили малосигнальные *h*-параметры. Они могут быть определены по характеристикам транзистора (рис. 3.2).

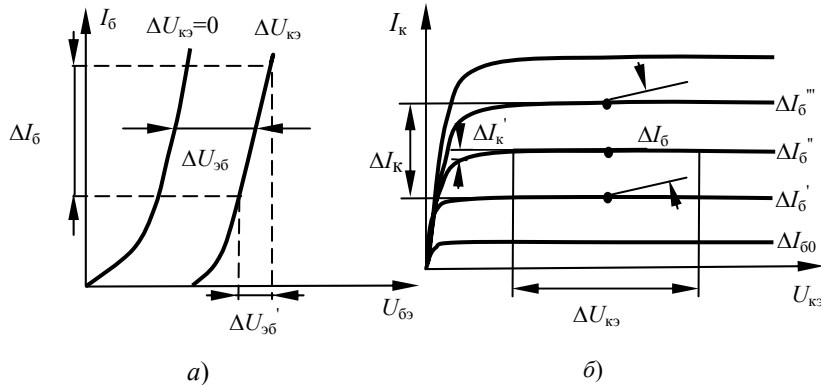


Рис. 3.2. Определение *h*-параметров:

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

Например (рис. 3.2, *б*), для схемы ОЭ методом двух точек по заданной точке *T*, взяв приращения токов и напряжений, можно найти по выходной характеристике коэффициент передачи тока при $U_кэ = \text{const}$ и выходную полную проводимость транзистора при $I_э = \text{const}$, т.е. $h_{21} = \Delta I_к / \Delta I_б$ и $h_{22} = \Delta I_к / \Delta U_кэ$.

По входной характеристике (рис. 3.2, *а*) можно найти коэффициент обратной связи по напряжению и входное сопротивление транзистора при $U_кэ = \text{const}$. В режиме усиления в выходную цепь включают нагрузку $R_н$. Ток коллектора $I_к$ теперь будет зависеть не только от свойств транзистора, но и от величины сопротивления $R_н$. Поскольку для выходной цепи в этом случае справедливо уравнение $E_к = U_кэ + I_к R_н$, то построение линии нагрузки производится по точкам ее пересечения с осями координат на семействе выходных характеристик так же, как это делалось для диода (см. лаб. работу №1): определяется точка $E_к / R_н$ (при $U_кэ = 0$), точка *E* (при $I_к = 0$) и через эти точки проводится прямая (линия нагрузки).

На линии нагрузки рабочий участок *АБ* (рис. 3.3, *а*) обеспечивает получение наибольшей неискаженной полезной мощности. Положение рабочей точки при равенстве отрезков $AT = TB$ обеспечивает малые нелинейные искажения, если сопротивление источника входных сигналов значительно больше $R_{вх}$ транзистора (генератор тока).

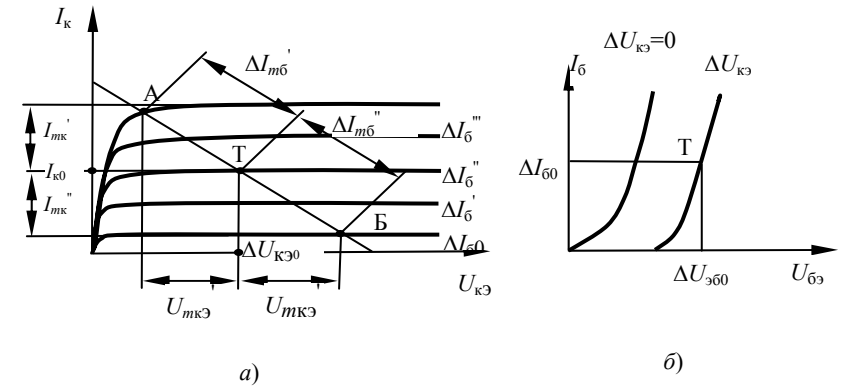


Рис. 3.3. Определение токов и напряжений покоя:

a – на семействе выходных характеристик; *б* – на семействе входных характеристик

Рабочая точка T на нагрузочной прямой определяет значение постоянного тока (ток покоя) базы $I_{б0}$ и коллектора $I_{к0}$, постоянного напряжения (напряжения покоя) коллектор-эмиттер $U_{кэ0}$, амплитуды полуволн тока базы $I_{мб}$ и $I_{мб}$, тока коллектора $I_{мк}$, $I_{мк}$ и напряжение на коллекторе $U_{мк}$, $U_{мк}$. Перенесенная на входную характеристику величина $I_{б0}$ (рис. 3.3, б) определяет на ней положение рабочей точки T и значение постоянного напряжения (напряжения покоя) эмиттер-база $U_{эб0}$. Сопротивление резистора $R_б$, через которое от источника $E_к$ подается постоянное напряжение базы $U_{эб0}$, находится из выражения:

$$R_б = \frac{E_к - U_{эб0}}{I_{б0}}; \quad h_{12} = \frac{\Delta U_{эб}}{\Delta U_{кб}}; \quad h_{11} = \frac{\Delta U_{эб}}{\Delta I_б}$$

Подготовка к работе

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

Программа и методика выполнения работы

1. Изучить конструкцию, основные параметры и условное обозначение транзисторов, размещенных на стенде.
2. Собрать схему (рис. 3.4), установив переключатели и выключатели в необходимое положение.

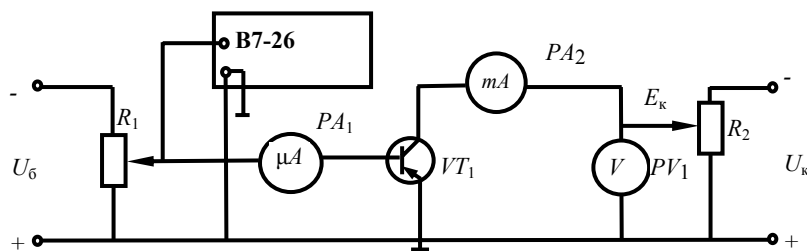


Рис. 3.4. Схема исследования биполярного транзистора

3. Снять семейство входных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ) $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$:

а) включить питание прибора В7-26, дать ему прогреться 1,5...3 мин, установить переключатель пределов на требуемый предел измеряемых напряжений;

б) установить ручкой «Установка 0» нуль прибора В7-26;

в) на лабораторной установке ЭО-4 ручкой «Рег. напряжения $U_{вых}$ » установить напряжение коллектора $E_к = U_{кэ} = 0$;

г) вращением ручки «Рег. напряжения $U_{вх}$ » по часовой стрелке изменять ток базы $I_б$ от 0 до 100 мкА через каждые 10 мкА. Измерять вольтметром напряжение $U_{бэ}$. Измеренные значения $U_{бэ}$ занести в таблицу 3.2;

повторить пункт (г) для $U_{кэ} = -5$ В и $U_{кэ} = -10$ В.

Таблица 3.2

Результаты измерений
для построения семейства входных характеристик

$U_{бэ}, \text{В}$	$U_{кэ} = 0$	$U_{кэ} = -5 \text{ В}$		$U_{кэ} = -10 \text{ В}$	
	$I_б, \text{мкА}$	$U_{бэ}, \text{В}$	$I_б, \text{мкА}$	$U_{бэ}, \text{В}$	$I_б, \text{мкА}$
	0				
	10		10		10
	20		20		20
	30		30		30
	40		40		40
	50		50		50
	60		60		60
	70		70		70
	80		80		80
	90		90		90
	100		100		100

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

а) установить ручку «Рег. напряжения E_k » против часовой стрелки до упора;

б) установить ручкой «Рег. напряжения $U_{вх}$ » ток $I_б = 10 \text{ мкА}$;

в) вращением ручки «Рег. напряжения E_k » по часовой стрелке изменить напряжение на коллекторе через 0,25 В от 0 до 1 В и через 1 В от 1 В до 10 В. Измерять значение коллекторного тока. Измеренные значения занести в таблицу 3.3;

г) повторить измерения для токов базы 20 мкА, 40 мкА, 60 мкА и 80 мкА.

Таблица 3.3

Результаты измерений для построения семейства выходных характеристик

$I_б = 10 \text{ мкА}$		$I_б = 20 \text{ мкА}$		$I_б = 40 \text{ мкА}$		$I_б = 60 \text{ мкА}$		$I_б = 80 \text{ мкА}$	
$U_{кэ}$	I_k	$U_{кэ}$	I_k	$U_{кэ}$	I_k	$U_{кэ}$	I_k	$U_{кэ}$	I_k
0		0		0		0		0	
0,25		0,25		0,25		0,25		0,25	
0,5		0,5		0,5		0,5		0,5	
0,75		0,75		0,75		0,75		0,75	
1		1		1		1		1	
2		2		2		2		2	
3		3		3		3		3	
4		4		4		4		4	
5		5		5		5		5	
6		6		6		6		6	
7		7		7		7		7	
8		8		8		8		8	
9		9		9		9		9	
10		10		10		10		10	

5. Руководствуясь методикой п. 3, снять семейство входных характеристик при $R_k = 1 \text{ кОм}$ для $E_k = -5 \text{ В}$ и $E_k = -10 \text{ В}$.

Результаты измерений занести в таблицу 3.4.

Результаты измерений для построения семейства входных характеристик при $R_k = 1 \text{ кОм}$

$E_{кэ} = -5 \text{ В}$		$E_{кэ} = -10 \text{ В}$	
$U_{бэ}, \text{ В}$	$I_б, \text{ мкА}$	$U_{бэ}, \text{ В}$	$I_б, \text{ мкА}$
	10		10
	20		20

	100		100

Методика выполнения работы на компьютере

1. Вызвать программу «MICROCAP».
2. Открыть файл «ЛАБ 3_1», на экране появится схема включения биполярного транзистора (рисунок 3.5), 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.

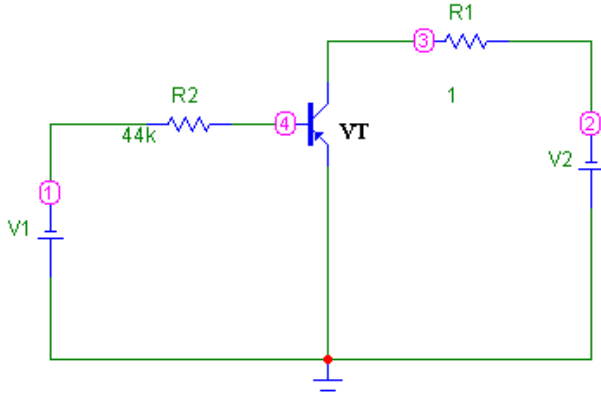


Рис. 3.5. Схема включения биполярного транзистора

Таблица 3.6

$U_{кз} = -5 В$			$U_{кз} = -10 В$		
$U_{бз}, В$	$I_б, мкА$	$R2, кОм$	$U_{бз}, В$	$I_б, мкА$	$R2, кОм$

3. Снять семейство входных характеристик биполярного транзистора $I_б = f(U_{бз})$, при $U_{кз} = const$.

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

5. Изменять ток базы $I_б$ от 0 до 100 мкА через каждые 10 мкА (изменение $I_б$ производить, изменяя значение сопротивления $R2$ в соответствии с таблицей 3.5). Определить значения напряжения $U_{бз}$, воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где ток $I_б$ показан зеленым цветом, напряжение $U_{кз}$ – синим цветом, напряжение источника $V2$ – красным цветом, напряжение $U_{бз}$ – фиолетовым. Результаты занести в таблицу 3.5.

6. Повторить измерения для напряжения $U_{кз} = -5 В$ и $U_{кз} = -10 В$ в соответствии с таблицей 3.5.

Таблица 3.5

$U_{кз} = 0 В$			$U_{кз} = -5 В$			$U_{кз} = -10 В$		
$U_{бз}, В$	$I_б, мкА$	$R2, кОм$	$U_{бз}, В$	$I_б, мкА$	$R2, кОм$	$U_{бз}, В$	$I_б, мкА$	$R2, кОм$
	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

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

Результаты занести в таблицу 3.6, при этом необходимо подкорректировать значения $R2$ для получения заданных значений тока базы $I_б$ (ток $I_б$ изменяется от 0 до 100 мкА через каждые 10 мкА).

8. Снять семейство статических выходных характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, $I_к = f(U_{кз})$, при $I_б = const$:

открыть файл «ЛАБ 3_2»;

установить ток базы $I_б = 10 мкА$;

изменять напряжение $U_{кз} (V2)$ от 0 В до 1 В через 0,25 В и через 1 В от 1 В до 10 В в соответствии с таблицей 3.3. Определить ток коллектора $I_к$, воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где ток $I_б$ показан зеленым цветом, напряжение $U_{кз}$ – синим цветом, напряжение источника $V2$ – красным цветом, ток коллектора $I_к$ – черным. При этом ток базы необходимо поддерживать постоянным, при необходимости корректируя $R2$. Результаты занести в таблицу 3.7;

установить ток базы $I_б = 40 мкА$ и повторить измерения. Результаты занести в таблицу 3.7;

установить ток базы $I_б = 80 мкА$ и повторить измерения. Результаты занести в таблицу 3.7.

При проведении анализа схемы для определения тока коллектора $I_к$ 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 3.7

$I_б = 10 мкА$		$I_б = 40 мкА$		$I_б = 80 мкА$	
$U_{кз}, В$	$I_к, мА$	$U_{кз}, В$	$I_к, мА$	$U_{кз}, В$	$I_к, мА$

По результатам измерений:

а) построить семейство характеристик транзистора и уметь их объяснить. Убедиться, что входная характеристика при $R_к = 1 кОм$ мало отличается от статических характеристик при напряжениях $U_{кз} > 0.5...1 В$;

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Изучение фотоэлектронных приборов и фотореле

Цель работы: изучить конструкцию и принцип работы вакуумного, газонаполненного фотоэлемента, фоторезистора, фотодиода; исследовать основные характеристики фотоэлектронных приборов.

Лабораторное оборудование

1. Лабораторная установка типа ЭО-6 с фотоприборами СЦВ-3, ЦГ-3, ФСК-1, ФД-1.
2. ПЭВМ.

Таблица 4.1

Основные параметры фотоэлементов

Тип прибора	U_p , В	S_p , мкА/лм	I_p , мкА	R_{T_1} , МОм	Светочувствительность материала, тип катода	Re	Срок службы, час
СЦВ-3	240	80-100	0,1		сурьямено-цезиевый		1000
ЦГ-3	240	100-250	0,1		кислородно-цезиевый		700
ФСК-1	50-400	не менее 10^6	15-30	не менее 3,3	сернисто-кадмиевый	8-30	
ФД-1	15	20	30				500

Краткие теоретические сведения

СЦВ-3 и ЦГ-3 – фотоэлектронные приборы с внешним фотоэффектом. Их электроды (фотокатод и анод) размещены в стеклянном баллоне, в котором создан вакуум (СЦВ-3) или имеется разряженный газ (ЦГ-3). Фотокатод – светочувствительный слой веществ. Он занимает 2/3 внутренней поверхности баллона. Анод – кольцо (стержень, сетка), размещенное так, чтобы не препятствовать попаданию излучения на фотокатод. Освещенный катод испускает электроны, которые движутся к аноду при приложении к фотоэлементу напряжения. В газонаполненных фотоэлементах электроны ионизируют газ при достижении достаточной кинематической энергии. Плотность фототока при этом увеличивается. Величина фототока I_ϕ

б) по статическим характеристикам определить h -параметры транзистора для схемы включения транзистора ОЭ. Найденные значения занести в таблицу 3.8;

Таблица 3.8

Определение параметров биполярного транзистора

h_{11} , В	h_{12}	h_{22} , В	h_{21}	$I_{к0}$, мА	$I_{б0}$, мкА	$U_{кэ0}$, В	$U_{эб0}$, В	$I_{мб}$, мА	$U_{мк}$, В

в) построить линию нагрузки для $R_k = 1$ кОм и $E_k = -10$ В;

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

д) определить значения постоянных токов (токов покоя) и постоянных напряжений (напряжений покоя) $U_k = 0$, $U_{э0} = 0$. Определить ток $I_{мб}$ и напряжение $U_{мк}$. Найденные значения занести в таблицу 3.5;

е) рассчитать величину сопротивления R_b для $E_k = -10$ В.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Основные параметры исследуемого транзистора.
4. Схемы исследований.
5. Результаты исследований и выводы по работе.
6. Ответы на приведенные вопросы.

Контрольные вопросы

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. Объясните режимы работы транзистора.

зависит от потока излучения Φ , падающего на фотоэлемент, от длины волны и приложенного напряжения.

ФСК-1 – фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фоторезистор). Это полупроводник, размещенный в пластмассовой или абонитовой оправе с окном. Имеет два вывода. Сопротивление фоторезисторов изменяется под действием падающего на него потока излучения. При отсутствии потока проводимость фоторезистора мала. Чувствительностью фотоэлемента называют отношение:

$$S = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}, \quad \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}.$$

Чувствительность фотоэлемента к монохроматическому излучению заданного спектрального состава называют интегральной чувствительностью ($S_{\text{инт}}$).

Часто фоторезистор характеризуют кратностью изменения сопротивления, равного:

$$K_R = \frac{R_{\Gamma}}{R_E},$$

т.е. отношению темнового сопротивления (сопротивления в отсутствии падающего на него излучения) к световому сопротивлению (сопротивлению фоторезистора, измеренного через определенный интервал времени после начала воздействия излучения).

Основные характеристики фотоэлементов: энергетическая характеристика фототока $I_{\Phi} = f(\Phi)$ при $U_a = \text{const}$, вольтамперная $I_{\Phi} = f(U_a)$ при $\Phi = \text{const}$, спектральные $S_{abc} = f(\lambda)$ и $S = f(\lambda)$ при $\Phi = \text{const}$.

Если в цепь фотоэлемента последовательно с источником постоянного напряжения E_a включить нагрузку R_n , то напряжение на ней будет изменяться по закону изменения потока Φ , а напряжение на электродах фотоэлемента описывается уравнением $U_a = E_a - I_{\Phi}R_n$. Это уравнение представляет собой линию нагрузки. Строится она на семействе статических характеристик по значениям E_a и E_a/R_n (см. рис. 4.1). По точкам пересечения ее со статической характеристикой при разных потоках Φ строится характеристика $I_{\Phi} = f(\Phi)$ для режима фотоэлемента с R_n . Из рисунка 4.1 видно, что линия нагрузки пересекает характеристики в области прямолинейных участков,

где I_{Φ} почти не зависит от U_a и R_n . Для получения наибольшего напряжения фотосигнала при данном $E_a = \text{const}$ и изменяющемся Φ находят оптимальное значение R_n по углу α с таким расчетом, чтобы точка A находилась в самом начале прямолинейного участка вольтамперной характеристики при $\Phi = \Phi_{\text{макс}}$. Выбрав рабочую точку T , оптимальную нагрузку определяем по формуле:

$$R_n = R_{n\text{опт}} = \frac{U_R}{I_{\Phi_0}} = \frac{I}{\text{tg}\alpha},$$

где U_R – падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_n при протекании по нему фототока I_{Φ} , т.е. $U_R = I_{\Phi}R_n$.

Для графического определения статической чувствительности вакуумных и газонаполненных приборов при $R_n = 0$ на их вольтамперных характеристиках из точки, соответствующей заданному напряжению питания, проводится прямая, перпендикулярная оси абсцисс. Статическая чувствительность определяется по формуле:

$$S = \frac{I_{\Phi}}{\Phi},$$

где I_{Φ} находят по точкам пересечения проведенной прямой и вольтамперной характеристики при соответствующем значении Φ .

Для определения дифференциальной чувствительности при $R_n \neq 0$ проводится линия нагрузки и вычисляется значение:

$$S_d = \frac{\Delta I_{\Phi}}{\Phi} = \frac{I_{\Phi_3} - I_{\Phi_1}}{\Phi_3 - \Phi_1},$$

где I_{Φ_a} и I_{Φ_1} находят по точкам пересечения линии нагрузки и вольтамперных характеристик.

Конструкция фотодиода сходна с конструкцией плоскостного германиевого диода. Эта пластинка полупроводника с областями p - и n -проводимости, которые разделены p - и n -переходом. Пластинка заключена в корпус из прозрачной пластмассы или в металлический корпус с окном, пропускающим световой поток.

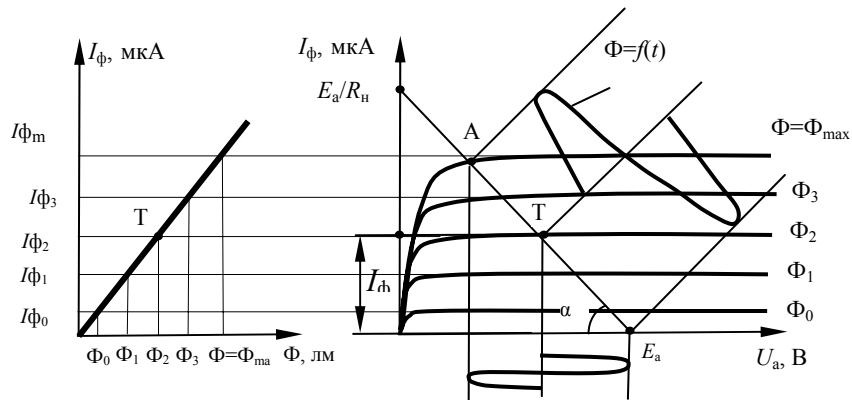


Рис. 4.1. Графическое определение статической чувствительности вакуумных и газонаполненных приборов

Фотодиоды могут работать в режиме фотогенератора (без внешнего источника питания) и в режиме фотопреобразователя (с внешним источником питания, включенным в обратном направлении).

В режиме фотогенератора при освещении n -области в ней образуются пары – электрон и дырка. Образовавшиеся заряды диффундируют к переходу, полем которого дырки втягиваются в p -область. При разомкнутом ключе в p -области накапливается избыточный «+» заряд, а в n -области – «-» заряд. На электродах фотодиода возникает разность потенциалов (ЭДС фотогенератора), понижающая потенциальный барьер. Это приводит к возникновению прямого тока через p - n -переход. При этом на электродах фотоэлемента устанавливается ЭДС, величина которой меньше высоты потенциального барьера до освещения.

Если электроды замкнуты накоротко, то разность потенциалов на них не возникает и высота потенциального барьера при освещении не изменяется. При включении R_n , протекающий через него ток нагрузки:

$$I_n = I_\phi - I_{пр},$$

где I_ϕ – фототок; $I_{пр}$ – прямой ток.

При уменьшении R_n возрастает I_n и на такую же величину уменьшается $I_{пр}$.

В режиме фотопреобразователя при приложении к p - n -переходу

обратного напряжения его потенциальный барьер увеличивается. Так как приложенное обратное напряжение значительно больше фото-ЭДС, то при освещении p - n -перехода высота потенциального барьера практически не изменяется и все освобожденные светом и разделенные полем p - n -перехода заряды уходят во внешнюю цепь. Прямой ток через p - n -переход, который возникает при работе в режиме фотогенератора и уменьшает ток в нагрузочном сопротивлении, в данном случае равен нулю.

При отсутствии света через p - n -переход R_n протекает обратный ток p - n перехода $I_{обр} = I_T$ (где I_T – темновой ток). При освещении фотодиода через R_n протекает ток $I_{общ} = I_\phi - I_T$. Так как внутреннее сопротивление фотодиода в этом режиме велико, ток не зависит от величины R_n в широком диапазоне. Вторым преимуществом работы фотодиода в режиме фотопреобразователя является линейность энергетической характеристики фототока. В режиме фотогенератора энергетическая характеристика фототока линейна лишь при очень малых потоках излучения, падающих на фотодиод или малых R_n .

Графическое определение статической и дифференциальной чувствительности фотодиода в режиме фотопреобразователя производится так же, как и определение чувствительности фотоэлементов.

Подготовка к работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить конструкцию, условные обозначения и основные параметры фотоприборов, размещенных на стенде.
4. Письменно ответить на приведенные в работе вопросы.

Программа и методика выполнения работы

1. Снять статические вольтамперные характеристики фотоэлемента СЦВ-3 для двух значений светового потока $\Phi = 0,2$ лм и $\Phi = 0,5$ лм (схема испытания представлена на рис. 4.2):

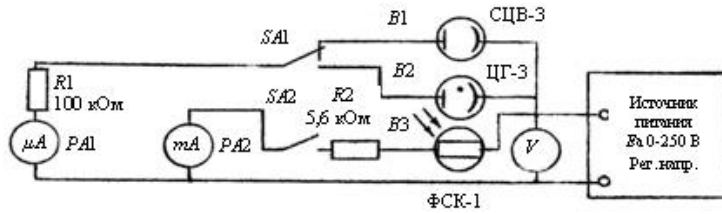


Рис. 4.2. Схема для снятия статических вольтамперных характеристик фотоэлемента ЦСВ-3

- выключатель «Вакуумный–газонаполненный» установить в положение «Вакуумный»;
- включить питание стенда;
- переключатель световых потоков для ЦСВ-3 установить в положение «F1»;
- вращением ручки «Рег. напряжения» изменять напряжение источника питания в пределах от 0 до 240 В через 10 В до 50 В и через 50 В до 240 В. Измерять значение фототока I_ϕ и определять $U_a = E_a - I_\phi R_1$. Данные записать в таблицу 4.2 (значением I_T пренебрегаем, считая $I_{\text{общ}} = I_\phi$);
- установить переключатель световых потоков в положение «F2» и повторить пункт (г).

Таблица 4.2

$E_a, \text{В}$	$\Phi = 0,2 \text{ лм}$		$\Phi = 0,5 \text{ лм}$	
	$I_\phi, \text{мкА}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_\phi, \text{мкА}$	$U_a, \text{В}$

2. Снять статические вольтамперные характеристики фотоэлемента ЦГ-3 для двух значений светового потока $\Phi = 0,1 \text{ лм}$, $\Phi = 0,14 \text{ лм}$:

- выключатель «Вакуумный–газонаполненный» установить в положение «Газонаполненный»;
- переключатель световых потоков для ЦГ-3 установить в положение «F1»;
- изменяя напряжение E_a в пределах от 0 до 240 В через 5 В до 20 В и через 50 В до 240 В, измерять значение фототока I_ϕ и определять U_a . Данные записать в таблицу 4.3;
- установить переключатель световых потоков в положение

«F2» и повторить пункт (в).

Таблица 4.3

$E_a, \text{В}$	$\Phi = 0,1 \text{ лм}$		$\Phi = 0,14 \text{ лм}$	
	$I_\phi, \text{мкА}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_\phi, \text{мкА}$	$U_a, \text{В}$

3. Снять вольтамперную характеристику фоторезистора ФСК-1 для двух значений светового потока $\Phi = 0,06 \text{ лм}$, $\Phi = 0,08 \text{ лм}$:

- переключатель световых потоков для ФСК-1 установить в положение «F1»;
- включить питание схемы исследования ФСК-1;
- изменяя напряжение E в пределах от 0 до 25 В через 5 В, измерять значения I_ϕ и вычислять U_a . Данные занести в таблицу 4.4;
- установить переключатель световых потоков в положение «F2» и повторить пункт (в).

Таблица 4.4

$E, \text{В}$	$\Phi = 0,06 \text{ лм}$		$\Phi = 0,08 \text{ лм}$	
	$I, \text{мкА}$	$U_\phi, \text{В}$	$I, \text{мкА}$	$U_a, \text{В}$

Ознакомиться со схемой испытания (рис. 4.3).

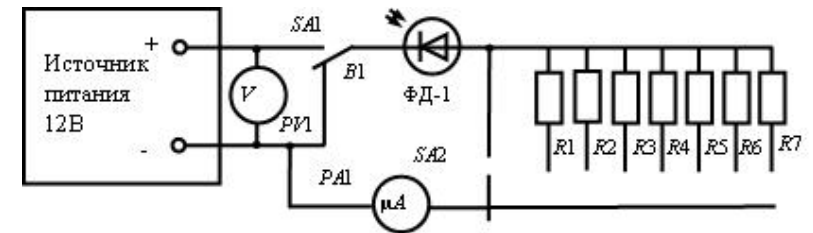


Рис. 4.3. Схема испытаний для снятия нагрузочной характеристики фотодиода

4. Снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотогенератора для двух значений светового потока $\Phi = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ лм}$ и $\Phi = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ лм}$:

- включить питание стенда и установить переключатель «Фотогенератор-фотопреобразователь» в положение «Фотогенератор»;

б) переключатель потоков «F1, F2» установить в положение «F1»;

в) изменяя сопротивление нагрузки R_n , измерять ток I_n . Результаты измерений занести в таблицу 4.5;

г) установить переключатель потоков в положение «F2» и повторить пункт (в).

Таблица 4.5

$\Phi = 0,9 \cdot 10^{-3}$ лм			$\Phi = 1,4 \cdot 10^{-3}$ лм		
R_n , кОм	I_n , мкА	U_{ϕ} , В	R_n , кОм	I_n , мкА	U_{ϕ} , В

5. Снять статические вольтамперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя для двух значений светового потока:

а) установить переключатель в положение «Фотопреобразователь»;

б) переключатель потоков установить в положение «F1»;

в) переключателем нагрузок установить $R_n = 0$;

г) с помощью потенциометра «Регулировка напряжения 0-12 В» изменять напряжение источника от 0 до 2,0 В через 0,5 В и от 2,0 В до 10 В через 2 В. Измерять значения I_{ϕ} . Результаты измерений занести в таблицу 4.6;

д) установить переключатель потоков в положение «F2» и повторить пункт (г).

Таблица 4.6

$\Phi = 0,9 \cdot 10^{-3}$ лм		$\Phi = 1,4 \cdot 10^{-3}$ лм	
U_a , В	I_{ϕ} , мкА	U_a , В	I_{ϕ} , мкА

6. Снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя для двух значений светового потока $\Phi = 0,9 \cdot 10^{-3}$ лм и $\Phi = 1,4 \cdot 10^{-3}$ лм и напряжения источника $E_a = 10$ В:

а) потенциометром «Рег. напряжения 0-12 В» установить напряжение источника $E_a = 10$ В;

б) переключатель потоков установить в положение «F1»;

в) изменяя сопротивление нагрузки R_n , измерять ток I_n . Результаты измерений занести в таблицу 4.7;

г) установить переключатель потоков в положение «F2» и повторить пункт (в).

Таблица 4.7

$\Phi = 0,9 \cdot 10^{-3}$ лм		$\Phi = 1,4 \cdot 10^{-3}$ лм	
R_n , кОм	I_n , мкА	R_n , кОм	I_n , мкА

Вычертить и изучить работу схемы фотореле (рис. 4.4).

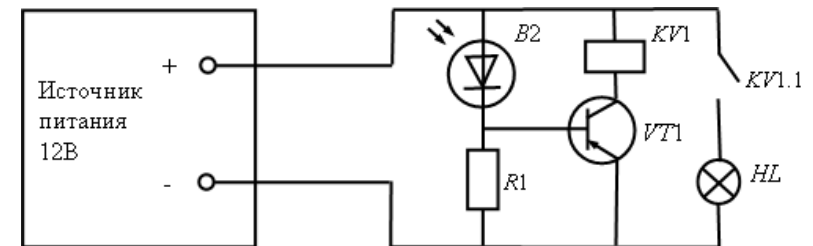


Рис.4.4. Схема для испытания фотореле

7. Проверить экспериментально работу схемы фотореле:

а) переключатель потоков «F1, F = 0, F2» установить в положение «F = 0»;

б) второй переключатель потоков «F = 0, F1» установить в положение «F1»;

в) с помощью потенциометра «Рег. напряжения 0-12 В» изменять световой поток до момента срабатывания фотореле (загорание лампы). Записать напряжение, пропорциональное световому потоку, при котором срабатывает и выключается фотореле.

Методика выполнения работы на компьютере

1. Вызвать программу «MICROCAP».
2. Открыть файл «ЛАБ 4_1», на экране появится схема включения фотодиода (рис. 4.5), где $V1$ – источник питания, V_{light} – источник света, напряжение, на котором симулируют световой поток, VD – полупроводниковый фотодиод 1N4933, соответствующий зарубежной маркировке, R – сопротивление нагрузки.

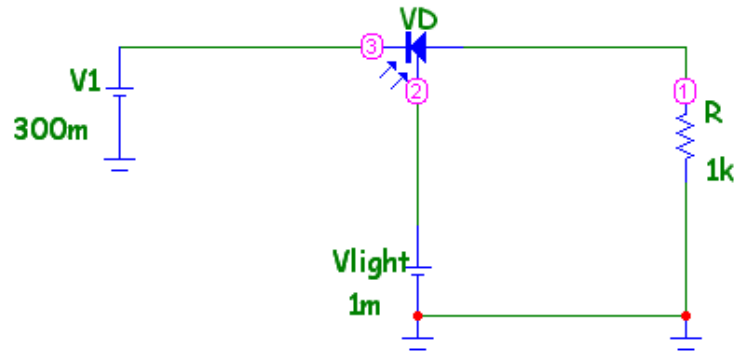


Рис. 4.5. Схема включения фотодиода

3. Снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотогенератора (при $V1 = 0$) для двух значений светового потока (при $V_{light} = 0,5$ мВ и при $V_{light} = 1$ мВ):
 - установить напряжение на $V1 = 0$ (двойной щелчок по элементу - см. приложение);
 - установить величину светового потока, соответствующего напряжению на $V_{light} = 0,5$ мВ;
 - изменять сопротивление нагрузки R в соответствии со значениями, приведенными в таблице 4.8;
 - измерить значения тока нагрузки I_n и фотонапряжения U_ϕ , воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где ток I_n показан зеленым цветом, напряжение U_ϕ –

синим цветом, напряжение источника V_{light} – красным цветом. Результаты занести в таблицу 4.8;

повторить измерения для напряжения $V_{light} = 1$ мВ в соответствии с таблицей 4.8.

Таблица 4.8

$V_{light} = 0,5$ мВ			$V_{light} = 1$ мВ		
R , кОм	I_n , мкА	U_ϕ , мВ	R , кОм	I_n , мкА	U_ϕ , мВ
0,1			0,1		
1			1		
2			2		
5			5		
10			10		
100			100		

4. Снять статические вольтамперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя (при $R = 100$ Ом) для двух значений светового потока (при $V_{light} = 10$ мВ и при $V_{light} = 20$ мВ):
 - установить величину светового потока, соответствующего напряжению на $V_{light} = 10$ мВ;
 - установить значение $R = 100$ Ом;
 - изменять значения напряжения U_a источника $V1$ в соответствии с значениями, приведенными в таблице 4.9;
 - измерить значения фототока I_ϕ , воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где фототок I_ϕ показан зеленым цветом, напряжение U_ϕ – синим цветом, напряжение источника V_{light} – красным цветом. Результаты занести в таблицу 4.9;

повторить измерения для напряжения $V_{light} = 20$ мВ в соответствии с таблицей 4.8;
результаты занести в таблицу 4.9.

Таблица 4.9

Vlight = 10 мВ		Vlight = 20 мВ	
U_a , В	I_{ϕ} , мА	U_a , В	I_{ϕ} , мА
0,01		0,01	
0,05		0,05	
0,1		0,1	
0,2		0,2	
0,3		0,3	
0,5		0,5	
1		1	

5. Снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя (при $V_1 = 3$ В) для двух значений светового потока (при $V_{light} = 10$ мВ и при $V_{light} = 20$ мВ).

6. Установить напряжение на $V_1 = 3$ В (двойной щелчок по элементу - см. приложение);

установить величину светового потока, соответствующего напряжению на $V_{light} = 10$ мВ;

изменять сопротивление нагрузки R в соответствии со значениями, приведенными в таблице 4.10;

измерить значения тока нагрузки I_n и фотонапряжения U_{ϕ} , воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где ток I_n показан зеленым цветом, напряжение U_{ϕ} – синим цветом, напряжение источника V_{light} – красным цветом. Результаты занести в таблицу 4.10;

повторить измерения для напряжения $V_{light} = 20$ мВ в соответствии с таблицей 4.10;

результаты занести в таблицу 4.10.

Таблица 4.10

Vlight = 10 мВ		Vlight = 20 мВ	
R , кОм	I_n , мА	R , кОм	I_n , мА
0.1		0.1	
1		1	
2		2	
5		5	
10		10	
100		100	

7. Открыть файл «ЛАБ 4_2», на экране появится схема фотореле на основе транзисторной оптопары (рис. 4.6), в которую входят V_1 – источник питания, X_1 – транзисторная оптопара, HL – лампочка, KV – магнитная катушка с реле, R_1 и R_2 – вспомогательные сопротивления, амперметр.

8. Определить напряжение срабатывания фотореле:

изменять напряжение источника V_1 от 0 до момента срабатывания (загорание лампочки);

зафиксировать значение напряжения $U_{вх}$, пропорциональное световому потоку, при котором срабатывает и выключается фотореле;

зафиксировать значение тока I , протекающего через лампочку с помощью миллиамперметра, включенного в схему.

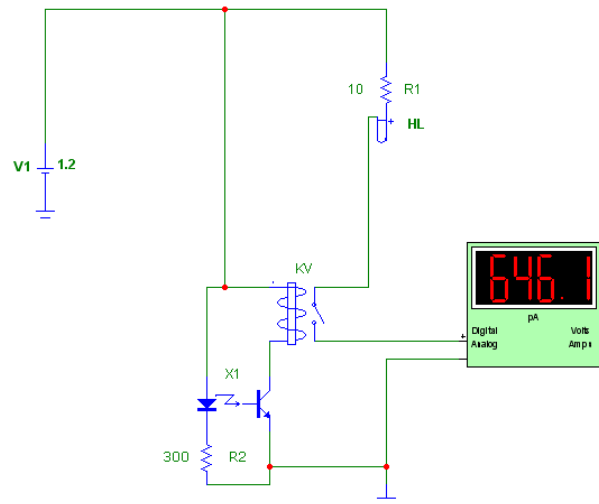


Рис. 4.6. Схема фотореле на основе транзисторной оптопары

По результатам измерений:

- построить статические вольтамперные характеристики и линию нагрузки для фотоэлементов СЦВ-3 и ЦГ-3;
- определить по характеристикам статическую и дифференциальную интегральную чувствительность СЦВ-3 и ЦГ-3;
- построить энергетическую характеристику фототока при $R_n = R_1 = 100$ кОм для фотоэлемента СЦВ-3 и определить по ней дифференциальную интегральную чувствительность. Сравнить ее с чувствительностью, определенной в п. (б);
- определить для СЦВ-3 оптимальное значение сопротивления нагрузки при $\Phi = 0,2$ лм и $E_a = 240$ В;
- построить вольтамперную характеристику фоторезистора ФСК-1 и определить его интегральную чувствительность при $U = 25$ В;
- определить световое сопротивление ФСК-1 и найти кратность изменения сопротивления;
- построить нагрузочные характеристики $I_n = f(R_n)$ фотодиода в режиме фотогенератора и фотопреобразователя и сравнить их;
- вычислить напряжение фотогенератора $\Phi = I_n R_n$ для различных значений R_n и построить вольтамперную характеристику $U_\Phi =$

$f(I_n)$ фотогенератора;

и) построить статические характеристики линии нагрузки фотодиода в режиме фотопреобразователя и определить его статическую и дифференциальную интегральную чувствительность при $R_n = 2$ кОм, $R_n = 5,1$ кОм, $E_k = 10$ В.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схемы исследований.
3. Таблицы результатов измерений.
4. Графические построения.
5. Результаты обработки данных испытаний (п. 4.8).

Контрольные вопросы

1. Какой вид имеют вольтамперные характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлемента?
2. Какой вид имеет вольтамперная характеристика фоторезистора?
3. Объясните принцип действия вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.
4. Объясните принцип действия фоторезистора.
5. Какова конструкция вакуумного и газонаполненного фотоэлементов?
6. Какова конструкция фоторезистора?
7. Что такое интегральная чувствительность фотоэлемента; как определить статическую и дифференциальную интегральную чувствительность СЦВ-3 и ЦГ-3?
8. Что такое кратность изменения сопротивления фоторезистора и как ее определить?
9. Объясните режимы работы фотодиода.
10. Объясните работу исследованной схемы фотореле.
11. Начертите и объясните вольтамперные характеристики фотодиода в режиме фотогенератора и фотопреобразователя.
12. Начертите нагрузочные характеристики фотодиода.

Лабораторная работа № 5

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. Лабораторная панель с полевым транзистором.
2. Миллиамперметр РА1 (0...100 мА).
3. Миллиамперметр РА2 (0...100 мА).
4. Вольтметр PV – электронный вольтметр В7-26.
5. ПЭВМ.

Таблица 5.1

Основные параметры полевого транзистора с p - n -переходом и каналом типа p

Параметры	I_c , мА	$I_{з\text{ ут}}$, мА	S , мА/В	$U_{си\text{ max}}$, В	$U_{зс\text{ max}}$, В	$U_{зи\text{ отс}}$, В	P_{max} , мВт
КП103И	0,8–1,8	<20	0,8–2,6	12	15	0,8–3	21

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, т.к. 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 (МОП)-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 с управляющим p - n -переходом представляет собой пластинку полупроводника n -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 (З). Между p - n -переходами располагается канал (рис. 5.1).

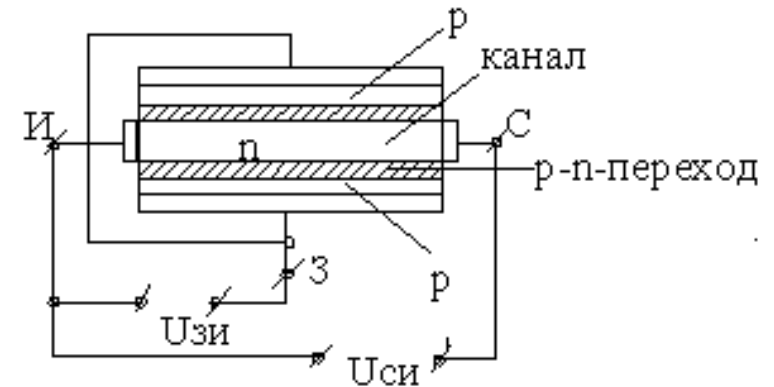


Рис. 5.1. Конструкция транзистора с управляющим p - n -переходом (n -канальный)

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, обедненные носителями заряда. Т.к. 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, т. е. 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. 5.2, б):

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

2) Стоковые (или выходные) (рис. 5.2, а):

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

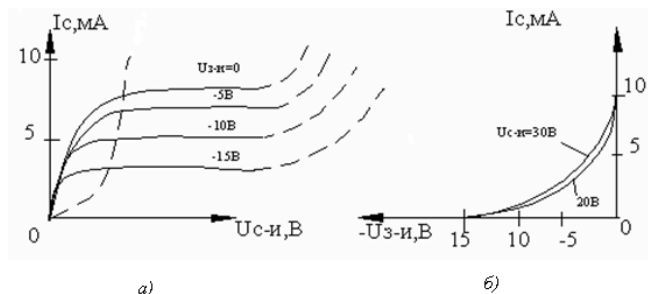


Рис. 5.2. Характеристики полевых транзисторов с $p-n$ -переходом (n -канальных): а – семейство стоковых (выходных) характеристик; б – семейство стоко-затворных (передаточных) характеристик

Параметры:

крутизна $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} | U_{си} = \text{const}$, характеризует управление

действия затвора;

внутреннее (выходное) сопротивление

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} | U_{зи} = \text{const};$$

коэффициент усиления $\mu = -\frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} | I_c = \text{const};$

входные сопротивления $R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_3} | U_{си} = \text{const};$

межэлектродные емкости.

В отличие от полевых транзисторов с $p-n$ -переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с областью токопроводящего канала, в МДП-транзисторах затвор изолирован от канала слоем диэлектрика.

Подготовка к работе

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

Программа и методика выполнения работы

1. Изучить конструкцию стенда, условные обозначения, основные параметры полевого транзистора.
2. Собрать схему для исследований (рис. 5.3) и установить ручки управления в исходное положение.

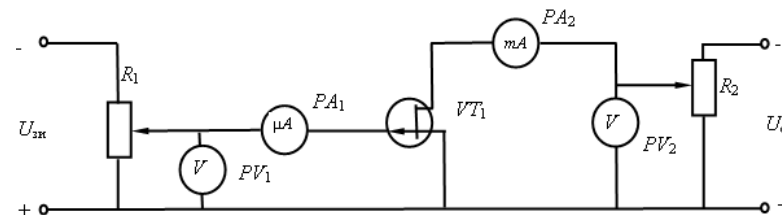


Рис. 5.3. Схема испытания полевого транзистора

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

а) повернуть ручки входного и выходного потенциометров R_1 и R_2 в крайнее левое положение;

б) включить тумблеры источников питания SA_1 и SA_2 , при этом должны загореться сигнальные лампы;

в) поддерживая постоянным напряжение на затворе $U_{зи}$, изменять напряжение на стоке ручкой регулятора R_2 от 0 до U_M и отмечать значение тока стока (не менее 7-8 точек). Результаты свести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

Результаты измерений для построения выходных (стоковых) характеристик

$U_{зи},$ 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															
1,5															
2															

4. Снять переходные (стоко-затворные) характеристики $I_c = f(U_3)$ при $I_{си} = \text{const}$:

а) установить ручки входного и выходного потенциометров R_1 и R_2 в крайнее левое положение;

б) поддерживая постоянным напряжение на стоке (ручкой R_2), изменять напряжение на затворе от 1 В до нуля (ручкой R_1), отметить величины тока стока.

Результаты измерений свести в таблицу 5.3;

в) привести установку в исходное положение, провернув ручки потенциометров R_1 и R_2 в крайнее левое положение, выключить тумблеры питания.

Таблица 5.3

Результаты измерений для построения переходных (стоко-затворных) характеристик

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

Методика выполнения работы на компьютере

1. Вызвать программу «MICROCAP-7».

2. Открыть файл «ЛАБ 5», на экране появится схема включения полевого транзистора (рис. 5.4), где $V1$ – источник напряжения затвор-исток, $V2$ – источник напряжения сток-исток, VT – полевой p -канальный транзистор 2N2608 – тип транзистора, соответствующий зарубежной маркировке, R_1 – сопротивление нагрузки, равное 10 Ом.

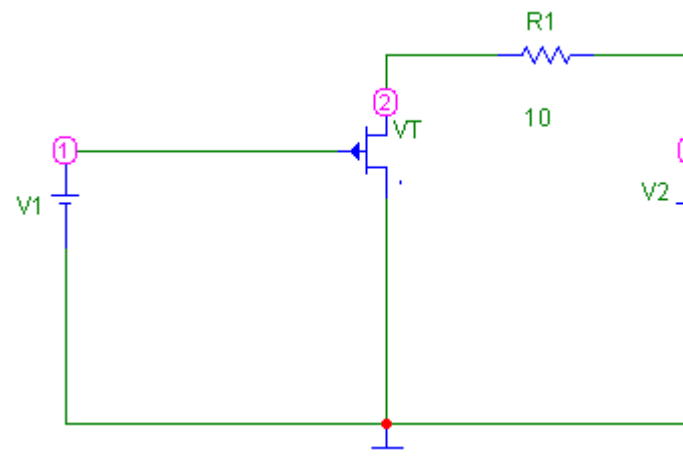


Рис. 5.4. Схема включения полевого транзистора

3. 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», «Transient Analysis», «Run» (см. приложение), где I_c показан зеленым цветом, $U_{зи}$ ($V1$) – синим цветом, $U_{си}$ ($V2$) – красным цветом. Результаты занести в таблицу 5.2;

повторить измерения, изменяя напряжение $U_{зи} = 0,5$ В, 1 В, 1,5 В, 2 В в соответствии с таблицей 5.2.

4. Снять семейство переходных (стоко-затворных) характеристик транзистора $I_c = f(U_{зи})$, при $U_{си} = \text{const}$:
 установить напряжение $U_{си} (V2) = -0,5 \text{ В}$;
 изменять напряжение $U_{зи} (V1)$ от 0 В до 4 В через 0,5 В в соответствии с таблицей 5.3. Определить ток стока I_c , воспользовавшись кнопками меню «Analysis», «Transient Analysis», «Run» (см. приложение), где I_c показан зеленым цветом, $U_{зи} (V1)$ – синим цветом, $U_{си} (V2)$ – красным цветом. Данные занести в таблицу 5.3;
 установить напряжение $(V2) U_{си} = -2 \text{ В}$ и повторить измерения. Результаты занести в таблицу 5.3;
 установить напряжение $(V2) U_{си} = -3 \text{ В}$ и повторить измерения. Результаты занести в таблицу 5.3.

По результатам измерений:

- построить семейства выходных и переходных характеристик полевого транзистора, уметь их объяснить;
- по характеристикам определить значение крутизны при $U_{си} = -0,5 \text{ В}$; -2 В ; -3 В и построить зависимость $S = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ для $U_{си} = -0,5 \text{ В}$; -2 В ; -3 В ;
- определить величину напряжения отсечки;
- рассчитать внутреннее дифференциальное сопротивление R_i , статический коэффициент усиления по напряжению μ , динамическое сопротивление канала $r = \Delta U_{си} / \Delta I_c$ при $U_{си} = \text{const}$.

Содержание отчета

- Номер и название работы.
- Цель работы.
- Схемы измерений.
- Таблицы опытных данных.
- Результаты расчетов.
- Графические зависимости.
- Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- Какие типы полевых транзисторов вы знаете?
- Назовите основные параметры полевых транзисторов.
- 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 №6

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 с тиристором.
2. Миллиамперметр РА1 (0...5 мА).
3. Миллиамперметр РА2 (0...300 мА, 0...50 мкА)
4. Вольтметр РV – электронный вольтметр В7-35.
5. ПЭВМ.

Таблица 6.1

Основные параметры триисторов

Тип прибора	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА (А)	$U_{обр\max}$, В	$I_{y\max}$, мА	$U_{умax}$, В	$I_{обр\max}$, мА	t_s , °С
КУ101Б	50	75	50	15	2	0,3	-55+85
КУ202Б	25	(10)	25	300	10	10	-60+85

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), триисторы (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, т.е. 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 рисунке 6.1, а.

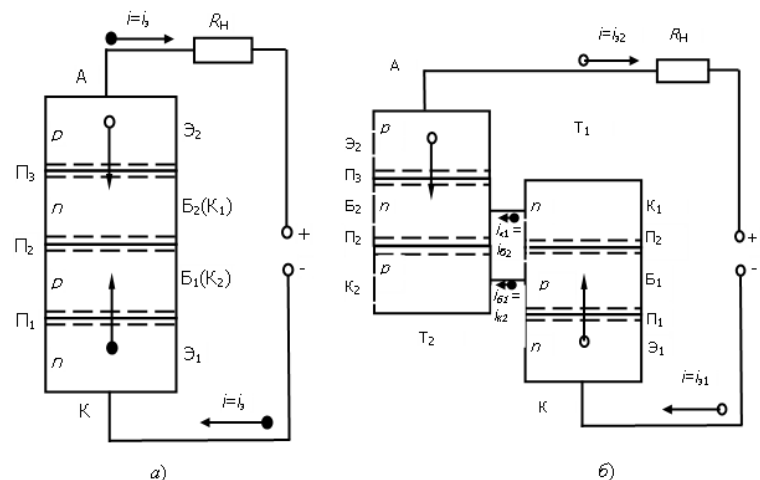


Рис. 6.1. Структура диодного тиристора (а) и его эквивалентная схема в виде двух транзисторов (б)

Как видно, он имеет три $p-n$ -перехода, причем два из них (Π_1 и Π_2) работают в прямом направлении, а средний переход Π_2 – в обратном направлении. Крайнюю область p называют анодом, а крайнюю область n – катодом. Тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы (модели), состоящей из двух транзисторов T_1 и T_2 типа $n-p-n$ и $p-n-p$, соединенных так, как показано на рис. 6.1, б. Получается, что переходы Π_1 и Π_2 являются эмиттерными переходами этих транзисторов, а переход Π_2 работает в обоих транзисторах в качестве коллекторного перехода. Область базы B_1 транзистора T_1 одновременно является коллекторной областью K_2 транзистора T_2 , а область базы B_2 транзистора T_2 одновременно служит коллекторной областью K_1 транзистора T_1 . Соответственно этому коллекторный ток первого транзистора i_{k1} является током базы второго транзистора i_{b2} , а ток коллектора i_{k2} второго транзистора представляет собой ток базы i_{b1} первого транзистора.

Как правило, тиристоры изготавливают из кремния, причем эмиттерные переходы могут быть сплавными, а коллекторный переход изготавливают методом диффузии. Применяется также пла-

нарная технология. Концентрация примеси в базовых (средних) областях значительно меньше, нежели в эмиттерных (крайних) областях.

Физические процессы в тиристоре можно представить следующим образом. Если бы был только один переход Π_2 , работающий при обратном напряжении, то существовал бы лишь небольшой обратный ток, вызванный перемещением через переход неосновных носителей, количество которых мало. Но, как известно, в транзисторе может быть получен большой коллекторный ток, являющийся обратным током коллекторного перехода, если в базу транзистора со стороны эмиттерного перехода инжектируются в большом количестве неосновные носители. Чем больше напряжение на эмиттерном переходе, тем больше этих носителей приходит к коллекторному переходу, тем больше становится ток коллектора. Напряжение на коллекторном переходе, наоборот, становится меньше, так как при большем токе уменьшается сопротивление коллекторного перехода и возрастает падение напряжения на нагрузке, включенной в цепь коллектора.

Нечто подобное получается и в тиристоре. Через переходы Π_1 и Π_3 , работающие в прямом направлении, в области, примыкающей к переходу Π_2 , инжектируются неосновные носители, которые уменьшают сопротивление перехода Π_2 .

Вольтамперная характеристика тиристора, представленная на рисунке 6.2, показывает, что происходит в тиристоре при повышении приложенного к нему напряжения.

Сначала ток невелик и растет медленно, что соответствует участку OA характеристики. В этом режиме тиристор можно считать закрытым. На сопротивление коллекторного перехода Π_2 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, т.е. переход Π_2 все больше обедняется основными носителями. Но, с другой стороны, повышение прямых напряжений на эмиттерных переходах Π_1 и Π_3 усиливает инжекцию носителей, которые подходят к переходу Π_2 , обогащают его и уменьшают его сопротивление. До точки A перевес имеет первый процесс и сопротивление растет, но все медленнее и медленнее, так как постепенно усиливается второй процесс.

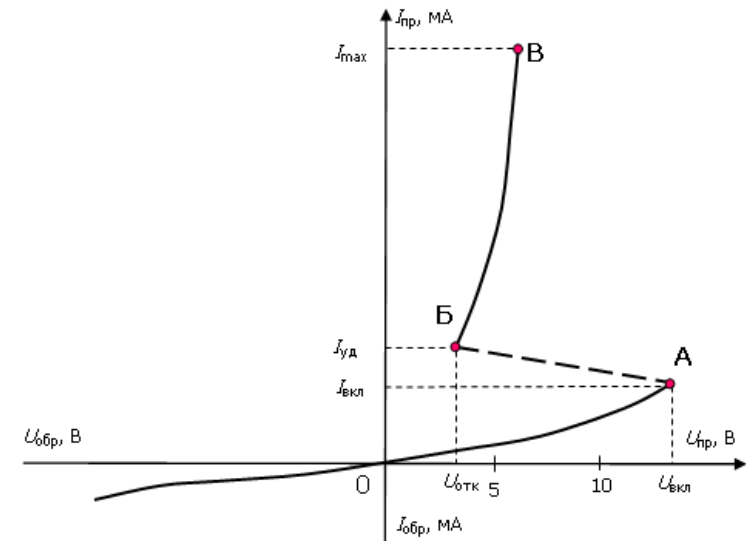


Рис. 6.2. Вольтамперная характеристика диодного тиристора

Около точки A 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 Π_2 начинает уменьшаться. Тогда возникает лавинообразный процесс быстрого отпирания тиристора. Ток резко, скачком, возрастает (участок AB на характеристике), так как увеличение напряжения на Π_1 и Π_3 уменьшает сопротивление Π_2 и напряжение на нем, за счет чего еще больше возрастают напряжения на Π_1 и Π_3 , а это в свою очередь, приводит к еще большему возрастанию тока, уменьшению сопротивления Π_2 и т.д. В результате такого процесса устанавливается режим, напоминающий режим насыщения транзистора: большой ток при малом напряжении (участок BB). 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 $U_{\text{вкл}}$. Чем больше ток через такой переход I_y , тем ниже $U_{\text{вкл}}$.

На рисунке 6.3 приведены вольтамперные характеристики триодного тиристора для разных управляющих токов.

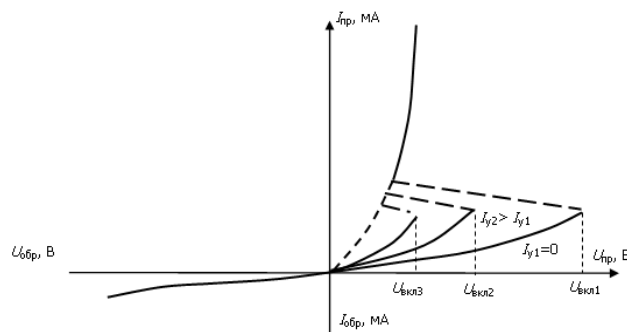


Рис. 6.3. Вольтамперные характеристики триодного тиристора для разных управляющих токов

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 отпириания прибора. Наиболее высокое $U_{\text{вкл}}$ 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. 6.3) аналогична обратной ветви выпрямительных диодов и характеризуется параметрами: максимально допустимым напряжением $U_{\text{обр}}$ и током $I_{\text{обр}}$.

Подготовка к работе

1. Ознакомится с описанием лабораторной работы.
2. Подготовить бланк для выполнения отчета.
3. Изучить теоретические материалы по теме работы.
4. Письменно ответить на приведенные контрольные вопросы.

Программа и методика выполнения работы

1. Изучить конструкцию, условные обозначения; основные и предельно допустимые параметры тиристорov.
2. Собрать схему (рис. 6.4).

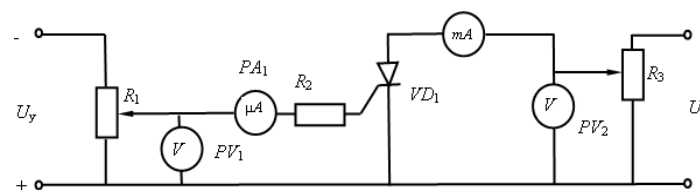


Рис. 6.4. Схема включения триодного тиристора

3. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики тиристора $I_a = f(U_a)$ при $I_y = 0$.

Подключить амперметр PA2 на 50 мА:

а) ручки переменных сопротивлений регулировки напряжений R1 и R3 установить в крайнее левое положение против часовой стрелки, соответствующее минимальному значению напряжения питания;

б) переключатель S1 установить в положение «прямое»;

в) включить выключатель напряжения анодного питания, при этом загорится сигнальная лампа и индикатор зеленого цвета около резистора R3;

г) ручкой переменного сопротивления R3 плавно увеличивать напряжение источника анодного питания от значения $U_{\text{мин}}$. Измерить прямое напряжение $U_{\text{пр}}$ и ток I_a тиристора (9–10 значений). Отметить напряжение $U_{\text{вкл}}$ и ток включения $I_{\text{вкл}}$ тиристора;

д) ручкой R3, плавно уменьшая напряжение источника анодного питания, определить значение тока удержания $I_{\text{уд}}$. Ручку R1 затем установить в крайнее левое до упора положение.

Пункты (г) и (д) могут выполняться без отпирания тиристора. Результаты измерений занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2

Результаты измерений для построения прямой и обратной ветви ВАХ

$U_{пр}, В$								
$I_{пр}, мА$								
$U_{обр}, В$								
$I_{обр}, мкА$								

4. Снять экспериментально обратную ветвь вольтамперной характеристики $I_a = f(U_{обр})$ при $I_y = 0$.

Подключить РА2 на 50 мА:

а) изменить полярность тиристора в схеме, переключив тумблер в положение «обр». Загорится красная сигнальная лампа;

б) плавно изменять обратное напряжение $U_{обр}$ от 0 до $U_{обр\ max}$, измерить значение обратного тока $I_{обр}$ (не менее 7–8 измерений).

Результаты измерений занести в таблицу 6.2.

5. Снять прямую ветвь вольтамперной характеристики тиристора $I_a = f(U_a)$ при изменении I_y , т.е. исследовать влияние тока управления на работу тиристора:

а) ручки регулировки напряжений питания $R1$ и $R3$ установить в крайнее левое положение; подключить амперметр $РА2$ на 300 мА;

б) переключатель $S1$ установить в положение «прямое»;

в) установить номинальное значение анодного напряжения ручкой регулятора $R3$ согласно таблице 6.3;

г) выключателем SA включить цепь управления тиристором;

д) ручкой регулятора $R1$ постепенно увеличивать управляющий ток до момента открытия тиристора, которое характеризуется появлением тока в его анодной цепи и резким уменьшением анодного напряжения U_a на тиристоре. Зафиксировать минимальный ток управления I_y , обеспечивающий открытие тиристора. Измерить в этом режиме напряжение управления U_y , напряжение на открытом тиристоре $U_{a\ откp}$;

е) рассчитать минимальную мощность управления;

ж) повторить исследование для различных значений анодного напряжения (см. табл. 6.3).

Таблица 6.3
Результаты измерений для исследования управляемого тиристора

$U_a,$ В	$I_{у\ мин},$ мА	$U_{у\ мин},$ В	$I_a,$ мА	$I_{уд},$ мА	$U_{аоткр},$ В	$P_a,$ мВт	$P_y,$ мВт
8							
10							
12							
15							
20							
23							
25							
28							

6. Определить ток удержания тиристора $I_{уд}$:

а) установить регулятором $R3$ последовательно значение анодного напряжения согласно таблице 6.3;

б) открыть тиристор, подавая на его управляющий электрод напряжения управления регулятором $R1$, а затем установить $U_y = 0$;

в) уменьшить напряжение U_a , отметив величину тока, при котором тиристор закрывается. Убедиться, что тиристор в этом режиме открывается при подаче U_y и закрывается при его исчезновении. Данные измерений занести в таблицу 6.3;

г) измерить напряжение на открытом тиристоре $U_{аоткр}$.

Методика выполнения работы на компьютере

1. Вызвать программу «MICROCAP».

2. Открыть файл «LAB_6_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.

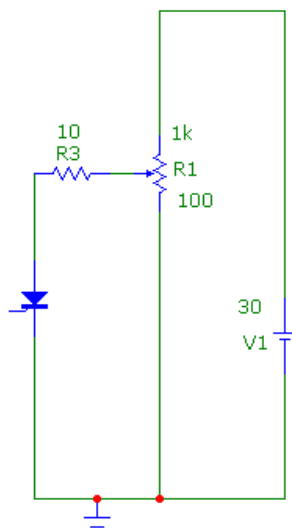


Рис. 6.5. Схема для исследования диодного тиристора

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 таблице 6.4 значениями (значение сопротивления устанавливается в процентном отношении к максимальной величине, т.е. 100 % - это 1 кОм);

перевести значения сопротивлений для $R1$ из % в реальные значения, измеряемые в Ом; результаты расчета занести в таблицу 6.4;

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 таблицу 6.4.

Таблица 6.4

$R1$, %	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			-	-		-		-		-	

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 таблицу 6.4.

5. Открыть файл «LAB_6_2»: на экране появится схема для исследования триодного тиристора (рис. 6.6), 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.

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);

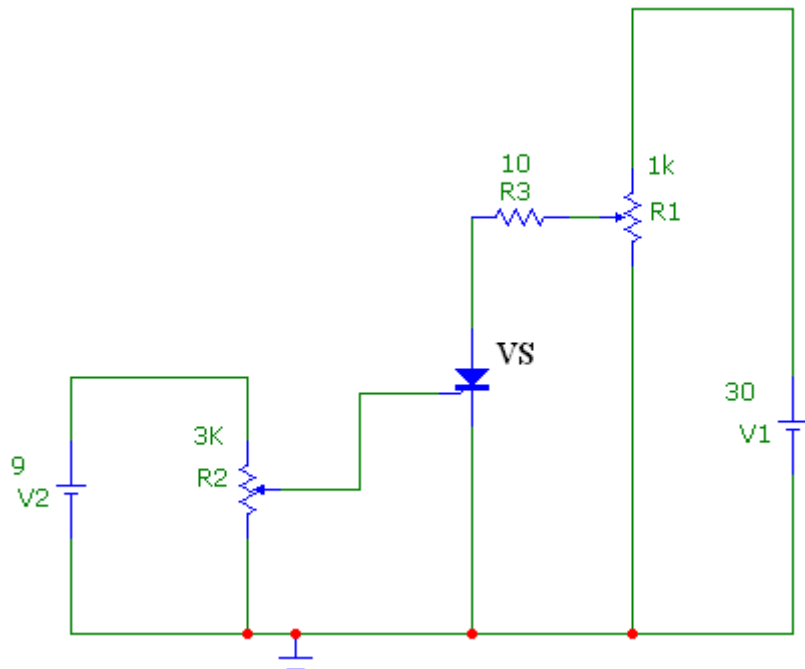


Рис. 6.6. Схема для исследования триодного тиристора

определить в 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 . $U_{вкл}$ показано на графике зеленым цветом до момента перехода тиристора в открытое состояние, $U_{аоткр}$ – 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 таблицу 6.5.

Таблица 6.5

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:

а) 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;

б) определить при $I_y = 0$ основные параметры тиристора для $U_a = 25\text{ В}$, $U_{вкл}$, $I_{вкл}$, r_d , I_y , $I_{обр\text{мах}}$, $I_{уд}$, $U_{а\text{откр}}$.

Найденные значения занести в таблицу 6.6.

Таблица 6.6

I_y , мА	$I_{обр\text{мах}}$, мА	$U_{вкл}$, В	$I_{вкл}$, мА	$I_{уд}$, мА	Z_d , Ом	$Z_{обр}$, Ом

Содержание отчета

1. Назначение и цель работы.
2. Схемы испытаний.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Результаты обработки данных экспериментов согласно п. 6, вольтамперные характеристики тиристора, характеристики включения и прямой передачи тока.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа №7

Изучение приемно-усилительных ламп

Цель работы: изучить конструкцию, основные параметры и принцип действия некоторых типов приемно-усилительных ламп; исследовать экспериментально характеристики триода и пентода.

Лабораторное оборудование

1. Триод 6С2С и пентод 6Ж4.
2. Лабораторная установка типа ОЭ-2.
3. ПЭВМ.

Таблица 7.1

Основные параметры ламп

Тип лампы	$U_{н},$ В	$I_{н},$ А	$U_{а},$ В	$U_{с1},$ В	$U_{с2},$ В	$I_{а},$ мА	$S,$ мА/В	$R_i,$ кОм	μ	$C_{вх},$ пФ	$C_{пр},$ пФ	$C_{вых},$ пФ
6С2С	6,3	0,3	250	-8		9	2,55	8,05	23,5	3	3,5	4,5
6НП	6,3	0,3	300	-2		7,5	4,35	7,6	35	3,1	2,2	1,95
6Ж4	6,3	0,45	300		150	10,25	9	1000	9000	9,5	0,05	5
6Ж4П	6,3	0,4	250		150	11	5,7	900	8500	6,3	0,035	6,3

Краткие теоретические сведения

Триод имеет три электрода – **катод, анод и управляющую сетку**.

В пентоде для уменьшения проходной емкости между управляющей сеткой и анодом установлена экранная сетка, на которую подается положительное напряжение. По высокой частоте эта сетка соединена с катодом. Для предотвращения динаatronного эффекта в пентоде еще установлена антидинаatronная сетка, на которую в большинстве схем подается потенциал катода. Электроды размещены в стеклянном или металлическом баллоне, из которого выкачен воздух. Катод обеспечивает термоэмиссию электронов. Если на анод подано положительное напряжение, то при изменении потенциала сетки изменяется значение анодного тока.

Основными характеристиками триода и пентода являются анодные, анодно-сеточные и сеточные характеристики.

Основные параметры:

крутизна анодно-сеточной характеристики $S = \Delta I_a / \Delta U_c$ при $U_a = \text{const}$ и $U_{c2} = \text{const}$;

внутреннее сопротивление $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$ при $U_{c1} = \text{const}$ и $U_{c2} = \text{const}$;

статический коэффициент усиления $\mu = \Delta U_a / \Delta U_a$ при $I_a = \text{const}$, $U_{c2} = \text{const}$;

проницаемость лампы $D = 1/\mu$.

Эти параметры связаны между собой уравнением $\mu = R_i S$, могут быть найдены по семейству анодных или анодно-сеточных характеристик методом характеристического треугольника. Для этого на семействе характеристик строят ΔABC или $\Delta A'B'C'$ (рис. 7.1) и, пользуясь выражениями для S, R_i, D и μ , находят отношение сторон. Параметры можно также определить методом двух точек или при снятии характеристик методом двух отсчетов.

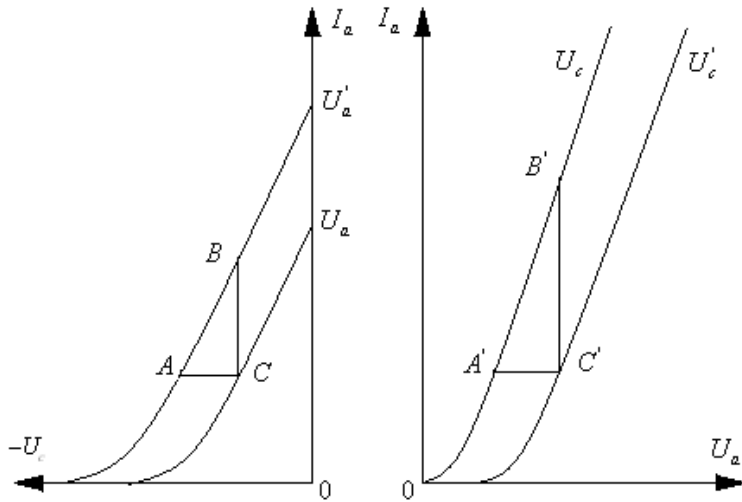


Рис. 7.1. Нахождение основных характеристик

В простейшем усилительном каскаде (R_a в цепи анода) I_a зависит не только от свойств лампы, но и от величины R_a . Если $R_a = \text{const}$ для постоянного и переменного токов, то линия нагрузки может быть построена

на семействе статических анодных характеристик по уравнению $U_a = E_a - I_a R_a$ соединением точек $\frac{E_a}{R}$ и E_a прямой.

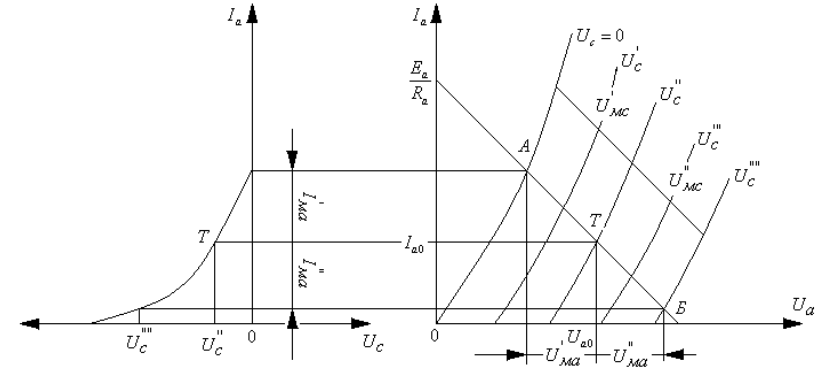


Рис. 7.2. Построение анодно-сеточной характеристики

По точкам пересечения ее с характеристиками для различных U_c строится анодно-сеточная характеристика (рис. 7.2). По ней и по анодным характеристикам с нагрузочной прямой можно графически определить динамические параметры S_0 и μ_0 . Эти же параметры можно найти и аналитически по выражениям:

$$K_u = \mu_0 \frac{R_a}{R_a + R_1};$$

$$S = \frac{R_a}{R_a + R_1}.$$

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.

Программа и методика выполнения работы

1. Изучить конструкцию, основные параметры и условные обозначения приемно-усилительных ламп, размещенных на стенде.
2. Собрать схему (рис. 7.3), установив переключатели и выключатели в необходимое положение.

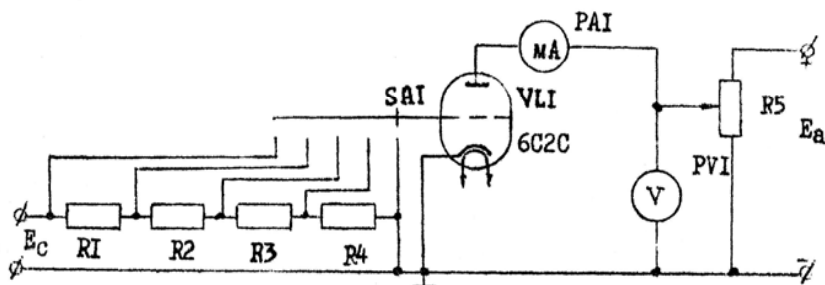


Рис. 7.3. Схема исследования триода

3. Снять семейство статических анодных характеристик триода:
 - а) включить питание стенда;
 - б) установить напряжение на управляющей сетке $U_c = 0$. Измерять анодный ток при изменении анодного напряжения (всего 8–9 значений). Анодный ток не должен превышать 9 мА. Результаты измерений занести в таблицу 7.2;
 - в) повторить пункт (б) при напряжении на управляющей сетке -1 В, -2 В, -4 В, -6 В.

Таблица 7.2

$U_c = 0$		$U_c = -2$ В		$U_c = -4$ В		$U_c = -6$ В	
U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА

4. Снять семейство статических анодно-сеточных характеристик триода $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$:
 - а) установить в начале напряжение на управляющей сетке $U_c = -10$ В, затем подать напряжение на анод $U_a = 100$ В;
 - б) поддерживая постоянное напряжение на аноде, измерять анодный ток при уменьшении напряжения на сетке (всего 6–7 зна-

чений). Анодный ток не должен превышать 9 мА. Результаты измерений занести в таблицу 7.3;

- в) повторить пункты (а), (б) при напряжении на аноде 150 В и 200 В.

Таблица 7.3

$U_a = 100$ В		$U_a = 150$ В		$U_a = 200$ В	
U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА

5. Пользуясь методикой предыдущего параграфа, снять семейство характеристик $I_a = f(U_c)$ триода для $R_a = 39$ кОм. Результаты измерений занести в таблицу 7.4.

Таблица 7.4

$U_a = 100$ В		$U_a = 150$ В		$U_a = 200$ В	
U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА

6. Снять семейство статических анодных характеристик пентода:
 - а) собрать схему (рис. 7.4), установив переключатели и выключатели в необходимое положение;
 - б) при напряжении на управляющей сетке $U_{c1} = -1$ В и напряжении на экранной сетке $U_{c2} = 100$ В измерять анодный ток при изменении анодного напряжения (всего 8–9 значений). Анодный ток не должен превышать 10 мА. Результаты измерений занести в таблицу 7.5;

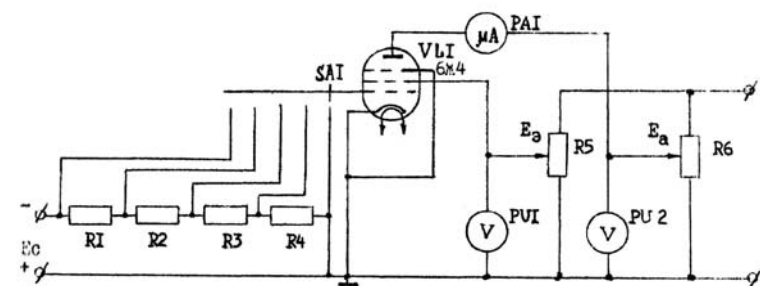


Рис. 7.4. Схема исследования пентода

в) повторить пункт (б) при напряжении на управляющей сетке $U_{c1} = -2$ В.

Таблица 7.5

$U_{c1} = -1$ В		$U_{c1} = -2$ В	
U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА

7. Снять семейство статических анодно-сеточных характеристик пентода:

- установить напряжение на управляющей сетке $U_{c1} = -5$ В;
- установить напряжение на аноде и экранной сетке, равное 100 В;
- поддерживая постоянное напряжение на аноде и экранной сетке, измерять анодный ток при изменении напряжения на управляющей сетке. Анодный ток не должен превышать 10 мА.

Результаты измерений занести в таблицу 7.6;

- повторить пункты (а), (б), (в) при напряжении на аноде $U_a = 250$ В.

Таблица 7.6

$U_a = 100$ В; $U_{c2} = 100$ В		$U_a = 250$ В; $U_{c2} = 100$ В	
U_{c1} , В	I_a , мА	U_{c1} , В	I_a , мА

Методика выполнения работы на компьютере

- Вызвать программу «MICROCAP-7».
- Открыть файл «LAB 7 триод», на экране появится схема включения триода (рис. 7.5), где $V1$ – источник анодного напряжения, $V2$ – источник сеточного напряжения, Т6SN7 – тип триода, соответствующий зарубежной маркировке электровакуумных ламп, $R1$ – сопротивление нагрузки (в исходном состоянии для удобства измерений $R1 = 1$ Ом).

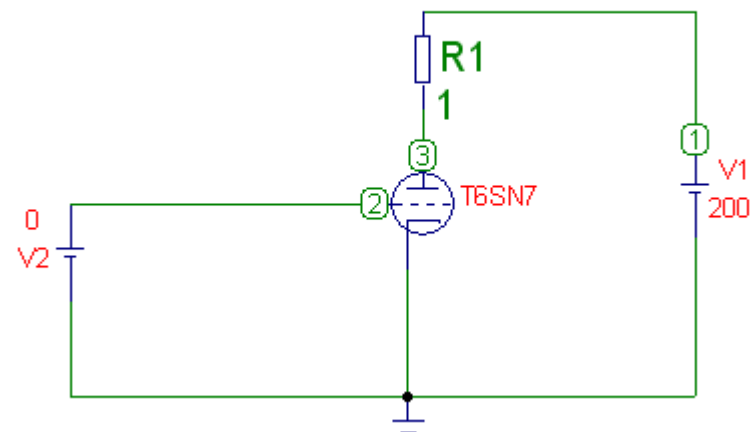


Рис. 7.5. Схема включения триода

3. Снять семейство статических анодных характеристик триода $I_a = f(U_a)$, при $U_c = \text{const}$:

установить напряжение на управляющей сетке $U_c = 0$ (значение $V2 = 0$, двойной щелчок по значению - см. приложение);

изменять напряжение на аноде ($V1$) от 0 до 200 В (см. приложение). Определить анодный ток, воспользовавшись кнопками меню «Analysis», «Transient Analysis», «Run» (см. приложение), где I_a показан зеленым цветом, U_c ($V2$) – синим цветом, U_a ($V1$) – красным цветом. Снять 7–8 точек. Результаты занести в таблицу 7.7;

Таблица 7.7

$U_c = 0$		$U_c = -2$ В		$U_c = -4$ В		$U_c = +1$ В		$U_c = +2$ В	
U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА

повторить измерения, изменяя напряжение на управляющей сетке $U_c = -2$ В, -4 В, $+1$ В, $+2$ В в соответствии с таблицей 7.7.

4. Снять семейство статических анодно-сеточных характеристик триода $I_a = f(U_c)$, при $U_a = \text{const}$:

установить напряжение на аноде (V1) $U_a = 100$ В;

изменять напряжение на сетке (V2): 0 В, -1 В, -2 В, -3 В, -4 В (см. приложение) в соответствии с таблицей 7.8. Определить анодный ток, воспользовавшись кнопками меню «Analysis», «Transient Analysis», «Run» (см. приложение), где I_a показан зеленым цветом, U_c (V2) – синим цветом, U_a (V1) – красным цветом. Данные занести в таблицу 7.8;

установить напряжение на аноде (V1) $U_a = 150$ В и повторить измерения. Результаты занести в таблицу 7.8;

установить напряжение на аноде (V1) $U_a = 200$ В и повторить измерения. Результаты занести в таблицу 7.8.

Таблица 7.8

$U_a = 100$ В		$U_a = 150$ В		$U_a = 200$ В	
U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА
0					
-1					
-2					
-3					
-4					

5. Пользуясь методикой предыдущего пункта, снять семейство статических анодно-сеточных характеристик триода $I_a = f(U_c)$, при сопротивлении в цепи анода $R1 = 39$ кОм:

двойной щелчок по значению R1, изменить значение 1 Ом на значение 39 кОм;

результаты занести в таблицу 7.9.

Таблица 7.9

$E_a = 100$ В		$E_a = 150$ В		$E_a = 200$ В	
U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА	U_c , В	I_a , мА
0					
-1					
-2					
-3					
-4					

6. Открыть файл «LAB_7_пентод», на экране появится схема включения пентода (рис. 7.6), где V1 – источник напряжения на управляющей сетке, V2 – источник напряжения на экранной сетке, V3 – источник анодного напряжения, 6L6 – тип пентода, соответствующий зарубежной маркировке электровакуумных ламп, R1 – сопротивление нагрузки.

7. Снять семейство статических анодных характеристик пентода $I_a = f(U_a)$, при $U_{c1} = \text{const}$, $U_{c2} = \text{const}$:

установить напряжение на управляющей сетке $U_{c1} = -1$ В и напряжение на экранной сетке $U_{c2} = 100$ В;

изменять напряжение на аноде от 0 до 250 В (см. приложение). Определить анодный ток, воспользовавшись кнопками меню «Analysis», «Transient Analysis», «Run» (см. приложение), где I_a показан зеленым цветом, U_a – красным цветом, U_{c1} – синим цветом. Снять 7–8 точек. Результаты занести в таблицу 7.9;

повторить измерения, изменив напряжение на управляющей сетке $U_{c1} = -2$ В, в соответствии с таблицей 7.10.

Таблица 7.10

$U_{c1} = -1$ В		$U_{c1} = -2$ В	
U_a , В	I_a , мА	U_a , В	I_a , мА

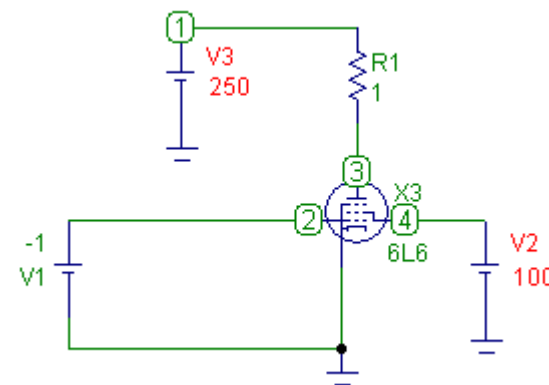


Рис. 7.6. Схема включения пентода

8. Снять семейство статических анодно-сеточных характеристик пентода:

установить напряжение на управляющей сетке $U_{c1} = -5$ В, напряжение на аноде $U_a = 100$ В, напряжение на экранной сетке оставить прежним $U_{c2} = 100$ В;

изменять напряжение на управляющей сетке U_{c1} . Определить анодный ток, воспользовавшись кнопками меню «Analysis», «Transient Analysis», «Run» (см. приложение), где I_a показан зеленым цветом, U_a – красным цветом, U_{c1} – синим цветом. Результаты занести в таблицу 7.10;

повторить измерения, изменив напряжение на аноде $U_a = 250$ В, в соответствии с таблицей 7.11.

Таблица 7.11

$U_a = 100$ В, $U_{c2} = 100$ В		$U_a = 250$ В, $U_{c2} = 100$ В	
U_{c1} , В	I_a , мА	U_{c1} , В	I_a , мА
-5		-5	
-4		-4	
-3		-3	
-2		-2	
-1		-1	

По результатам измерений:

а) построить семейства характеристик триода и пентода, уметь их объяснить;

б) по характеристикам определить статические параметры ламп. Коэффициент усиления μ для пентода рассчитать по формуле $\mu = SR_i$. Найденные значения занести в таблицу 7.12;

Таблица 7.12

Тип лампы	Значения параметров								
	S	Ri	μ	I_{a0}	U_{a0}	I_{ma}	U_{ma}	U_{mc}	E_{cm}
Триод									
Пентод									

в) построить, пользуясь семейством статических анодных характеристик триода, анодно-сеточную характеристику для $R_a = 39$ кОм;

г) построить линию нагрузки триода, определить на ней рабочий участок и выбрать положение рабочей точки для получения наи-

меньших нелинейных искажений. Определить значения I_{a0} , U_{a0} , I_{ma} , U_{ma} , U_{mc} , E_{cm} . Найденные значения занести в таблицу 7.12.

Содержание отчета

1. Номер и название работы.
2. Цель работы.
3. Схемы измерений.
4. Таблицы опытных данных.
5. Расчетные формулы и таблицы расчетных данных.
6. Графические зависимости.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните конструкцию, принцип работы, параметры и характеристики триода.
2. Объясните конструкцию, принцип работы, параметры и характеристики тетрода.
3. Объясните конструкцию, принцип работы, параметры и характеристики лучевого тетрода.
4. Объясните конструкцию, принцип работы, параметры и характеристики пентода.
5. Что такое динаatronный эффект и какие меры применяются для его устранения в лучевом тетроде и пентоде?
6. Как изменяется положение анодно-сеточной характеристики триода и пентода при изменении анодного напряжения?
7. Как построить анодно-сеточную характеристику триода по семейству статических анодных характеристик, зная E_a и R_a ?

Лабораторная работа №8

Схемы включения транзистора

Цель работы: провести экспериментальный сравнительный анализ усилительных каскадов, в которых транзистор включается по схеме с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК); исследовать влияние нагрузочного сопротивления на основные параметры усилителя.

Лабораторное оборудование

1. Лабораторный стенд ЛОЭ-2.
2. Генератор сигналов ГЗ-109.
3. Милливольтметр ВЗ-38.
4. Осциллограф С1-81 или др.
5. ПЭВМ.

Краткие теоретические сведения

В транзисторных схемах источник сигнала может включаться в цепь базы или эмиттера, нагрузка – в цепь коллектора или эмиттера, а третий электрод транзистора оказывается общим для входной и выходной цепи. В зависимости от того, какой электрод транзистора оказывается общим, различают схемы ОЭ, ОБ, ОК, показанные на рисунке 8.1.

В принципиальной схеме ОЭ (рис. 8.1, а) конденсаторы C_1 и C_2 служат для связи каскада с источником сигнала и нагрузкой на переменном токе и исключают в то же время влияние источника сигнала и нагрузки на режим работы каскадов по постоянному току. Резисторы R_1 , R_2 , R_k , R_3 обеспечивают выбранный режим работы транзистора в активной области, т.е. выбранное положение рабочей точки на вольтамперных характеристиках транзистора. Конденсатор C_3 выполняет роль блокировочного конденсатора, исключая из работы на переменном токе резистор R_3 (ОЭ) или делитель напряжения в цепи базы R_1 и R_2 (ОБ). Он тем самым обеспечивает присоединение эмиттера (базы) к общей точке схемы.

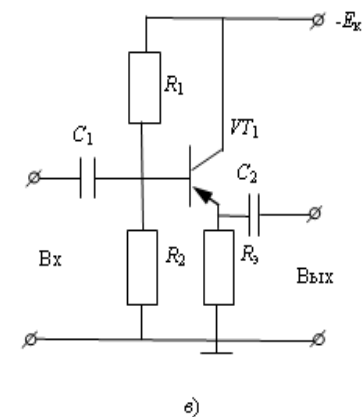
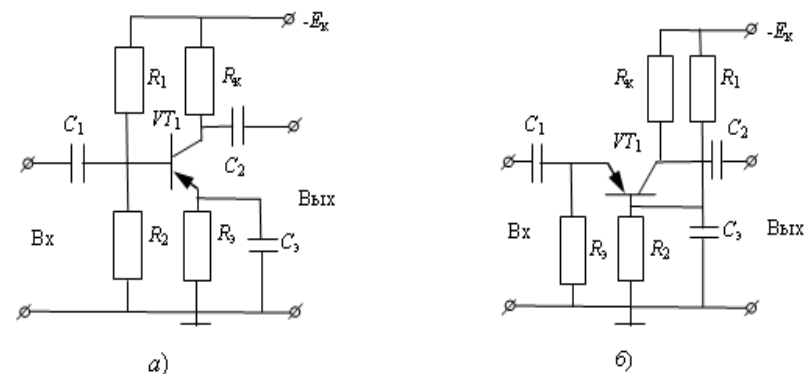


Рис. 8.1. Принципиальные схемы каскадов:
а – общий эмиттер; б – общая база; в – общий коллектор

Для анализа транзисторных схем важно знать, как связаны точки напряжения между выводами транзистора, т.е. знать вольтамперные характеристики.

В случае схемы ОЭ удобно пользоваться зависимостями $I = f_1(U_э, U_{кэ})$ и $I_к = f_2(I, U_{кэ})$. Первые из них называются семейством входных характеристик, а вторые – семейством выходных характеристик. Их вид приведен на рисунке 8.2.

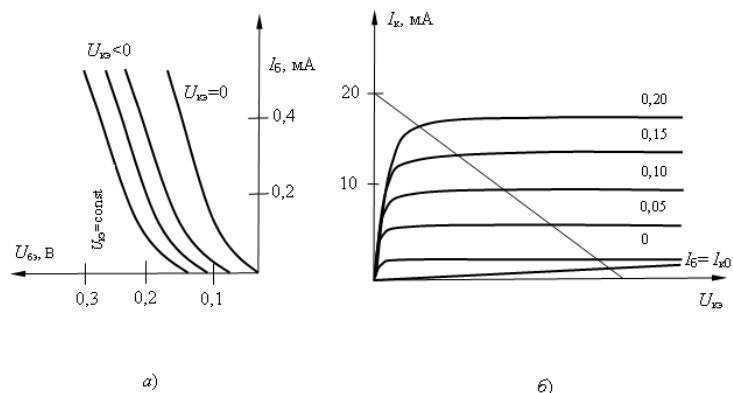


Рис. 8.2. Статические вольтамперные характеристики транзистора: а – входные; б – выходные

В усилительных схемах используется работа транзистора в активном режиме, когда эмиттерный переход транзистора смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. При этом транзистор обладает усилительными свойствами, токи его электродов связаны между собой следующими соотношениями:

$$\beta = \frac{I_к}{I_б}; \quad \beta + 1 = \frac{I_э}{I_б}; \quad \alpha = \frac{I_к}{I_э},$$

откуда следует, что $\beta = \alpha / 1 - \alpha$, $\alpha = \beta / \beta + 1$.

Для построения нагрузочной прямой $I_к = (E_к - U_{кэ}) / (R_к + R_э)$, как указано на рисунке 8.2, б, транзистор будет работать в активном режиме при токах базы в диапазоне от $I_{к0}$ до $I_н$.

Параметры схем включения транзистора представлены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Параметр	Схема включения транзистора		
	ОЭ	ОБ	ОК
K_u (коэффициент усиления по напряжению)	$K_u = U_{кэ} / U_{бэ}$ несколько сотен	$K_u = U_{бэ} / U_{бк}$ несколько сотен или тысяч	$K_u = U_{кэ} / U_{бк}$ около единицы
K_i (коэффициент усиления по току)	$K_i = I_к / I_б$ 20...200	$K_i = I_к / I_э$ 1	$K_i = I_э / I_б$ 20...200
K_p (коэффициент усиления по мощности)	$K_p = K_u K_i$ несколько тысяч	$K_p = K_u K_i$ несколько сотен	$K_p = K_u K_i$ несколько десятков
$R_{вх}$ (входное сопротивление)	200...2000 Ом	30...1500 Ом	0,2...1 МОм
$R_{вых}$ (выходное сопротивление)	10...100 кОм	0,5...2 МОм	50...500 Ом

Программа и методика выполнения работы

1. Исследовать зависимость входного сопротивления и коэффициентов усиления по напряжению, току, мощности от величины сопротивления нагрузки для разных схем включения:

а) собрать схему с общей базой. Для этого переключатели установить в следующие положения: $S_1 - 2$; $S_2 - 4$; $S_3 - 5$; $S_4 - 7$;

б) подать на вход усилителя (клемма «Вх1») сигнал от генератора (напряжение 50 мВ, частота 2000 Гц). Устанавливая переключатель S_6 в позиции 12–15, изменять сопротивления нагрузки и измерять напряжение на входе (контрольная точка 6), напряжение на выходе (контрольная точка 7). Данные занести в таблицу 8.2.

Определить $R_{вх}$, K_i , K_u и K_p при каждом $R_н$. Данные свести в таблицу 8.2;

в) собрать схему с общей эмиттером. Для этого переключатели установить в следующие положения: $S_1 - 1$; $S_2 - 4$; $S_3 - 6$; $S_4 - 7$;

г) подать на вход усилителя (клемма «Вх2») сигнал от генератора (напряжение 50 мВ, частота 2000 Гц). Устанавливая переключатель S_6 в позиции 12–15, изменять сопротивления нагрузки и измерять напряжение на входе (контрольная точка 2), напряжение на выходе (контрольная точка 7). Данные занести в таблицу 8.2.

Определить $R_{вх}$, K_i , K_u и K_p при каждом $R_н$. Данные свести в таблицу;

д) собрать схему с общей коллектором. Для этого переключатели установить в следующие положения: $S_1 - 1$; $S_2 - 3$; $S_3 - 5$; $S_4 - 8$;

е) подать на вход усилителя (клемма «Вх2») сигнал от генератора (напряжение 50 мВ, частота 2000 Гц). Устанавливая переключатель S_6 в позиции 12–15, изменять сопротивления нагрузки и измерять напряжение на входе (контрольная точка 2), напряжение на выходе (контрольная точка 5). Данные занести в таблицу 8.2.

Определить $R_{вх}$, K_i , K_u и K_p при каждом R_n . Данные свести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2

Переменная	Способ определения	Значения переменной											
		ОБ				ОЭ				ОК			
U_r	Установить на выходе генератора, измерить милливольтметром	50 мВ				50 мВ				50 мВ			
$R_{изм}$	$R_{изм} = R6$ $R_{изм} = R1$	47 Ом				1 кОм				1 кОм			
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R_n	Установить при помощи переключателя	20 Ом	510 Ом	3,6 кОм	10 кОм	20 Ом	510 Ом	3,6 кОм	10 кОм	20 Ом	510 Ом	3,6 кОм	10 кОм
$U_{вх}$	Измерить милливольтметром												
$U_{вых}$	Измерить милливольтметром												

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$i_{вх}$	Вычислить $i_{вх} = \frac{U_r \cdot U_{вх}}{R_{изм}}$												
i_n	Вычислить $i_n = \frac{U_{вых}}{R_n}$												
$R_{вх}$	Вычислить $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{i_{вх}}$												
$R_{вых}$	Вычислить $R_{вых} = \frac{U_{вых\ xx}}{i_{вых\ кз}}$												
K_u	Вычислить $K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$												
K_i	Вычислить $K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$												
K_p	Вычислить $K_p = K_u K_i$												

2. Исследовать зависимость высшей граничной частоты коэффициента усиления по напряжению от схемы включения транзистора:

а) на входе усилителя (для схемы включения ОБ клемма «Вх1») поддерживать постоянное напряжение $E_r = 50$ мВ;

б) изменяя частоту входного сигнала, найти такую f , при которой выходное напряжение усилителя уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с его величиной на частоте 2 кГц.

Повторить измерения для схем усилителя ОЭ, ОК, подавая сигналы на клемму «Вх2».

Методика выполнения работы на компьютере

1. Исследовать зависимость входного сопротивления и коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности от величины сопротивления нагрузки для разных схем включения транзистора на компьютере.

1.1. Вызвать программу «MICROCAP».

1.2. Открыть файл «LAB8_1». На экране появится схема включения биполярного транзистора с общей базой (ОБ) (рис. 8.3), где $V1$ – источник напряжения на входе 1, $V2$ – источник напряжения на входе 2, $VT1$ – биполярный транзистор 2N3249, соответствующий зарубежной маркировке, $R1$ – сопротивление на входе 1, стоящее в цепи базы; $R2/R3$ – делитель напряжения в цепи базы, с помощью которого подается определенное значение тока базы на вход транзистора; $R4$ – сопротивление в цепи коллектора; $R5$ – сопротивление в цепи эмиттера; $R6$ – сопротивление на входе 1; $R7, R8, R9, R10$ – сопротивления нагрузки (номинальные значения элементов схемы были приведены ранее).

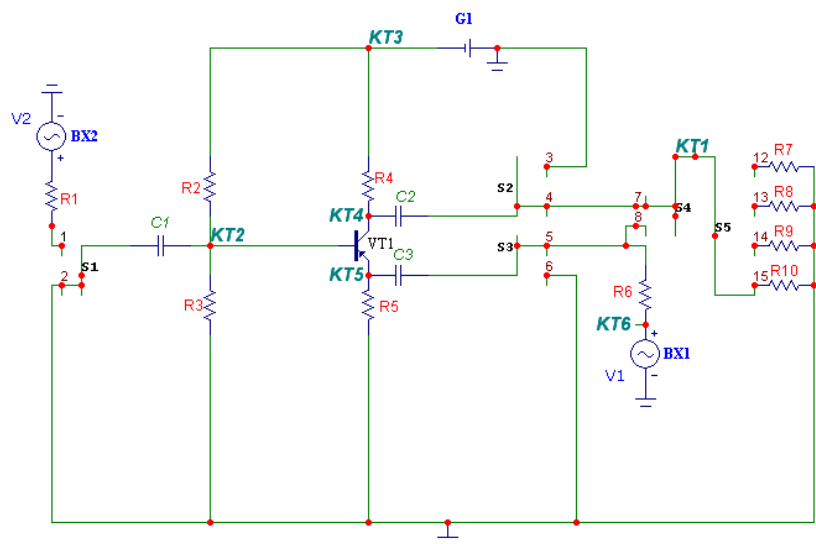


Рис. 8.3. Схема включения биполярного транзистора с ОБ

1.3. Измерить значения входного напряжения $U_{вх}$ и выходного напряжения $U_{вых}$ при различных значениях сопротивления нагрузки, воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить) (см. приложение), где красным цветом обозначен входной

сигнал, а синим цветом – выходной сигнал. Значения занести в таблицу 8.2.

1.4. Рассчитать значения $R_{вх}$, K_u , K_i , K_p при каждом R_n . Данные свести в таблицу 8.2.

1.5. Открыть файл «LAB8_2», на экране появится схема включения биполярного транзистора с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 8.4).

1.6. Повторить п. 1.3 и 1.4 для транзистора с ОЭ. Данные свести в таблицу 8.2.

1.7. Открыть файл «LAB8_3», на экране появится схема включения биполярного транзистора с общим коллектором (ОК) (рис. 8.5).

1.8. Повторить п. 1.3 и 1.4 для транзистора с ОК. Данные свести в таблицу 8.2.

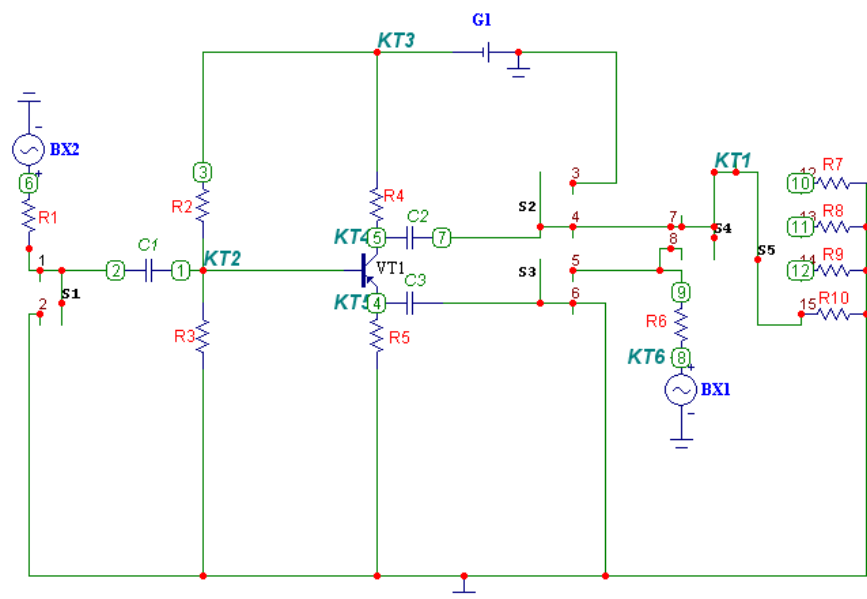


Рис. 8.4. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ

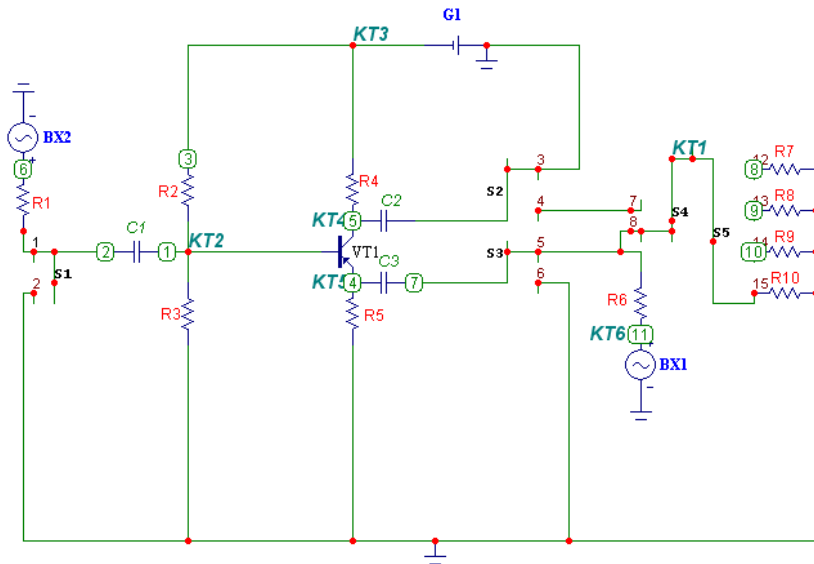


Рис. 8.5. Схема включения биполярного транзистора с ОК

2. Получить АЧХ и ФЧХ каскадов с ОБ, ОЭ, ОК на ПЭВМ с использованием программы MICROCAP. Исследовать зависимость нижней и верхней граничных частот f_n , f_v , коэффициента усиления K_u на этих частотах, угла сдвига фаз φ каскадов от схемы включения транзистора. На входе усилителя поддерживается напряжение источника $E_r = 50$ мВ, на выходе усилителя $R_n = \infty$, т.е. сохраняется режим холостого хода.

2.1. Вызвать программу MICROCAP.

2.2. Открыть файл «LAB8_1», на экране появится схема усилительного каскада с ОБ.

2.3. Получить АЧХ и ФЧХ каскада с ОБ, воспользовавшись кнопками меню «Analysis», «AC Analysis», «Run» (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 φ от частоты f .

По графикам рассчитать значения $K_{U_n} = K_{U_v}$, $K_{U\text{дб}}$, f_n , f_v и φ на частотах 10 Гц и 10 МГц и занести в таблицу 8.3. Перерисовать графики в тетрадь.

2.4. Открыть файл «LAB8_2», на экране появится схема усилительного каскада с ОЭ.

2.5. Получить АЧХ и ФЧХ каскада с ОЭ аналогично п. 2.3. Данные занести в таблицу 8.3. Перерисовать графики в тетрадь на те же координатные поля, что и графики для схемы с ОБ.

2.6. Открыть файл «LAB8_3», на экране появится схема усилительного каскада с ОК.

Получить АЧХ и ФЧХ каскада с ОК аналогично п. 2.3. Данные занести в таблицу 8.3. Перерисовать графики в тетрадь на те же координатные поля, что и графики для схемы с ОБ и ОЭ.

Таблица 8.3

		ОБ	ОЭ	ОК
$K_{U_n} = K_{U_v}$	10 Гц			
	10 МГц			
$K_{U\text{дб}}$				
f_n				
f_v				
φ	10 Гц			
	10 МГц			

Содержание отчета

1. Цель и программа работы.
2. Схема исследования.
3. Спецификация приборов.
4. Таблицы опытных и расчетных данных.
5. Расчетные формулы.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Чем различаются между собой усилительные каскады с ОБ, ОЭ и ОК, схемные различия, различия в параметрах и характеристиках?

2. Объясните причины возникновения искажений в транзисторном каскаде.
3. Объясните принцип работы транзистора типа $p-n-p$ ($n-p-n$).
4. Каковы основные параметры транзисторного усилителя?
5. Каковы режимы работы транзисторного усилителя?
6. Каковы преимущества и недостатки транзисторных каскадов в сравнении с ламповыми?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. *Бобровников, Л. З.* Электроника : учебник для вузов / Л. З. Бобровников. – СПб.: Питер, 2004 – 560 с. (с. 37–67).
2. *Галкин, В. И.* Промышленная электроника и микроэлектроника / В.И. Галкин. – Минск: Беларусь, 2000. – 350 с.
3. *Гальперин, М. В.* Электронная техника / М. В. Гальперин. – Москва: Форум-ИНФРА-М, 2005. – 352 с.
4. *Гусев, В. Г.* Электроника / В. Г. Гусев, Ю. Н. Гусев. – Москва: Высшая школа, 1991. – 622 с.
5. *Забродин, Ю. С.* Промышленная электроника /Ю. С. Забродин. – Москва: Высшая школа, 1982. – 496 с.
6. *Игумнов, Д. В.* Основы полупроводниковой электроники / Д. В. Игумнов, Г. П. Костюнина. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2005. – 392 с.
7. *Миловзоров, О. В.* Электроника : учебник для вузов / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – Москва: Высшая школа, 2005. – 288 с.
8. Основы промышленной электроники. / под ред. В. С. Герасимова. – Москва: Высшая школа, 1986. – 336 с.
9. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи : конспект лекций / сост.: И. Л. Дудников, И. П. Матвеевко. – Минск : БГАТУ, 2004. – 122 с.
10. *Прянишников, В. А.* Электроника : курс лекций / В. А. Прянишников. – Санкт-Петербург: Крона-Принт , 2000. – 416 с.

Дополнительная

11. *Арестов, К. А.* Основы электроники и микропроцессорной техники / К. А. Арестов. – Москва: Колос, 2001. – 216 с.
12. *Булычев, А. Л.* Электронные приборы/ А. Л. Булычев, П. М. Лямин, Е. С Тулинов. – Минск: Высшэйшая школа, 1999. – 415 с.
13. *Ибрагим, К. Ф.* Основы электронной техники. Элементы, схемы, системы : пер. с англ. / К. Ф. Ибрагим. – Москва: Мир, 2001. – 398 с.
14. *Лачин, В. И.* Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д: Феникс, 2000. – 448 с.

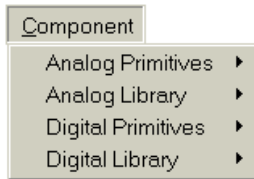
Приложение

MICROCAP-7 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:

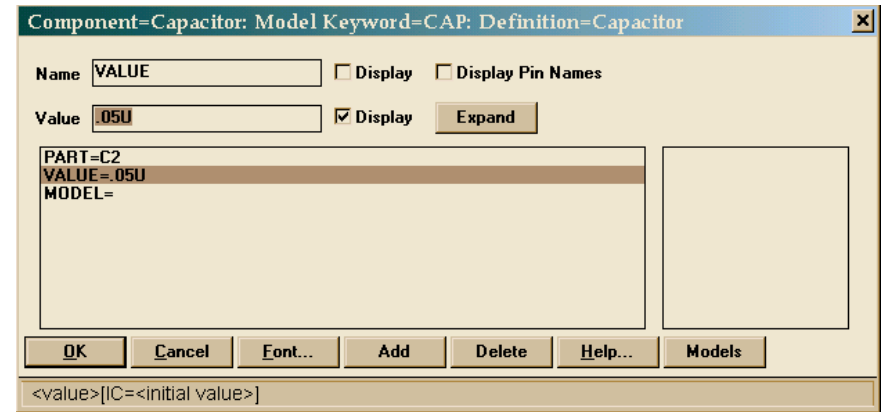


2.1. Для выбора резисторов и конденсаторов:

2.1.1.



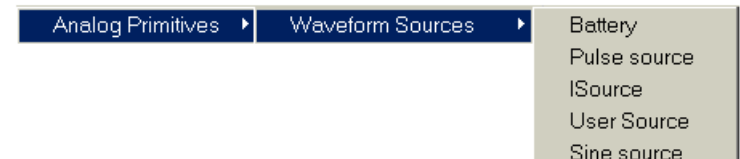
Установить требуемое номинальное значение R или C – двойной щелчок по элементу;



– изменение значения в строке Value.

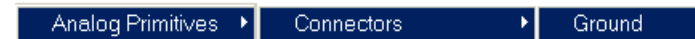
2.2. Для выбора источников напряжения:

2.2.1.



2.2.2. Установить требуемое максимальное значение напряжения источника.

2.3. Для заземления



2.4. Для соединения элементов:

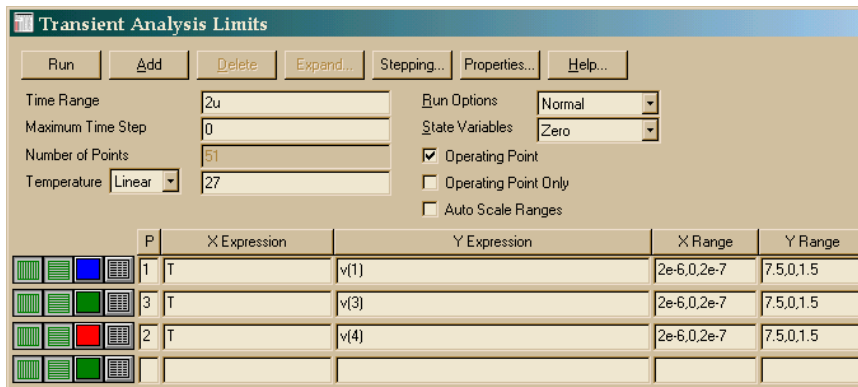
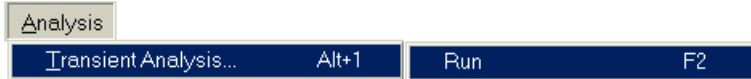


2.5. При ошибочном соединении ненужную связь необходимо выделить, подведя курсор к линии и, сделав один щелчок, нажать Delete.

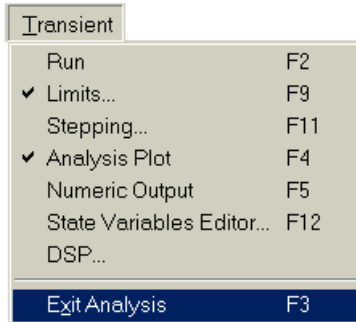
2.6. Для обозначения узлов в схеме нажать кн. Node Numbers:



3. Для получения временных диаграмм:



4. Для выхода из режима Analysis использовать кнопку Меню:



ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ

Практикум

Составители:

Матвеев Ирина Петровна,
Костикова Татьяна Анатольевна,
Матвеев Владимир Владимирович

Ответственный за выпуск *О. Ч. Ролич*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *А. И. Стебуля*

Подписано в печать 17.06.2010 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 4,72. Тираж 250 экз. Заказ 613.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЛИ № 02330/0552841 от 14.04.2010.

ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.

Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.