

А. С. Глинченко, Н. М. Егоров,
В. А. Комаров, А. В. Сарафанов

Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий

*Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области радиотехники,
электроники, биомедицинской техники и автоматизации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению подготовки 210300
«Радиотехника»*



Москва, 2008

УДК 621.38
ББК 32.973.26-108.2

Рецензенты:

Шайдунов В. В., директор Института вычислительного моделирования СО РАН, член-корреспондент РАН;

Быков Д. В., ректор Московского государственного института электроники и математики, доктор технических наук, профессор.

Глинченко А. С., Егоров Н. М., Комаров В. А., Сарафанов А. В.

Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий: учеб. пособие. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 352 с.

ISBN 5-94074-416-8

В книге рассмотрены задачи, методы и особенности автоматизированного лабораторного практикума с удаленным доступом (АЛП УД) по исследованию полупроводниковых приборов, приведено описание реализующей его системы АЛП УД «Электроника», в том числе входящего в ее состав аппаратно-программного комплекса (АПК) «Электроника», разработанного на основе технологии корпорации National Instruments в региональном инновационном центре «Центр технологий National Instruments» при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». Приведены задания и методические указания к лабораторным работам по экспериментальному исследованию и моделированию полупроводниковых диодов, стабилитронов, полевых и биполярных транзисторов, включающие измерение их вольт-амперных характеристик и параметров, исследование технологического разброса и работы на переменном токе.

Издание предназначено для студентов и учащихся технических специальностей вузов, колледжей, профессиональных училищ и лицеев для использования в лабораторном практикуме дисциплины «Электроника» и других родственных дисциплин, выполняемом на базе сетевой лаборатории Сибирского федерального округа с помощью АПК УД «Электроника».

Учебное пособие подготовлено в рамках выполнения инновационной образовательной программы по направлению «Информатизация и автоматизированные системы управления», реализуемой в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

На прилагаемом к книге DVD-ROM находятся интерактивное электронное техническое руководство к АПК УД «Электроника»; демо-версия системы OrCAD 9.1; файлы проектов для математического моделирования полупроводниковых приборов; система компьютерной проверки знаний тестированием с примерами тестовых заданий; 30-дневная версия LabVIEW 8.5; примеры виртуальных приборов.

Considered are some tasks, methods, and specific features of automated remote-access laboratory-based practicum (ARALP) for the research of semiconductor-based devices. The description covers its realizing system «Electronics» ARALP, including its incorporated hardware-and-software complex «Electronics». That was developed on the base of National Instruments technologies at the Regional Center «National Instruments Technology Center» [<http://sfu-kras.ru/studies/sdo/ni/>], affiliated with Federal State Education Institution of Higher Professional Education (FSE IHP) «Siberian Federal University». Assignments and methodical guides for laboratory-based exercises in experimental research and simulation of semiconductor-based diodes, stabilitrans, unipolar FETs and bipolar transistors, as well as diode characteristic measurements; investigation of parameter spread and AC-based operations, are given.

The learning complex is designed for students of technical areas at universities, colleges, vocational training institutions, and lyceums for applications in laboratory-based practicum studying «Electronics» or other related subjects, on the base of the Network Laboratory in the Siberian Federal District [www.alpsib.ru/], through «Electronics» ARALP.

© ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2008
ISBN 5-94074-416-8 © Оформление, издание, ДМК Пресс, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ



Введение	10

▼ 1

Автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом на базе технологий National Instruments	14

1.1. Обобщенная схема построения АЛП УД	14
1.2. Компьютерные измерительные технологии National Instruments	16
1.3. Обобщенная схема построения систем АЛП УД с применением технологий National Instruments	22
1.4. Система АЛП УД «Электроника»	24
1.4.1. Функциональные характеристики АПК УД «Электроника»	24
1.4.2. Исследования, выполняемые с помощью моделирования на ПЭВМ	28
1.4.3. Интерактивное электронное техническое руководство	29
1.4.4. Электронная система тестирования	30
1.4.5. Организация лабораторного практикума на базе сетевой лаборатории	31

▼ 2

Методы и средства измерения вольт-амперных характеристик и параметров полупроводниковых приборов	34

2.1. Измерение ВАХ полупроводниковых приборов методом вольтметра-амперметра	34
2.2. Определение параметров полупроводниковых приборов методом вольтметра-амперметра	36
2.3. Схемы измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов, основанные на измерении напряжений	37

2.4. Способы измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов	41
2.5. Средства, используемые для измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов	42
2.6. Традиционные средства измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов	42
2.7. Средства измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов на базе ПЭВМ	44

▼ 3

Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Электроника»	48
3.1. Конфигурация АПК «Электроника» и его инструментальное обеспечение	48
3.2. Автоматизированный лабораторный макет АПК «Электроника»	50
3.3. Клиентское программное обеспечение АПК «Электроника»	55
3.4. Виртуальные стенды для лабораторных исследований ВАХ и параметров полупроводниковых приборов	58
3.4.1. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров выпрямительных диодов	58
3.4.2. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров стабилитронов	62
3.4.3. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров полевых транзисторов	66
3.4.4. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров биполярных транзисторов	73
3.5. Виртуальные стенды для лабораторных исследований технологического разброса ВАХ и параметров полупроводниковых приборов	82
3.5.1. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов	82
3.5.2. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров стабилитронов	85
3.5.3. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов	89

3.5.4. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров биполярных транзисторов	94
3.6. Виртуальные стенды для лабораторных исследований полупроводниковых приборов на переменном токе	98
3.6.1. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе выпрямительных диодов	98
3.6.2. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе стабилитронов	101
3.6.3. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе полевых транзисторов	104
3.6.4. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе биполярных транзисторов	108

▼ 4

Исследование полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ	113
4.1. Модели, средства и технология исследования полупроводниковых приборов с помощью моделирования на ПЭВМ	113
4.2. Исследование на ПЭВМ выпрямительных диодов	117
4.2.1. Исследование ВАХ и параметров выпрямительного диода	117
4.2.1.1. Методика исследования прямой ветви ВАХ выпрямительного диода	118
4.2.1.2. Методика исследования обратной ветви ВАХ выпрямительного диода	120
4.2.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов	121
4.2.2.1. Методика исследования технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительного диода	122
4.2.3. Исследование работы выпрямительного диода на переменном токе ...	124
4.2.3.1. Методика исследования работы выпрямительного диода в схеме однополупериодного выпрямителя	124
4.2.3.2. Методика исследования работы выпрямительного диода в схеме двухполупериодного выпрямителя	127
4.3. Исследование на ПЭВМ стабилитронов	130
4.3.1. Исследование ВАХ и параметров стабилитрона	130

4.3.1.1. Методика исследования прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитрона	130
4.3.1.2. Методика исследования характеристик стабилизации $U_{\text{ст}} = f(E)$ при различных сопротивлениях нагрузки стабилитрона	132
4.3.1.3. Методика исследования нагрузочных характеристик стабилитрона $U_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$	133
4.3.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона	137
4.3.2.1. Методика исследования технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона	137
4.3.3. Исследования работы стабилитрона на переменном токе	139
4.3.3.1. Методика исследования работы стабилитрона на переменном токе	139
4.4. Исследование на ПЭВМ полевых транзисторов	141
4.4.1. Исследование ВАХ и параметров полевого транзистора	141
4.4.1.1. Методика исследования статических передаточных ВАХ полевого транзистора	142
4.4.1.2. Методика исследования статических выходных ВАХ полевого транзистора	144
4.4.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов	146
4.4.2.1. Методика исследования технологического разброса статических передаточных ВАХ полевого транзистора	147
4.4.2.2. Методика исследования технологического разброса статических выходных ВАХ полевого транзистора	148
4.4.3. Исследование работы полевого транзистора на переменном токе	150
4.4.3.1. Методика исследования работы полевого транзистора на переменном токе	151
4.4.4. Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров полевого транзистора	153
4.4.4.1. Методика исследования температурной зависимости статических передаточных ВАХ полевого транзистора	154
4.4.4.2. Методика исследования температурной зависимости статических выходных ВАХ полевого транзистора	156
4.4.4.3. Методика исследования температурной зависимости крутизны полевого транзистора	158
4.4.5. Исследование частотных свойств полевого транзистора	159
4.5. Исследование на ПЭВМ биполярных транзисторов	162

4.5.1. Исследование ВАХ и параметров биполярного транзистора	
4.5.1.1. Методика исследования статических входных ВАХ биполярного транзистора	
4.5.1.2. Методика исследования статических выходных ВАХ биполярного транзистора	
4.5.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров биполярного транзистора	
4.5.2.1. Методика исследования технологического разброса статических входных ВАХ биполярного транзистора	
4.5.2.2. Методика исследования технологического разброса статических выходных ВАХ биполярного транзистора	
4.5.3. Исследование работы биполярного транзистора на переменном токе	
4.5.3.1. Методика исследования работы биполярного транзистора на переменном токе	
4.5.4. Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров биполярного транзистора	
4.5.4.1. Методика исследования температурной зависимости статических входных ВАХ биполярного транзистора	
4.5.4.2. Методика исследования температурной зависимости статических выходных ВАХ биполярного транзистора	
4.5.4.3. Методика исследования температурной зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора	
4.5.5. Исследование частотных свойств биполярного транзистора	

▼ 5

Описание лабораторных работ по исследованию полупроводниковых приборов

Лабораторная работа № 1

Измерение и исследование ВАХ и параметров выпрямительных диодов

Лабораторная работа № 2

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов

Лабораторная работа № 3

Исследование работы выпрямительных диодов на переменном токе

Лабораторная работа № 4

Измерение и исследование ВАХ и параметров стабилитронов

Лабораторная работа № 5	
Исследование технологического разброса ВАХ и параметров стабилитронов	216
Лабораторная работа № 6	
Исследование работы стабилитрона на переменном токе	223
Лабораторная работа № 7	
Измерение и исследование ВАХ и параметров полевых транзисторов ...	231
Лабораторная работа № 8	
Исследование технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов	247
Лабораторная работа № 9	
Исследование работы полевого транзистора на переменном токе	256
Лабораторная работа № 10	
Измерение и исследование ВАХ и параметров биполярных транзисторов	269
Лабораторная работа № 11	
Исследование технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов	282
Лабораторная работа № 12	
Исследование работы биполярного транзистора на переменном токе	291

▼ 6

Выполнение лабораторных исследований на базе

сетевой лаборатории	306
6.1. Основные функциональные характеристики	306
6.2. Методика проведения лабораторных исследований	311
6.2.1. Экспериментальные исследования	311
6.2.2. Исследования, проводимые средствами математического моделирования	313
6.2.3. Дополнительные возможности	314

Заключение	316

Список литературы	317

Приложение 1

Список используемых сокращений	319

Приложение 2

Описание моделей радиокомпонентов и их параметров	321

Приложение 3

Предельные эксплуатационные данные исследуемых полупроводниковых приборов	340

Приложение 4

Варианты заданий	342

Введение



Современная электроника охватывает практически все сферы бытовой и профессиональной деятельности человека. Изучение ее основ предусмотрено большим количеством образовательных программ систем высшего, среднего и начального профессионального образования. Базовыми компонентами современной электроники являются полупроводниковые приборы и создаваемые на их основе полупроводниковые интегральные микросхемы. Теоретическое и практическое изучение полупроводниковых приборов [1–3] осуществляется в рамках учебных дисциплин «Электроника», «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электронная техника», «Электроника и микроэлектроника», «Полупроводниковые приборы», «Введение в микропроцессоры и цифровые микросхемы», «Системы автоматического управления и обработки данных» и др. Лабораторные практикумы этих дисциплин включают исследование наиболее широко применяемых (базовых) видов полупроводниковых приборов: выпрямительные диоды, стабилитроны, биполярных и полевых транзисторов. Данные виды полупроводниковых приборов являются объектами исследования и в автоматизированном лабораторном практикуме (АЛП¹), описанию которого посвящено данное учебное пособие.

Лабораторный практикум реализуется с применением системы АЛП с удаленным доступом (АЛП УД) «Электроника», в состав которой входит аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом (АПК УД) «Электроника». АЛП УД разработан в региональном инновационном центре «Центр технологий *National Instruments*» [<http://sfu-kras.ru/studies/sdo/ni>] при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» на основе технологии, инструментальных и программных средств *National Instruments (NI) – LabVIEW* [4, 5]. Сетевая лаборатория Сибирского федерального округа [www.alpsib.ru], на базе которой организуется учебный процесс с применением систем АЛП УД (в том числе и АЛП УД «Электроника») обеспечивает: авторизованный, регламентированный доступ АПК УД методом сетевого и информационному обеспечению лабораторных практикумов, к программному обеспечению, позволяющему выполнять лабораторные исследования.

¹ Список используемых сокращений приведен в приложении 1.

средствами математического моделирования; виртуальное общение преподавателей, студентов и административного персонала лаборатории и пр.

Выполнение лабораторных исследований в системе АЛП УД [7, 8] осуществляется с помощью сетевых телекоммуникационных технологий с персонального компьютера, удаленного на любое расстояние от места размещения дистанционно управляемого исследуемого объекта (лабораторного макета, входящего в состав АПК), и сопряженных с ним компьютерных средств измерения и управления.

По сравнению с использованием традиционного лабораторного практикума применение дистанционных компьютерных технологий измерения и управления существенно сокращает требуемый объем оборудования, расширяет измерительные и исследовательские возможности практикума, повышает его производительность. Система АЛП УД на базе АПК УД «Электроника» позволяет проводить лабораторные исследования в многопользовательском режиме (режим клиент-сервер) как с учебной группой в специализированной компьютерной лаборатории или классе, так и индивидуально с любого клиентского персонального компьютера путем подключения к серверу системы АЛП УД с помощью сетей *Интернет/Intranet*.

Система АЛП УД включает экспериментальные исследования, выполняемые с помощью АПК УД «Электроника», и исследования, проводимые с помощью моделирования на ПЭВМ на основе демоверсии системы схемотехнического моделирования *OrCAD 9.1* [www.cadence.com/products/orcad/index.aspx]. *Цели лабораторного практикума* – проверка и закрепление изучаемых в теоретическом курсе физических принципов работы полупроводниковых приборов, практическое освоение методов и средств их экспериментального исследования и моделирования, сопоставление теоретических результатов и результатов эксперимента и моделирования, анализ причин возможного их расхождения.

Средствами АПК УД «Электроника» и моделирования на ПЭВМ обеспечиваются следующие лабораторные исследования:

- измерение и исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) и параметров полупроводниковых приборов;
- исследование технологического разброса ВАХ и параметров полупроводниковых приборов;
- исследование работы полупроводниковых приборов на переменном токе.

Экспериментальные исследования полупроводниковых приборов средствами АПК «Электроника» основываются на измерении их ВАХ, статических и динамических (дифференциальных) параметров, осциллограмм сигналов при работе в простейших электронных схемах. По экспериментальным данным находятся также статические и дифференциальные параметры, используемые в математических моделях полупроводниковых приборов.

Моделирование на ПЭВМ осуществляется на основе математических моделей исследуемых в лабораторном практикуме полупроводниковых приборов. Моделирование охватывает не только задачи исследования, экспериментально решаемые средствами АПК «Электроника», но и не реализуемые ими задачи изучения температурных, частотных и импульсных свойств полупроводниковых приборов,

их поведения при значениях токов и напряжений, близких или превышающих предельно допустимые.

Практикум включает 12 лабораторных работ по исследованию полупроводниковых приборов конкретного вида (выпрямительных диодов, стабилитронов, полевых и биполярных транзисторов). В каждой работе с целью сравнения изучаемых свойств и характеристик предусмотрено исследование двух типов полупроводниковых приборов одного вида, различающихся материалом, технологией изготовления или параметрами. Это выпрямительные диоды (германиевые и кремниевые), кремниевые стабилитроны с разными напряжениями стабилизации, полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом и с изолированным затвором, с каналами n - и p - типа, биполярные транзисторы (германиевые и кремниевые) n - p - n - и p - n - p -типа. Оценка технологического разброса осуществляется путем одновременного измерения (или расчета по математической модели) ВАХ и параметров группы однотипных полупроводниковых приборов. Распараллеливание однотипных приборов позволяет проводить их раздельное исследование в соответствии с индивидуальным вариантом.

Учебное пособие состоит из 6 глав.

В главе 1 описываются общие подходы к построению систем АЛП УД, реализуемых на основе технологий NI , излагаются необходимые для понимания пользователя особенности реализуемых системой АЛП УД дистанционных технологий измерения, которые по своей информативности и исследовательским возможностям превосходят традиционные. В главе также приводится краткое описание всех составных частей системы АЛП УД «Электроника».

Важным условием эффективности лабораторных исследований является знание и понимание используемых методов и технических средств измерения. Лабораторные исследования полупроводниковых приборов основываются на измерении их ВАХ и параметров, поэтому глава 2 учебного пособия посвящена описанию методов и средств их измерения. Знание методов измерения наряду с другими вопросами учитывается при защите лабораторных работ.

В главе 3 дается описание АПК УД «Электроника» – его конфигурации, инструментального обеспечения, исследуемого автоматизированного лабораторного макета, состава клиентского программного обеспечения и виртуальных лабораторных стендов, с помощью которых пользователь проводит лабораторные исследования.

Глава 4 посвящена вопросам исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ, выполняемого на основе их математических моделей.

Глава 5 содержит методическое обеспечение конкретных лабораторных работ по исследованию полупроводниковых приборов, предусмотренных лабораторным практикумом. Методическое обеспечение включает краткие теоретические сведения по работе, задание для подготовки к работе, лабораторные задания и методику выполнения их средствами системы АЛП УД, задания для обработки результатов измерения, содержание отчета, а так же контрольные вопросы.

Приводимые в учебном пособии лабораторные задания и методические указания по их выполнению составлены, исходя из максимальной реализации исследо-

вательских возможностей, предоставляемых АПК УД «Электроника». Они отвечают определенному Государственным образовательным стандартом уровню подготовки инженеров и бакалавров в области электронной техники, радиотехники и связи. Лабораторные задания и указания могут быть легко адаптированы также к другой дисциплине, форме обучения, специальности или направлению подготовки с учетом необходимой для них глубины и объема лабораторных исследований.

В главе 6 приводится описание основных характеристик сетевой лаборатории, рассматриваются методические аспекты по организации сетевого доступа через ресурсы сетевой лаборатории к АПК УД «Электроника», а также выполнению на ее основе лабораторных работ.

Учебное пособие рекомендуется студентам и учащимся технических вузов, колледжей, профессиональных училищ и лицеев для использования в лабораторном практикуме дисциплины «Электроника» и других родственных дисциплин, выполняемом в рамках сетевой лаборатории с помощью АПК УД «Электроника».

Учебное пособие комплектуется *DVD*, на котором приведено:

- интерактивное электронное техническое руководство (подробная информация об АПК УД «Электроника» [22]): описание структурной схемы; описание функциональных возможностей АПК; комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей АПК; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК; 3D-модель конструкции АПК в целом с реализацией функции ее декомпозиции и др.); описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов;
- демонстрационная версия системы схемотехнического моделирования *OrCAD 9.1* в комплекте с примерами файлов-проектов, содержащих исходные данные для выполнения исследований полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ;
- демонстрационная версия системы электронного тестирования *UniTest 3.0* в комплекте с двумя банками тестовых заданий для лабораторных работ по исследованию выпрямительного диода и биполярного транзистора.

Авторы выражают благодарность всем специалистам, которые участвовали в создании и технической поддержке системы АЛП УД «Электроника» на основе сетевой лаборатории: О. А. Тронину, В. А. Моисеенко, В. И. Сердюку, А. Г. Суковатому, И. Н. Сушкину, Б. М. Бидусу, А. Н. Шниперову, А. В. Казанцеву, В. И. Коваленку, Д. В. Худоногову, Ф. В. Зандеру, К. Н. Захарьину, С. И. Трегубову, А. А. Трухину, Ю. А. Капустину-Богданову. Авторы также признательны руководителю образовательных программ Российского представительства *National Instruments* П. Р. Сепояну за организационно-техническую поддержку регионального инновационного центра «Центр технологий *National Instruments*» при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом на базе технологий *National Instruments*



1.1. Обобщенная схема построения АЛП УД

Под АЛП понимаются лабораторные исследования, выполняемые с помощью компьютерных средств автоматизации, измерения и моделирования. Комплекс технических, программных и методических средств, обеспечивающих автоматизированное проведение лабораторных работ на физических объектах (лабораторных макетах, стендах, установках) и (или) математических моделях, образует в соответствии с ОСТ 9.2–98 систему АЛП. Исследование свойств территориально удаленных от обучаемого объектов осуществляется с помощью систем АЛП УД, которые относятся к распределенным многопользовательским компьютерным системам.

Одна из возможных конфигураций многопользовательской (клиент-серверной) системы АЛП УД приведена на рис. 1.1. Она содержит персональные компьюте-

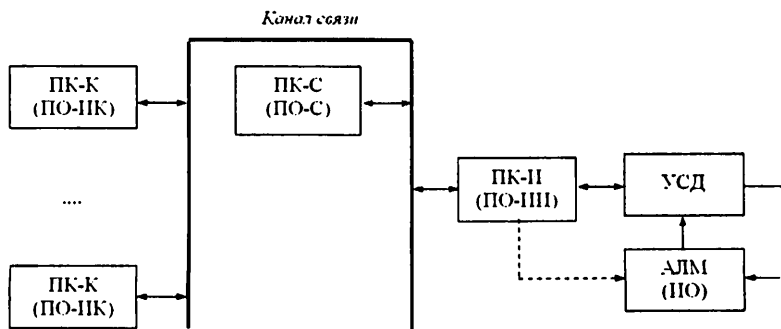


Рис. 1.1. Вариант базовой конфигурации
аппаратно-программных средств системы АЛП УД

ры, подключенные к общей информационно-вычислительной сети: измерительный персональный компьютер, размещенный на стороне исследуемого объекта (ПК-И), персональные компьютеры удаленных пользователей/клиентов (ПК-К) и персональный компьютер-сервер (ПК-С), управляющий установлением связи и обменом данными между измерительным и клиентскими персональными компьютерами.

С измерительным ПК сопрягается устройство сбора данных (УСД), связывающее его с АЛМ, включающим в себя ИО. Устройство сбора данных выполняет функции ввода-вывода измерительных аналоговых и цифровых управляющих сигналов, которые передаются на исследуемый объект и с исследуемого объекта.

В упрощенном варианте конфигурации системы АЛП УД на ПК-сервер могут быть возложены как функции установления связи и управления обменом данными, так и функции измерительного ПК (ПК-СИ, рис. 1.2).

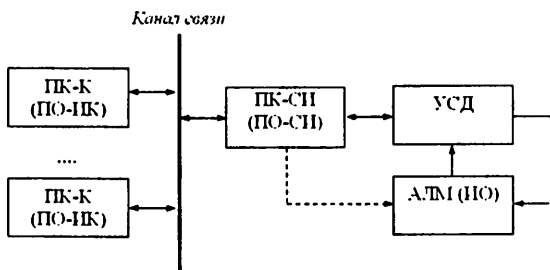


Рис. 1.2. Упрощенная базовая конфигурация аппаратно-программных средств системы АЛП УД

Техническое обеспечение системы АЛП УД содержит ее аппаратное и программное обеспечение. Аппаратное обеспечение включает в свой состав персональные компьютеры, устройства сбора данных и автоматизированные лабораторные макеты в виде экспериментальных стендов, установок и т. п.

АЛМ, кроме исследуемого объекта (или объектов), содержат элементы сопряжения, устройства управления и коммутации. Через элементы сопряжения с УСД на исследуемый объект выводятся тестовые воздействия и управляющие сигналы и передаются на УСД сигналы-отклики исследуемого объекта. С помощью элементов управления и коммутации обеспечивается автоматизированное управление лабораторным макетом.

ПО системы АЛП УД разделяется на сетевое, коммуникационное, измерительное, вспомогательное.

Сетевое ПО устанавливается на ПК-сервере (ПО-С) и управляет установлением связи и обменом данными в системе АЛП УД.

Измерительное ПО системы распределяется между измерительным ПК (ПО-ИИ) или измерительным ПК-сервером (ПО-СИ) и ПК клиента (ПО-ИК) – клиентское измерительное ПО. Измерительное ПО, устанавливаемое на измерительном ПК (или на сервере), непосредственно управляет процессом измерений и

формированием массивов (пакетов) результатов измерений, передаваемых клиенту. Измерительное ПО клиента содержит, как правило, программы лицевых панелей виртуальных измерительных приборов и/или лабораторных стендов, путем настройки которых формируется траектория измерения и соответствующий ей пакет заданий, передаваемых на измерительный ПК. Кроме этого, измерительное ПО клиента обеспечивает прием и обработку результатов измерений с измерительного ПК, их цифровое и графическое отображение, проведение курсорных измерений, сохранение результатов измерений, формирование отчета и другие функции.

Вспомогательное ПО систем АЛП УД предназначено для моделирования функций лабораторного макета на основе его математической модели, а также функций, выходящих за пределы технических возможностей макета. Кроме того, в состав вспомогательного ПО могут входить система электронного тестирования, ИЭТР, дающие визуальное представление обучаемому об исследуемом объекте на основе 2D- и 3D-моделей (в том числе их декомпозиции), электронной технической документации, а также различных мультимедийных приложений.

1.2. Компьютерные измерительные технологии ***National Instruments***

Системы автоматизированного лабораторного практикума с удаленным доступом для экспериментального исследования физических объектов основываются на концепции компьютерных измерений, реализуемой с помощью компьютерных измерительных технологий. Компьютерные измерения и приборы отличаются от традиционных использованием персонального компьютера как элемента измерительной цепи на всех этапах сбора, обработки, отображения и сохранения измерительной информации. Их преимущества заключаются в многофункциональности, определяемой измерительным ПО, и минимально необходимом и унифицированном аппаратном обеспечении. С помощью средств аппаратного обеспечения осуществляется сбор данных с исследуемого объекта и ввод-вывод данных в ПК, поэтому их называют устройствами сбора данных. Аппаратными средствами сбора данных в значительной степени определяются технические характеристики компьютерных измерительных приборов и систем. АПК, включающий ПК и УСД, совместно с ПО образует АССОД. Общая структура аппаратного обеспечения измерительного комплекса на базе ПК с одним подключенным к нему объектом исследования приведена на рис. 1.3.

Устройство сбора данных в системе минимальной конфигурации включает синхронизируемые каналы аналогового и цифрового ввода-вывода сигналов (AI, AO, DIO), которые с помощью встроенных или внешних измерительных датчиков, исполнительных устройств и интерфейсных средств сопрягаются с одним или с группой исследуемых объектов и ПК. Устройства сбора данных могут различаться числом и структурой каналов, конструкцией и количеством образующих их модулей, используемым цифровым интерфейсом и технически-

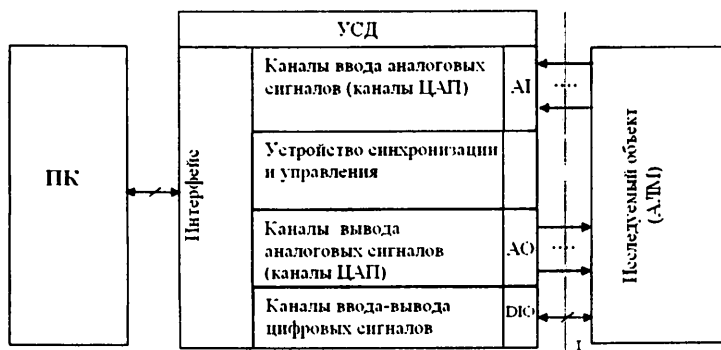


Рис. 1.3. Структура аппаратного обеспечения компьютерных измерительных систем

ми характеристиками. Ввод и вывод аналоговых сигналов в УСД основывается на их АЦП и ЦАП.

Каналы ввода аналоговых сигналов могут содержать как собственные АЦП, так и один общий для всех каналов мультиплексируемый АЦП. АЦП осуществляют выборку входного сигнала в дискретные равноотстоящие моменты времени с частотой дискретизации $f_{\text{д}}$ и преобразование их в последовательности цифровых кодов, вводимых в ПК. По цифровым кодам АЦП с помощью измерительной программы вычисляются соответствующие им значения напряжения или тока.

Каналы вывода аналоговых сигналов содержат ЦАП, которые преобразуют поступающие на них с ПК с частотой дискретизации вывода $f_{\text{дс}}$ последовательности цифровых кодов в аналоговые тестовые сигналы.

По каналам цифрового ввода-вывода УСД с ПК выводятся сигналы управления исследуемым объектом (автоматизированным лабораторным макетом).

Создание измерительных систем на базе ПК (измерительных приборов, измерительных комплексов, автоматизированных систем сбора и обработки данных) связано с решением широкого круга задач, включающих разработку:

- конфигурации (архитектуры) системы;
- аппаратного обеспечения – устройства сбора данных и его программного обеспечения (драйверов);
- алгоритмов измерения, соответствующих реализуемым измерительным функциям, и их отладку (моделирование);
- измерительного программного обеспечения;
- виртуальных лицевых панелей управления и отображения;
- сопряжения аппаратного и программного обеспечения;
- сетевого программного обеспечения при создании систем с удаленным доступом.

С учетом сложности и трудоемкости этих задач корпорацией NI (США) были разработаны технологии их комплексного и эффективного решения, получившие название компьютерных измерительных технологий NI. Технологии NI охватыва-

ют вопросы разработки аппаратного, алгоритмического и программного обеспечения измерительных систем на базе ПК, а также автоматизации их проектирования [<http://www.ni.com/>].

Технологией *NI* унифицированы и стандартизированы архитектуры измерительных систем на базе ПК. Это системы, использующие модульные УСД, одноплатные УСД, одноплатные модульные приборы и автономные *PXI*-системы.

К системам, использующим модульные УСД, относятся *VXI*-системы, реализуемые в стандартном крейте со встроенным контроллером крейта, и модульные *SCC*-, *SCXI*- и *USB*- (*CompactDAQ*) системы. Они состоят из внешнего блока модулей нормализации сигналов и сопряжения с объектом и одноплатного модуля аналогового и цифрового ввода-вывода, который встраивается в ПК или подключается к ПК через внешний *USB*-порт.

Одноплатные системы строятся на основе плат аналогового ввода, аналогового вывода, цифрового ввода-вывода, многофункциональных плат сбора данных или специализированных одноплатных модульных приборов – генераторов сигналов, осциллографов, мультиметров и др., – которые устанавливаются на внутреннюю шину *PCI* или *PCI-express* либо подключаются извне через последовательный *USB*-порт.

Высокопроизводительные *PXI*-системы строятся на базе собственного промышленного компьютера и обеспечивают высокочастотные измерения и обработку данных в реальном времени. Такие системы являются достаточно дорогостоящими.

Корпорацией *NI* создан (и постоянно обновляется) широкий спектр высокоточных технических средств сбора данных для систем различной конфигурации, удовлетворяющих большинству реальных приложений и исключающих необходимость проведения собственной разработки или использования средств разных производителей, не отвечающих в ряде случаев технологиям *NI*.

Вид некоторых устройств и модулей *NI* показан на рис. 1.4.

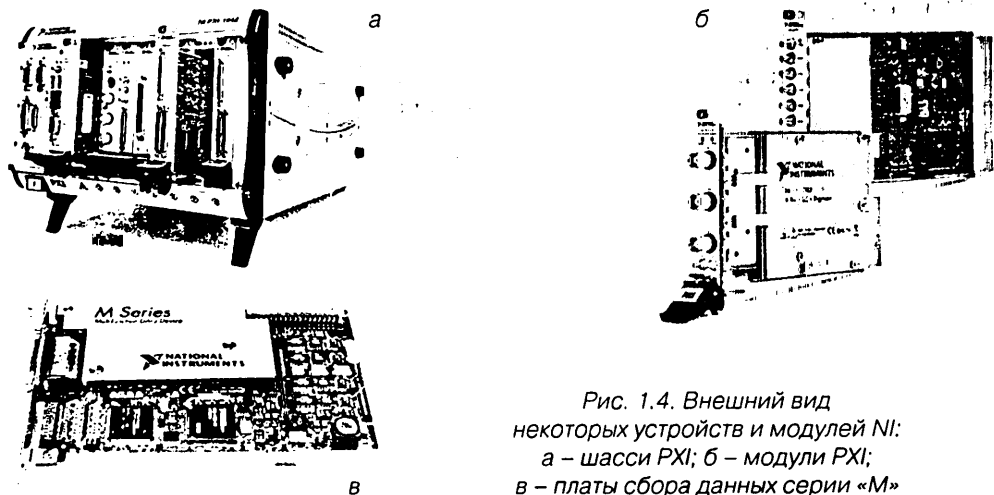


Рис. 1.4. Внешний вид некоторых устройств и модулей *NI*:
а – шасси *PXI*; б – модули *PXI*;
в – платы сбора данных серии «М»

По техническим и экономическим показателям системам АЛП УД отвечают *одноплатные многофункциональные устройства* (платы) сбора данных. Примерами их являются *PCI-платы* сбора данных серии «М» и *USB-устройства*, технические характеристики которых приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Технические характеристики *PCI-лат* сбора данных серии «М» и *USB-устройств*

Тип платы сбора данных NI	Число каналов			Диапазон аналогового ввода-вывода, В	Разрядность, бит		Макс. скорость, выборка/с	
	аналогового ввода	аналогового вывода	цифровых ввода-вывода		АЦП	ЦАП	аналогового ввода	аналогового вывода
PCI-6221M	16/8	2	24	± 10	16	16	250 тыс.	833 тыс.
PCI-6289M	32/16	4	48	± 10	18	16	625 тыс.	2,8 млн
PCI-6251M	16/8	2	24	± 10	16	16	1,25 млн	2,8 млн
USB-6211	16/8	2	4	± 10	16	16	250 тыс.	250 тыс.
USB-6009	8/4	2	12	± 20	14	12	48 тыс.	150 тыс.
USB-6221	16/8	2	24	± 10	16	16	250 тыс.	833 тыс.
USB-6259	32/16	4	48	± 10	16	16	1,25 млн	2,8 млн

Развернутая обобщенная структура многофункциональной платы сбора данных приведена на рис. 1.5.

Каналы аналогового ввода платы *AI0–AI15* включают АМП на 16 входов, ПУ, УВХ, АЦП и БЗУ типа *FIFO* (БЗУ1). Два канала вывода аналоговых сигналов *AO0, AO1* содержат общее для обоих каналов БЗУ2 и идентичные в обоих каналах регистры данных (РД1, РД2), цифроаналоговые преобразователи (ЦАП1, ЦАП2), программируемые аттенюаторы (ПА1, ПА2) и фильтры нижних частот (ФНЧ1, ФНЧ2). К устройству управления и синхронизации на функциональной схеме относятся узел внешней и внутренней синхронизации ввода, устройства управления каналами ввода (УУК1) и вывода (УУК2), опорный генератор (ОГ), программируемый делитель частоты дискретизации $f_{\text{дв}}$ вводимых сигналов (ПДЧ1) и программируемый делитель частоты дискретизации $f_{\text{дс}}$ выводимых сигналов (ПДЧ2). На схеме показаны также программируемый таймер (Т), 8-битовый канал ввода-вывода цифровых сигналов *DIO0–DIO7* и устройство сопряжения с шиной *PCI* (интерфейс *PCI*).

Ввод аналоговых сигналов в ПК осуществляется путем преобразования их из аналоговой формы в цифровую с помощью общего для всех каналов ввода 16-разрядного АЦП, а формирование выводимых аналоговых сигналов – путем преобразования в аналоговую форму цифровых сигналов ПК с помощью двух 16-разрядных ЦАП каналов вывода. С помощью ПА осуществляется управление амплитудой выводимых сигналов, а с помощью ПУ обеспечивается необходимое усиление вводимых аналоговых сигналов. По линиям цифрового вывода из ПК выводятся коды управления исследуемым объектом.

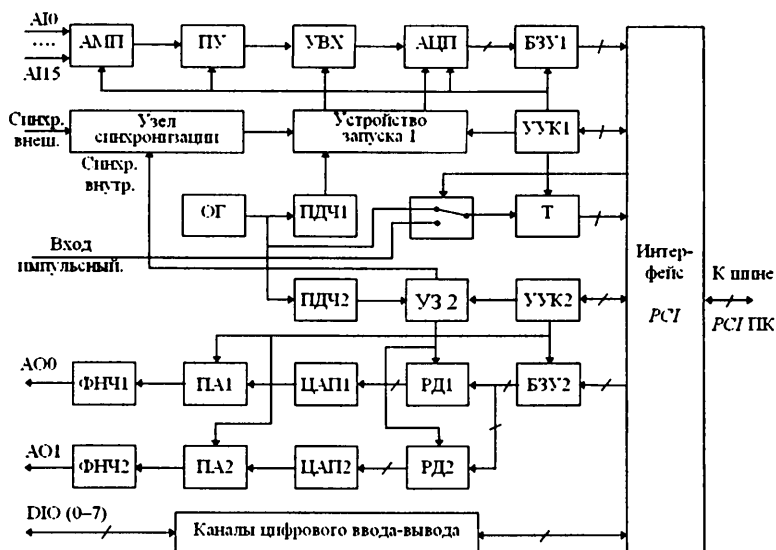


Рис. 1.5. Развернутая обобщенная структура многофункциональной платы сбора данных

Принципиальным отличием и преимуществом технологии NI является наличие созданной корпорацией среды графического программирования виртуальных инструментов *LabVIEW*, обеспечивающей автоматизацию проектирования измерительных систем на базе ПК. Система *LabVIEW* отвечает принципу «программирование без программирования» и доступна для освоения и самостоятельного применения разработчиками измерительных систем. Программирование в *LabVIEW* осуществляется на уровне блок-диаграмм и виртуальных лицевых панелей приборов. Любая программа в *LabVIEW* называется виртуальным инструментом, или виртуальным прибором. С помощью библиотеки драйверов устройств сбора данных, совместимых с *LabVIEW*, осуществляется их автоматическое сопряжение с измерительным ПО. Среда *LabVIEW* является также мощным программным средством моделирования алгоритмов измерения и их отладки. Она включает обширную библиотеку стандартных функций и модулей, реализующих базовые алгоритмы цифровой обработки сигналов и измерения параметров сигналов и характеристик объектов, а также готовые средства для проведения стандартных измерений, не требующие программирования (среда *NI Signal Express*). Система *LabVIEW* генерирует коды программ, не уступающие по скорости обработки кодам, получаемым на основе алгоритмических языков высокого уровня. Применение системы *LabVIEW* существенно снижает трудоемкость и сокращает сроки разработки измерительных систем, чем и мотивировалось ее создание. Она содержит также программные средства разработки измерительных систем с удаленным доступом с использованием стандартных протоколов обмена данными в сетях *Интернет/Intranet*.

Корпорация *NI* оказывает поддержку реализации образовательных программ различного уровня в виде существенных скидок на приобретение учебными заведениями лицензионных программных средств *LabVIEW*, а также предоставления им недорогих инструментальных модулей и специализированных учебных лабораторий и комплексов [http://digital.ni.com/worldwide/russiansf/sb/Education+Item?OpenDocument?node=200129_ru]. Это аппаратно-программные средства для изучения машинного зрения, виброакустического анализа, исследования электрических и электронных цепей (лабораторный комплекс *NI ELVIS*), измерительных технологий, систем цифровой связи, устройств приема и анализа радиосигналов, цифровых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, программирования ПЛИС и др.

К измерительным задачам ряда систем АЛП УД относятся генерация тестовых воздействий на исследуемый объект и измерения действующих на нем напряжений и токов путем считывания их мгновенных значений, оцифровывания, ввода в ПК и оценки считанных значений с помощью программной обработки. При программировании этих задач можно использовать стандартные функции *LabVIEW* генерации тестовых сигналов и ввода цифровых кодов с УСД. Вид блок-диаграммы генерации линейно нарастающего сигнала показан на рис. 1.6а, а на рис. 1.6б – соответствующая ей лицевая панель генератора.

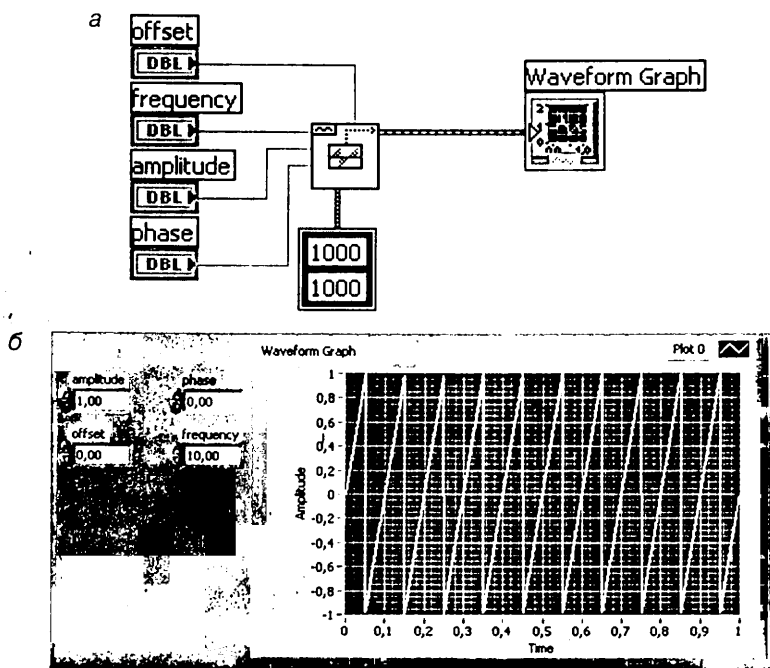


Рис. 1.6. Программа *LabVIEW*: блок-диаграмма (а) и лицевая панель (б) генератора линейно нарастающего сигнала

Важное место при разработке измерительных систем занимают задачи *отображения измерительной информации*. Система *LabVIEW* предоставляет мощные и легко реализуемые средства графического отображения результатов измерения и их статистической обработки, в частности ВАХ полупроводниковых приборов и осциллограмм сигналов.

Представление о графических возможностях системы *LabVIEW* дают разработанные с ее помощью лицевые панели виртуальных лабораторных стендов по исследованию полупроводниковых приборов и отображаемые на них результаты измерений и обработки (глава 3).

1.3. Обобщенная схема построения систем АЛП УД с применением технологий *National Instruments*

В Сибирском федеральном университете на базе Регионального инновационного центра «Центр технологий *National Instruments*» была разработана обобщенная схема построения систем АЛП УД на основе технологий *NI* (рис. 1.7).

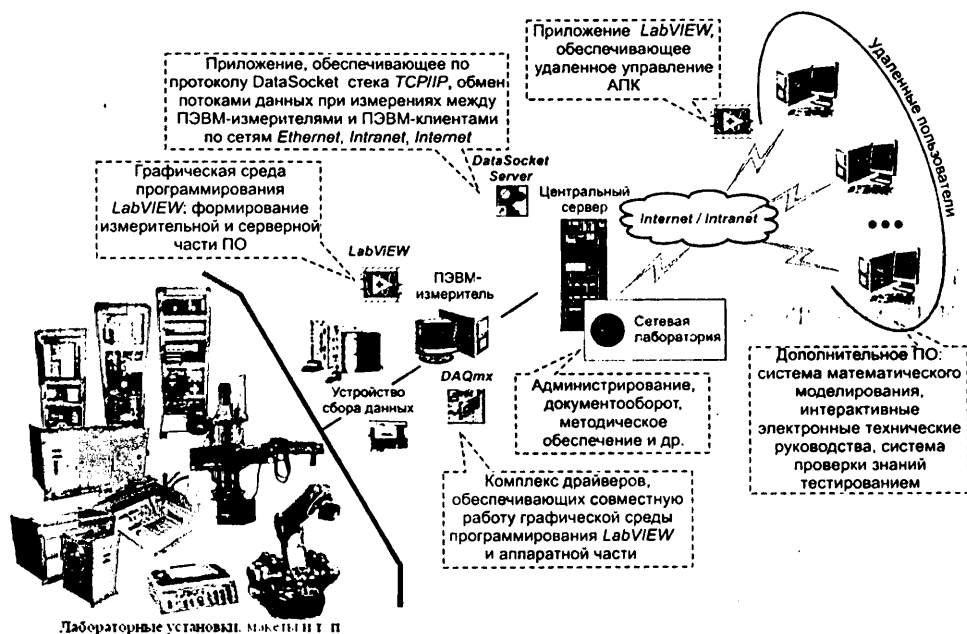


Рис. 1.7. Обобщенная унифицированная схема построения систем АЛП УД на основе технологий *NI*

Согласно этой схеме на ПЭВМ-измерителе системы находится серверное измерительное ПО, реализуемое в среде графического программирования *LabVIEW*. Под управлением его происходит ввод-вывод измерительных аналоговых и цифровых управляющих сигналов на автоматизированный лабораторный макет через устройство сбора данных. Взаимодействие программной и аппаратной частей системы осуществляется при помощи комплекса драйверов *DAQmx*.

В качестве аппаратной части в системе АЛП УД могут выступать встраиваемые в персональный компьютер многофункциональные платы сбора данных, платы аналогового и цифрового ввода-вывода, платы осциллографов и генераторов, модульные устройства согласования, готовые программно-аппаратные измерительные комплексы, например *NI ELVIS*.

Удаленное управление АПК в системе АЛП УД реализуется на основе технологии сетевого обмена *DataSocket*. С этой целью на центральном сервере устанавливается приложение *Data Socket server*, которое обеспечивает по протоколу *DataSocket* стека *TCP/IP* обмен потоками данных при измерениях между ПЭВМ-измерителями и ПЭВМ-клиентами по сетям *Ethernet*, *Intranet*, *Internet*.

DataSocket – технология NI, основанная на промышленном стандарте *TCP/IP*, которая упрощает передачу данных между ПЭВМ и приложениями, совершенствует средства автоматизации физических измерений [6].

Технология *DataSocket* позволяет размещать и считывать данные следующих типов:

- текст, воспроизводимый строковым элементом индикации;
- табличный текст, рассматриваемый как массив;
- звук (файлы с расширением *wav*);
- переменные типа *variant*.

DataSocket состоит из двух компонентов: *DataSocket API* и *DataSocket*-сервера (рис. 1.8). *DataSocket API* представляет собой программный интерфейс приложения, который взаимодействует с различными типами данных. *DataSocket API* автоматически преобразует данные измерений в пересылаемый по сети поток байтов. Считывающее приложение *DataSocket* автоматически преобразует поток байтов обратно в исходную форму. Подобное автоматическое преобразование устраняет сложность работы с сетью, которое предполагает написание значительного объема кода при использовании библиотек *TCP/IP*.

За счет реализации специализированного алгоритма работы серверного ПО обеспечивается многопользовательский режим работы АПК в системе АЛП УД.

Измерительное ПО, устанавливаемое на ПЭВМ клиента, также реализовано в среде графического программирования *LabVIEW*. Посредством сетевого взаимодействия по протоколу *dstp* оно обеспечивает удаленное управление лабораторным макетом, которое производится через визуальный интерфейс, реализованный в виде комплекса виртуальных измерительных приборов и/или виртуальных стендов.

Дистанционное управление и контроль

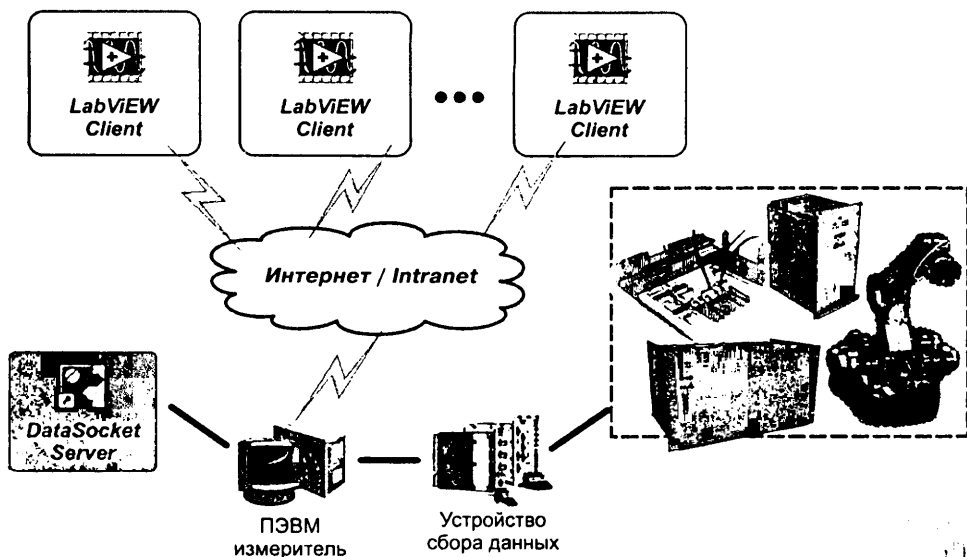


Рис. 1.8. Организация сетевого обмена в АПК с использованием технологии DataSocket

Технические средства, объединяющие АЛМ и подсистему, обеспечивающую автоматизированное дистанционное управление макетом и экспериментальные исследования его свойств, образуют АПК УД системы АЛП УД.

1.4. Система АЛП УД «Электроника»

В состав системы АЛП УД «Электроника», реализованной в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.7, входят:

- АПК УД «Электроника»;
- комплекс математических моделей;
- интерактивное электронное техническое руководство;
- методическое обеспечение;
- электронная тестовая система с банком тестовых заданий.

1.4.1. Функциональные характеристики АПК УД «Электроника»

Общий вид разработанного региональным инновационным центром «Центр технологий *National Instruments*» при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» [<http://sfu-kras.ru/studies/sdo/ni>] АПК УД «Электроника» приведен на рис. 1.9.

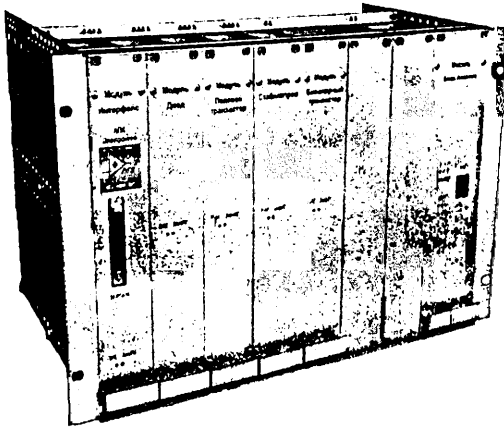


Рис. 1.9. Общий вид конструкции лабораторного макета АПК УД «Электроника»

В АПК УД «Электроника» в качестве лабораторного макета выступает набор объектных модулей (ОМ): «Диод», «Стабилитрон», «Биполярный транзистор», «Полевой транзистор». При этом для расширения исследовательских возможностей ОМ в их состав включены: два комплекта по четыре однотипных кремневых и германиевых диода (в ОМ «Диод»); две группы по четыре однотипных стабилитрона (в ОМ «Стабилитрон»); четыре однотипных транзистора $n-p-n$ -типа и четыре однотипных транзистора $p-n-p$ -типа (в ОМ «Биполярный транзистор»); четыре однотипных полевых транзистора с изолированным затвором и каналом n -типа и четыре однотипных транзистора с $p-n$ -переходом и каналом p -типа (в ОМ «Полевой транзистор»).

Подробно структура лабораторного макета и функциональные схемы ОМ рассматриваются в параграфе 3.2.

АПК УД «Электроника» обладает следующими функциональными возможностями.

При исследовании выпрямительных диодов измеряются прямая и обратная ветви ВАХ, статические и дифференциальные сопротивления и их зависимости от тока диода, параметры технологического разброса по току, напряжению и сопротивлению. Исследование работы диода на переменном токе осуществляется в простейшей схеме однополупериодного выпрямителя с изменяемой активной и активно-емкостной нагрузкой при различных значениях частоты сигнала и положения исходной рабочей точки. При этом рабочая точка выставляется пользователем визуально на ВАХ диода, измеряемой с помощью измерителя ВАХ, на которой отображается также и область изменения мгновенных значений тока и напряжения диода в динамическом режиме работы. Изменения токов и напряжений диода и нагрузки во времени индицируются на экране трехканального запоминающего осциллографа.

При исследовании стабилитронов измеряются прямая и обратная ветви ВАХ, нагрузочные характеристики и характеристики стабилизации, статические и дифференциальные сопротивления, параметры технологического разброса по

току, напряжению и сопротивлению. Исследование работы стабилитрона на переменном токе осуществляется в схеме параметрического стабилизатора напряжения, на вход которого подается переменная ЭДС с изменяемой частотой и амплитудой и ЭДС смещения, которое совместно со значением сопротивления нагрузки определяет положение исходной рабочей точки на ВАХ стабилитрона. Исходное и мгновенное положения рабочей точки при этом отображаются на измеренной ВАХ стабилитрона. Изменения во времени токов и напряжений в схеме стабилизатора представляются в виде осциллограмм на экране трехканального запоминающего осциллографа.

Исследование полевых транзисторов включает измерение семейства статических передаточных и выходных ВАХ, динамических ВАХ, статических ВАХ группы однотипных полевых транзисторов для оценки их технологического разброса. Работа полевого транзистора на переменном токе исследуется в схеме простейшего усилительного каскада при гармоническом входном воздействии различной частоты и амплитуды и различных положениях исходной рабочей точки, задаваемых пользователем на измеренных динамических ВАХ полевого транзистора. На динамических ВАХ отображаются и мгновенные значения его токов и напряжений, обусловленные сигналом. Их изменения во времени представляются в виде осциллограмм на экране четырехканального запоминающего осциллографа. При исследовании полевого транзистора на переменном токе предусмотрен режим анимации с виртуально изменяемой нагрузкой по постоянному и переменному току.

При исследовании биполярного транзистора измеряются семейства статических входных и выходных ВАХ и динамические входная и выходная ВАХ в схемах с общим эмиттером и общей базой, статические ВАХ группы однотипных биполярных транзисторов для оценки их технологического разброса. Исследование работы биполярного транзистора осуществляется в схеме усилительного каскада с общим эмиттером при гармоническом входном воздействии различной частоты и амплитуды и различных положениях исходной рабочей точки, задаваемых пользователем на измеренных динамических ВАХ биполярного транзистора. На динамических ВАХ отображаются и мгновенные значения его токов и напряжений, обусловленные входным сигналом. Их зависимости от времени выводятся на экран четырехканального запоминающего осциллографа. При исследовании биполярного транзистора на переменном токе предусмотрен режим анимации с виртуально изменяемой нагрузкой по постоянному и переменному токам.

По измеренным ВАХ полупроводниковых приборов осуществляются курсорные измерения значений токов и напряжений и параметров полупроводникового прибора в заданной точке ВАХ. Для диодов и стабилитронов – это статические и дифференциальные сопротивления, для полевых транзисторов – значения крутизны и выходной проводимости, для биполярных транзисторов – значения h -параметров и статического коэффициента усиления по току. По этим же параметрам с помощью курсорных измерений оценивается и технологический разброс. Результаты курсорных измерений выводятся на цифровые индикаторы с памятью.

Курсорные измерения осуществляются также и по осциллограммам токов и напряжений при исследовании полупроводниковых приборов на переменном токе.

Измерение ВАХ полупроводниковых приборов может быть проведено как в автоматическом режиме по исходным данным пользователя, так и в ручном режиме, то есть по точкам.

Графики ВАХ, осциллограмм сигналов и данные цифровых индикаторов курсорных и ручных измерений сохраняются для отчета в формате документа *MS Word*.

При проведении измерений осуществляется автоматическая проверка допустимости вводимых пользователем исходных данных на измерения.

Технические возможности системы по измерению ВАХ полупроводниковых приборов определяются пределами задаваемых и измеряемых напряжений, составляющими ± 10 В и 50 мА. Погрешности измерения не превышают 2 мВ по напряжению и 0,1 мкА по току (среднеквадратические значения). Минимальные дискреты вывода измеренных ВАХ по напряжениям сток–исток, затвор–исток, коллектор–эмиттер, коллектор–база составляют 0,5 В, по току базы – 10 мкА, по

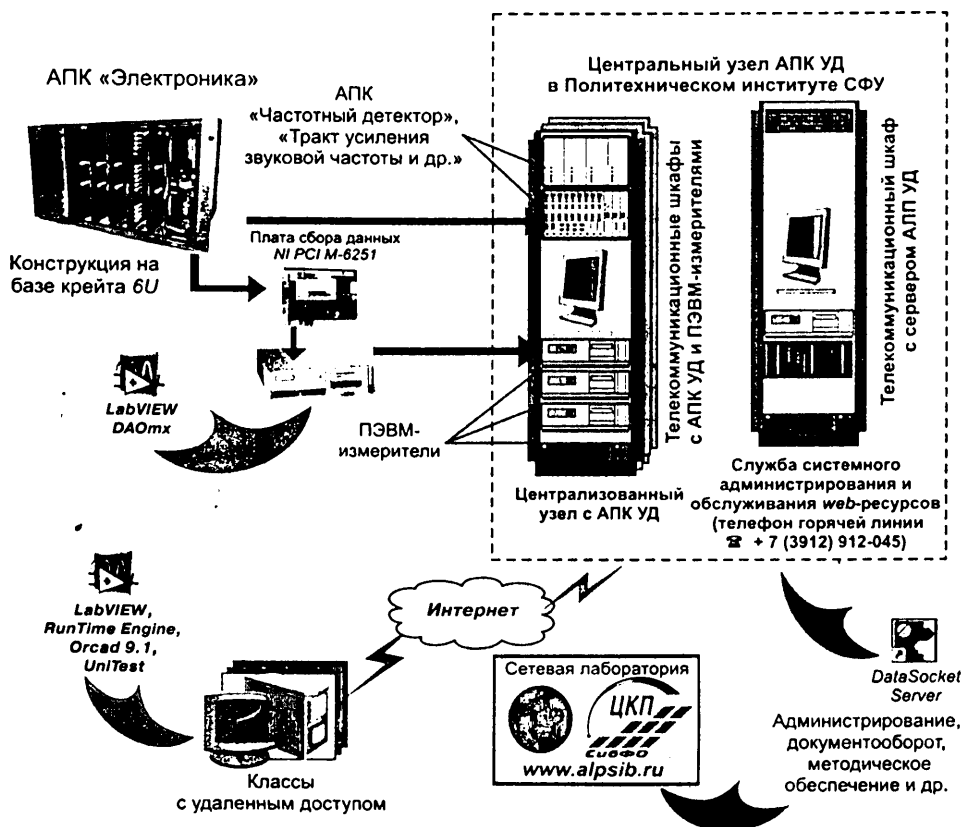


Рис. 1.10. Схема организации лабораторного практикума на базе АЛП УД «Электроника»

току эмиттера 1 мА. Максимальное время измерения ВАХ в автоматическом режиме не более 1 с.

Для исследования характеристик полупроводниковых приборов, входящих в состав ОМ, используется комплекс виртуальных стендов, разработанных в графической среде *LabVIEW*. Подробное описание виртуальных стендов приведено в параграфе 3.4.

Организация лабораторного практикума на базе АПК УД «Электроника» осуществляется в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.10. Как видно из приведенной схемы, АПК УД «Электроника» в комплексе с другими АПК входит в состав центрального узла АПК УД и доступен обучаемым по сети *Интернет* через сетевую лабораторию, которая обеспечивает авторизованный доступ к методическому обеспечению, к АПК, а также обеспечивает процесс администрирования образовательного процесса, организуемого на базе интернет-технологий.

1.4.2. Исследования, выполняемые с помощью моделирования на ПЭВМ

Лабораторный практикум по экспериментальному исследованию полупроводниковых приборов средствами АПК УД «Электроника» дополняется **моделированием** их работы на ПЭВМ. Математическое моделирование позволяет проводить исследования, не требующие сложного и дорогостоящего оборудования. В свою очередь, экспериментальные исследования позволяют оценить адекватность и точность используемых математических моделей и их параметров для различных полупроводниковых приборов.

Исследовательские возможности моделирования на ПЭВМ определяются программными средствами, с помощью которых оно осуществляется, а также математическими моделями электронных компонент, которые они используют. В настоящее время существует достаточно много специальных программ или систем автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств (САПР РЭС), эффективно решающих задачи моделирования полупроводниковых приборов. К ним относятся системы *MicroCAP*, *Electronic Workbench*, *OrCAD*, *PCAD*, *Protel*, *DesingLab* и др. [9]. Основой или ядром этих САПР является подсистема моделирования *PSpice*. В системе АПК УД «Электроника» используется демонстрационная версия системы сквозного автоматизированного проектирования электронных средств *OrCAD 9.1* (рис. 1.11).

Программные средства моделирования позволяют на основе математических моделей полупроводниковых приборов, применяемых в объектных модулях АПК УД «Электроника» выполнить исследования электрических характеристик полупроводниковых приборов, включающие:

- расчет среднестатистических ВАХ и параметров полупроводниковых приборов, оценку соответствия результатов моделирования и измерения, повышение точности моделирования путем использования экспериментально находимых параметров математической модели;
- анализ режимов работы полупроводниковых приборов по постоянному току;

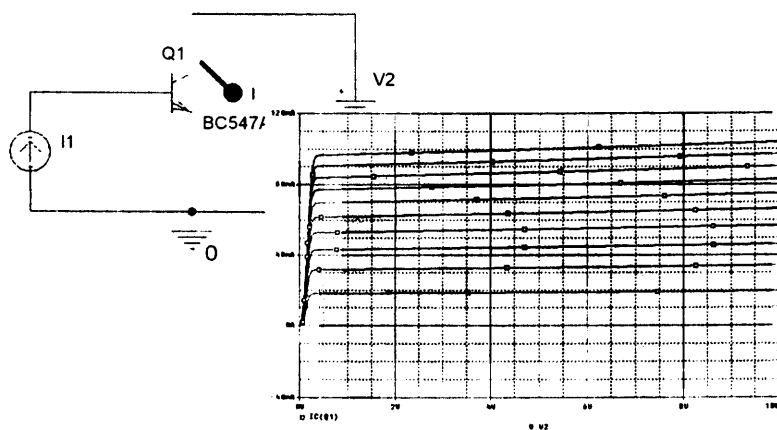


Рис. 1.11. Построение выходных ВАХ биполярного транзистора средствами системы сквозного автоматизированного проектирования электронных средств OrCAD 9.1

- анализ параметров и характеристик электронных устройств (выпрямителя, стабилизатора напряжения, усилительного каскада на биполярном и полевом транзисторах) на основе исследуемых полупроводниковых приборов во временной области;
- анализ частотных зависимостей параметров и характеристик исследуемых полупроводниковых приборов;
- статистический анализ параметров и характеристик полупроводниковых приборов по методу Монте-Карло;
- анализ температурных зависимостей параметров и характеристик полупроводниковых приборов.

Методические аспекты исследований полупроводниковых приборов при помощи математического моделирования подробно рассматриваются в главе 4 данного пособия. Математические модели компонентов, используемых в процессе исследований на ПЭВМ полупроводниковых приборов приведены в приложении 2.

1.4.3. Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство (рис. 1.12), подготовленное в системе *TG Builder* (*Technical Guide Builder* [www.tgb.cals.ru]), входящее в состав системы АЛП УД «Электроника», позволяет получить студенту подробную информацию об АПК:

- описание структурной схемы АПК;
- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК лабораторных работ;

- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК, 3D-модель конструкции АПК в целом с реализацией функций ее декомпозиции на составные элементы и др.).

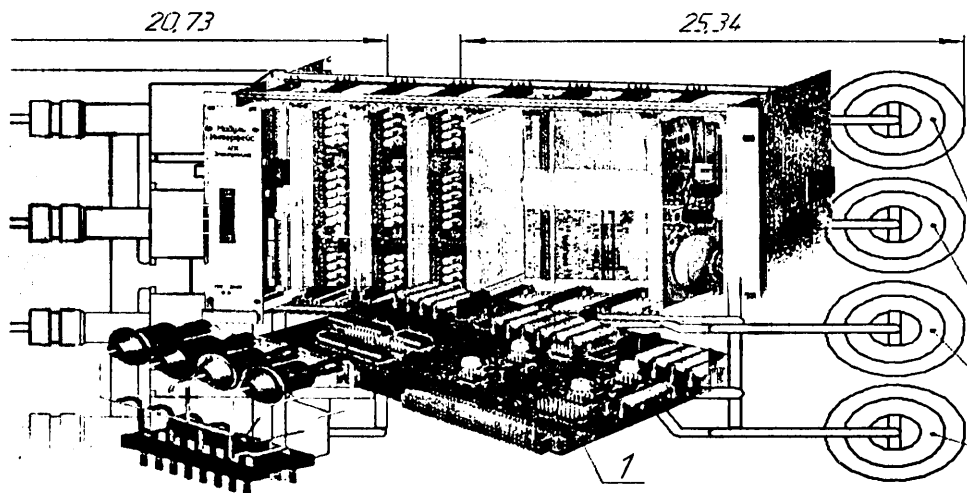


Рис. 1.12. Фрагмент ИЭТР, отражающий 3D-модель конструкции лабораторного макета АПК УД «Электроника»

ИЭТР также дает возможность обучаемому получить общее представление о структуре самого ИЭТР, как составного элемента технологии информационной поддержки жизненного цикла изделия [4].

1.4.4. Электронная система тестирования

В состав системы АЛП УД «Электроника» входит унифицированная система компьютерной проверки знаний тестированием *UniTest* [10].

Тест – это совокупность стандартизированных заданий, результаты выполнения которых позволяют измерить знания, умения и навыки испытуемого (англ. *Test* – проба, испытание, исследование). По сути дела, это инструмент, состоящий из системы тестовых заданий с описанными системами обработки и оценки результата, стандартной процедуры проведения и измерения качества и свойств личности, изменение которых возможно в процессе систематического обучения. При использовании объектно-ориентированного подхода любой объект изучения может быть описан определенной совокупностью знаний о нем. Эти знания отражают непосредственные факты, связи между объектами, законы, теории или включают методологические или оценочные знания (свойства, методы, события и состояния объектов).

Система *UniTest* – это комплексное программное решение для проведения компьютерного тестирования, функционально реализованное по САМ-технологии,

имеющей три категории пользователей: администратор, тьютор и студент. *UniTest* поддерживает несколько форм тестовых заданий, ведение виртуального учебного журнала и прочее.

Взаимодействие тьютора и студента в системе организовано по *CASE*-технологии путем формирования тьютором *CASE*-комплекта с тестовыми заданиями, а студентом – файла-отчета.

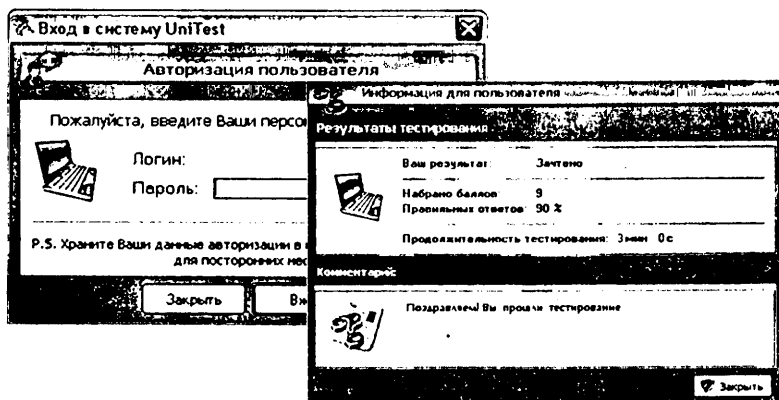


Рис. 1.13. Примеры экранных форм системы *UniTest*

Для исключения несанкционированного доступа к системе и ее составляющим предусмотрена многоуровневая информационная защита, основанная на использовании электронной подписи и элементов криптографии.

Система *UniTest* позволяет решать следующие задачи:

- формировать до семи вариантов тестовых заданий (выбор одного правильного ответа, выбор нескольких правильных ответов, соответствие множеств, последовательность, ввод текста с клавиатуры, ввод числа с клавиатуры, эссе);
- осуществлять ведение нескольких виртуальных учебных журналов;
- формировать неограниченное число сценариев тестирования;
- переносить и хранить банки тестовых заданий.

Подробная информация о функциональных возможностях системы *UniTest*, ее методическом и информационном обеспечении, перспективах развития и др. содержится в сети *Интернет* по адресу www.unitest.multilab.eltc.sfu-kras.ru.

1.4.5. Организация лабораторного практикума на базе сетевой лаборатории

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.10, взаимодействие обучаемого с АПК осуществляется через сетевую лабораторию (рис. 1.14), которая представляет собой комплекс интерфейсов, интерактивных форм и инструментов управления учебным процессом, связанных между собой на основе системы управле-

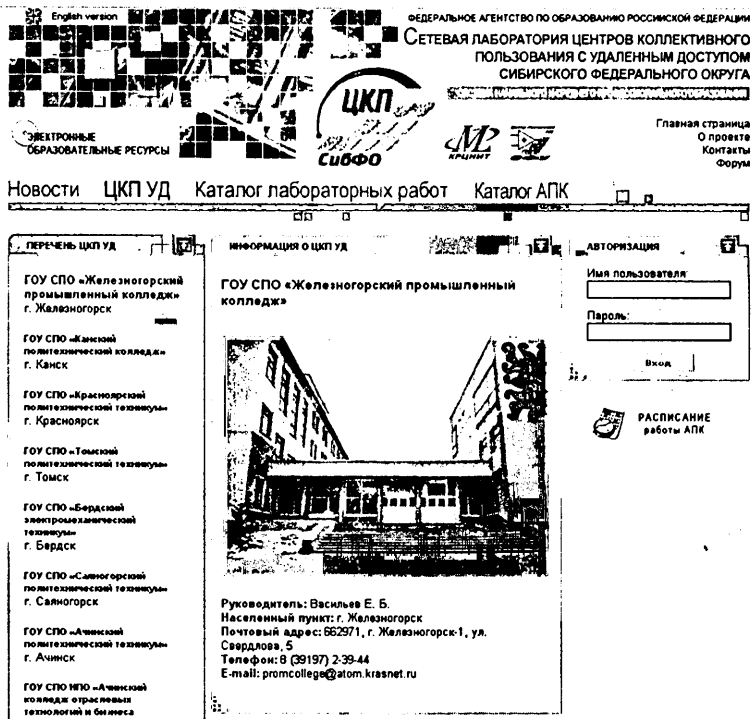


Рис. 1.14. Фрагмент раздела сетевой лаборатории, обеспечивающий доступ к каталогу зарегистрированных ЦКП с удаленным доступом

ния базами данных посредством телекоммуникаций, позволяющих получить доступ к лабораторным практикумам по сети *Internet/Intranet*.

В целом сетевая лаборатория выступает интегратором основных компонентов системы АЛП УД и обеспечивает:

- авторизованный регламентированный доступ к образовательному контенту (методические указания, представленные в виде электронного ресурса);
- доступ к актуальной информации по вопросам работы систем АЛП УД;
- непосредственное выполнение лабораторных исследований в режиме удаленного доступа на основе АПК УД (для АПК «Электроника» реализуется многопользовательский режим проведения исследований);
- выполнение лабораторных исследований посредством математического моделирования на ПЭВМ;
- выполнение процедуры тестирования студентов при помощи электронной системы тестирования UniTest;
- получение общей информации о доступных для выполнения лабораторных работах в зависимости от выбранной специальности и дисциплины;

- виртуальное общение преподавателей, студентов и административного персонала;
- организацию централизованной технической и методической поддержки преподавателей, студентов и администраторов по вопросам работы системы АЛП УД «Электроника» и других систем АЛП.

Подробно функциональные возможности сетевой лаборатории, а также методика выполнения лабораторных исследований на ее основе рассматриваются в главе 5.

Методы и средства измерения вольт-амперных характеристик и параметров полупроводниковых приборов



2.1. Измерение ВАХ полупроводниковых приборов методом вольтметра-амперметра

Под статическими ВАХ полупроводниковых приборов понимаются зависимости между токами и напряжениями включенного в электрическую цепь полупроводникового прибора. Для двухэлектродных приборов (диодов, стабилитронов) это зависимость тока диода I_d от напряжения на диоде U_d : $I_d = f(U_d)$, являющаяся функцией одного аргумента, для трехэлектродных (транзисторов) – это функции двух аргументов, образующие семейства ВАХ. Например, зависимости $I_k = f(U_{кэ})|I_b = \text{const}$ тока коллектора I_k от напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$ при фиксированных значениях тока базы I_b представляют выходные ВАХ биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

Определению ВАХ полупроводниковых приборов отвечает базовый метод их измерения – метод вольтметра-амперметра. В соответствии с этим методом к электродам полупроводникового прибора подключаются управляемые источники (генераторы) ЭДС или тока и с помощью измерительных приборов вольтметров и амперметров (миллиамперметров) измеряются напряжения и токи в цепях полупроводникового прибора при различных значениях ЭДС или тока источников.

Общие базовые схемы измерения ВАХ методом вольтметра-амперметра для двух- и трехэлектродных полупроводниковых приборов с использованием управляемых генераторов ЭДС приведены на рис. 2.1а, б.

Кроме управляемых генераторов ЭДС E_1 и E_2 они содержат миллиамперметры mA и вольтметры V , измеряющие ток I_1 и напряжение U_1 двухэлектродного прибора и входные (I_1, U_1) и выходные (I_2, U_2) токи и напряжения трехэлектродного прибора.

Общим схемам измерения, представленным на рис. 2.1а, б, соответствуют приведенные на рис. 2.2а, б базовые схемы измерения ВАХ полупроводникового диода, биполярного и полевого транзисторов.

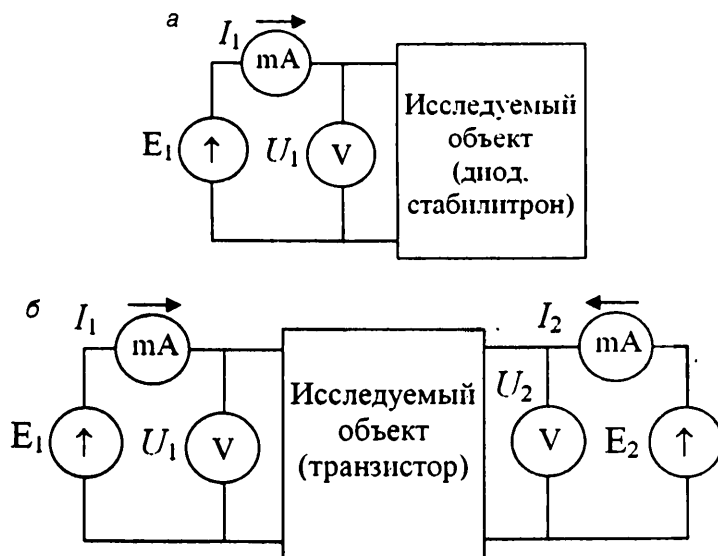


Рис. 2.1. Общие схемы измерения ВАХ методом вольтметра-амперметра для двух- (а) и трехэлектродных (б) объектов исследования

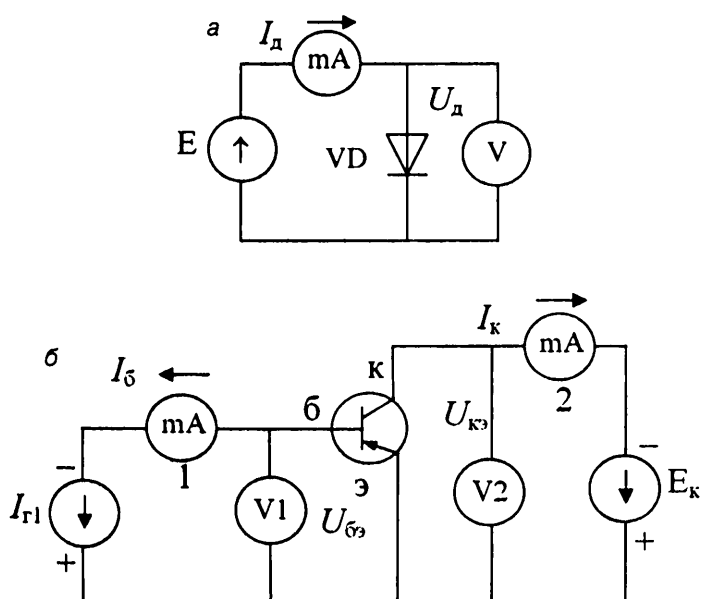


Рис. 2.2. Базовые схемы измерения ВАХ методом вольтметра-амперметра для диода (а), биполярного транзистора (б) и полевого транзистора (в)

ВАХ диода получается путем изменения ЭДС источника E и измерения тока диода I_d и напряжения на диоде U_d .

Отличие от общей схемы измерения ВАХ трехэлектродных полупроводниковых приборов, представленной на рис. 2.16, во входной цепи биполярного транзистора $n-p-n$ -типа (рис. 2.26), включенного по схеме с общим эмиттером, использован управляемый генератор тока I_1 . Токами и напряжениями входной (I_1, U_1) и выходной (I_2, U_2) цепей транзистора являются в данной схеме ток базы I_b , напряжение база–эмиттер $U_{бэ}$, ток коллектора I_k и напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ}$. Путем изменения ЭДС источника E_2 и измерения напряжения $U_{кэ}$ и тока I_k при фиксированных значениях тока базы I_b , задаваемых генератором тока $I_{г1}$, получают выходные ВАХ биполярного транзистора $I_k = f(U_{кэ})|I_b = \text{const}$. Изменяя ток генератора $I_{г1}$ и измеряя ток базы I_b и напряжение $U_{бэ}$ при фиксированных напряжениях $U_{кэ}$, задаваемых генератором E_2 , получают семейство входных ВАХ биполярного транзистора $I_b = f(U_{бэ})|U_{кэ} = \text{const}$.

В схеме измерения ВАХ полевого транзистора (рис. 2.26) с управляющим $p-n$ -переходом и p -каналом, включенного по схеме с общим истоком, измеряются входное напряжение затвор–исток $U_{зи}$ (U_1), выходной ток стока I_c (I_2) и выходное напряжение сток–исток $U_{си}$ (U_2). Схема не предусматривает измерения входного тока затвора I_3 ввиду его малости. Для полевого транзистора измеряются семейство выходных характеристик $I_c = f(U_{си})|U_{зи} = \text{const}$ путем изменения ЭДС источника E_2 при фиксированных значениях напряжения затвор–исток $U_{зи} = E_1$ и семейство передаточных (или проходных) ВАХ $I_c = f(U_{зи})|U_{си} = \text{const}$, получаемое путем изменения ЭДС источника E_1 при фиксированных напряжениях сток–исток $U_{си}$.

Сопротивление R_s на схеме, представленной на рис. 2.26, используется в качестве сопротивления утечки.

Схемы измерения для биполярных транзисторов $p-n-p$ -типа и полевых транзисторов других типов (с n -каналом, с изолированным затвором) отличаются от рассмотренных только полярностями прикладываемых к их электродам напряжений управляемых источников.

ВАХ для других схем включения биполярных и полевых транзисторов (например, с общей базой или с общим затвором) могут быть получены путем пересчета измеренных ВАХ для схем включения с общим эмиттером, общим истоком. Для биполярного транзистора пересчетные соотношения имеют вид

$$I_3 = I_b + I_k; U_{кб} = U_{кэ} - U_{бэ}.$$

2.2. Определение параметров полупроводниковых приборов методом вольтметра-амперметра

Методом вольтметра-амперметра измеряются не только ВАХ, но и определяемые ими низкочастотные параметры полупроводниковых приборов – статические и динамические. Они могут быть найдены для любой рабочей точки ВАХ, заданной значениями соответствующих ей токов и напряжений.

К статическим параметрам относятся параметры, определяемые отношением постоянных напряжений и токов полупроводникового прибора в заданной рабочей точке ВАХ. Они находятся по измеренным значениям его входных и выходных постоянных напряжений и токов: U_1/I_1 – входное статическое сопротивление транзистора или статическое сопротивление диода $R_{iл} = U_n/I_n$; U_2/I_2 – выходное статическое сопротивление транзистора; I_2/I_1 – статический коэффициент передачи по току транзистора.

Динамические (или дифференциальные) параметры, называемые также мало-сигнальными параметрами полупроводникового прибора, соответствуют значениям производной его ВАХ в заданной рабочей точке. Для диода таким параметром является дифференциальное сопротивление $r_{iл} = dU_n/dI_n|_{I_n} = I_{n0}$, где I_{n0} – значение тока диода в рабочей точке. Практически дифференциальное сопротивление находится по конечным измеряемым приращениям напряжения и тока относительно их значений в рабочей точке: $r_{iл} = \Delta U_n/\Delta I_n|_{I_n} = I_{n0}$. Выполнив такие измерения и расчеты в различных точках ВАХ, можно построить зависимости статического и динамического сопротивлений диода от тока диода I_n .

По измеренным значениям токов и напряжений биполярного транзистора и их конечным приращениям могут быть вычислены значения низкочастотных параметров линейной физической модели транзистора или низкочастотных характеристических параметров эквивалентного ему линейного активного четырехполюсника в заданной рабочей точке ($U_{бэ0}$, $I_{бэ}$, $I_{к0}$, $U_{кэ0}$), например, значения низкочастотных h -параметров:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \Delta U_{бэ}/\Delta I_б|_{U_{кэ}} = \text{const}; & h_{21} &= \Delta I_к/\Delta I_б|_{U_{кэ}} = \text{const}; \\ h_{12} &= \Delta U_{бэ}/\Delta U_{кэ}|_{I_б} = \text{const}; & h_{22} &= \Delta I_к/\Delta U_{кэ}|_{I_б} = \text{const}. \end{aligned}$$

По измеренным значениям токов и напряжений полевого транзистора (или по измеренным ВАХ) могут быть вычислены его низкочастотные y -параметры – крутизна и выходная проводимость:

$$y_{21} = S_{21} = \Delta I_с/\Delta U_{зи}|_{U_{си}} = \text{const}; \quad y_{22} = \Delta I_с/\Delta U_{си}|_{U_{зи}} = \text{const}.$$

2.3. Схемы измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов, основанные на измерении напряжений

Использование метода вольтметра-амперметра для измерения ВАХ связано с измерением тока в электрической цепи, представляющим определенные трудности. При электронных измерениях оно осуществляется, как правило, косвенным методом путем измерения падения напряжения U_{R_T} на образцовом (токоизмерительном) резисторе R_T , являющимся датчиком измеряемого тока: $I = \frac{U_{R_T}}{R_T}$. Часто этот

резистор одновременно выполняет и токоограничивающие функции. Поэтому в практических схемах измерение ВАХ и параметров полупроводниковых приборов сводится к измерению напряжений.

На рис. 2.3 приведена схема измерения ВАХ полупроводникового диода с применением резистивного датчика тока. Измерение напряжения на образцовом резисторе выполняется с помощью вольтметра V1. Его показания могут быть непосредственно отградуированы в единицах измеряемого тока, который определяется

как $I_d = \frac{U_{R_r}}{R_r} = \alpha U_{R_r}$, где α – масштабный размерный множитель.

Если источник E_1 выдает калиброванные (точно известные) значения ЭДС, то вольтметр V1 не нужен. Значение тока в цепи при этом определяется как $I_d = (E_1 - U_d)/R_r$, где U_d – напряжение на диоде, измеряемое вольтметром V2.

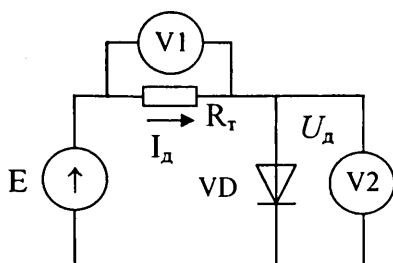


Рис. 2.3. Схема измерения ВАХ полупроводникового диода с токоизмерительным резистором

В противном случае напряжение источника E_1 можно измерять параллельно подключенным к нему вольтметром V1. Соответствующая этому схема измерения для полупроводникового стабилитрона приведена на рис. 2.4. К стабилитрону подключено нагрузочное сопротивление R_n , задающее ток нагрузки I_n . Значения тока нагрузки I_n и стабилитрона I_{ct} находятся по измеренным с помощью вольтметров V1, V2 ЭДС E_1 и напряжения на стабилитроне U_{ct} : $I_n = U_{ct}/R_n$; $I_{ct} = (E_1 - U_{ct})/R_r - I_n$.

Резистор R_r совмещает функции токоизмерительного и балластного сопротивлений.

На рис. 2.5 приведена схема измерения ВАХ для биполярного транзистора $n-p-n$ -типа с токоизмерительными резисторами R_b , R_k в цепях базы и коллектора транзистора.

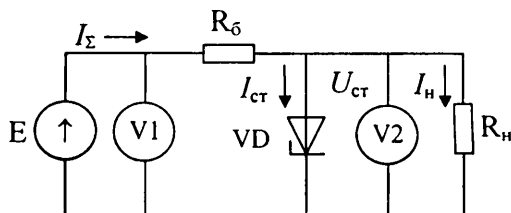


Рис. 2.4. Схема измерения ВАХ стабилитрона на основе измерения напряжений

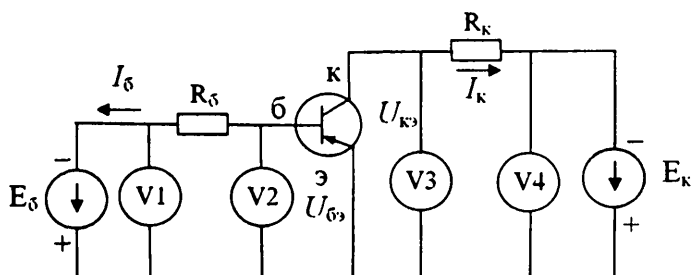


Рис. 2.5. Схема измерения ВАХ для биполярного транзистора на основе измерения напряжений

Управляющие напряжения в цепях базы и коллектора задаются генераторами ЭДС E_b и E_k . Использование генератора ЭДС E_b в цепи базы обосновано в ряде случаев более простой его реализацией по сравнению с генератором тока базы в схеме рис. 2.2б. Вольтметрами $V1, V4$ измеряются напряжения управляемых генераторов E_b, E_k , вольтметрами $V2, V3$ – напряжения $U_{бэ}, U_{кэ}$, а значения токов I_b и I_k вычисляются как

$$I_b = (E_b - U_{бэ})/R_b; I_k = (E_k - U_{кэ})/R_k.$$

В базовой практической схеме измерения ВАХ для полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и n -каналом (рис. 2.6) измерение тока стока I_c осуществляется с помощью измерительного резистора R_c по измеряемым с помощью вольтметров $V2, V3$ значениям напряжения сток–исток $U_{си}$ и ЭДС управляемого генератора E_c : $I_c = (E_c - U_{си})/R_c$.

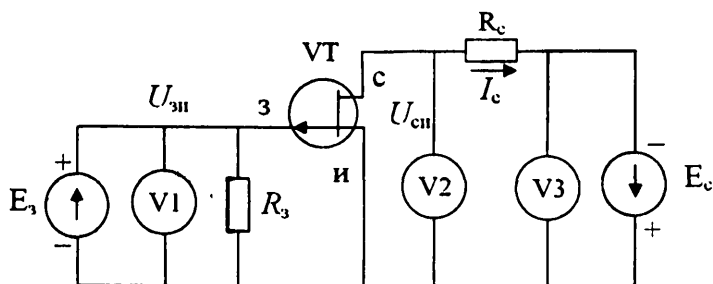


Рис. 2.6. Схема измерения ВАХ для полевых транзисторов на основе измерения напряжений

Вольтметром $V1$ в этой схеме измеряется напряжение затвор–исток $U_{зш}$, задаваемое генератором ЭДС $E_з$.

Значения токоизмерительных резисторов R_i при известных пределах изменения ЭДС управляемых источников выбираются исходя из диапазонов задаваемых и измеряемых токов и напряжений полупроводникового прибора и необходимого разрешения по току. Разрешение по току Δi_p определяется разрешением

по напряжению Δu_p вольтметра, измеряющего падение напряжения на токоизмерительном резисторе R_T : $\Delta i_p = \Delta u_p / R_T$. Например, для полупроводникового диода (рис. 2.3), приняв $E_{1\max} = 10$ В, $U_d = 0,5$ В (прямое падение напряжения на диоде), найдем сопротивление R_T , при котором измеряемый ток диода ограничивается значением $I_{\text{изм max}} = 30$ мА: $R_T = (E_{1\max} - U_d) / I_{\text{изм max}} \approx 300$ Ом. Если используемый для измерения падения напряжения U_{R_T} вольтметр обеспечивает разрешение по напряжению $\Delta u_p = 3$ мВ, то разрешение по току составит $\Delta i_p = \Delta u_p / R_T = 3/300 = 10$ мкА. Такое разрешение более чем достаточно при измерении прямой ветви ВАХ. Для измерения малых токов и токов обратной ветви ВАХ необходимо использовать токоизмерительный резистор с большим сопротивлением R_T . Так, при сопротивлении $R_T = 100$ кОм получается разрешение по току $\Delta i_p = (3/100000) = 0,03$ мкА в диапазоне измеряемых токов диода до $I_{\text{изм max}} = (E_{1\max} - U_d) / R_T \approx 0,1$ мА.

Для схемы измерения ВАХ стабилитрона (рис. 2.4) токоизмерительное сопротивление R_T рассчитывается как балластное сопротивление R_b параметрического стабилизатора напряжения. При этом обеспечиваются, как правило, и необходимое разрешение по току и диапазон измеряемых токов.

При расчете токоизмерительных резисторов в выходной цепи биполярного и полевого транзисторов ($R_{к1}$, R_c на рис. 2.5, 2.6) нужно также обеспечить необходимый диапазон измерения ВАХ по напряжению коллектора (стока). Он ограничивается сверху максимальным напряжением на коллекторе (стоке) $U_{к(c)\max}$, которое может быть задано при максимальном измеряемом токе коллектора (стока) $I_{к(c)\max}$ и максимальной (по модулю) ЭДС источника $E_{к(c)\max}$:

$$U_{к(c)\max} = E_{к(c)\max} - I_{к(c)\max} R_{к(c)}.$$

Желательно, чтобы это напряжение было близко к $E_{к(c)\max}$, например, $U_{к(c)\max} \geq 0,95 E_{к(c)\max}$. Отвечающее этому условию сопротивление $R_{к(c)}$ находится как $R_{к(c)} \leq (E_{к(c)\max} - U_{к(c)\max}) / I_{к(c)\max} = 0,05 E_{к(c)\max} / I_{к(c)\max}$.

Например, при $E_{к(c)\max} = 10$ В, $I_{к(c)\max} = 30$ мА получается $R_{к(c)} \leq 16,7$ Ом. Если принять $R_{к(c)} = 10$ Ом, то $U_{к(c)\max} = 0,97 E_{к(c)\max}$. Однако на таком малом сопротивлении при максимальном токе коллектора (стока) получается малое измеряемое падение напряжения $\Delta U_{R_{к(c)\max}} = I_{к(c)\max} R_{к(c)} = 0,3$ В и, соответственно, неудовлетворительное разрешение по току: $\Delta i_p = \Delta u_p / R_{к(c)} = (3/0,01) = 0,3$ мА. Его можно улучшить путем измерения падения напряжения на резисторе $R_{к(c)}$ с помощью вольтметра с дифференциальным входным усилителем, усиливающим напряжение $\Delta U_{R_{к(c)\max}}$ практически до напряжения $E_{к(c)\max}$. Это соответствует коэффициенту усиления измерительного усилителя $K_u = E_{к(c)\max} / \Delta U_{R_{к(c)\max}} = 33$. Разрешение по току коллектора (стока) с учетом усиления составит $\Delta i_p = \Delta u_p / (R_{к(c)} \cdot K_u) \approx 10$ мкА, что является вполне достаточным.

Для измерения выходных токов $I_{к(c)} \leq 1$ мА можно использовать токоизмерительное сопротивление $R_{к(c)} = 300$ Ом без измерительного усилителя (или при коэффициенте усиления усилителя K_u , равном единице). При таком сопротивлении также получаем $U_{к(c)\max} = 0,97 E_{к(c)\max}$ и $\Delta i_p = 10$ мкА.

Токоизмерительное сопротивление $R_{к(c)} = 300$ Ом является сопротивлением нагрузки биполярного и полевого транзисторов при исследовании их работы на переменном токе.

2.4. Способы измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов

Изменение ЭДС или тока управляемых генераторов и считывание измеренных значений токов и напряжений при измерении ВАХ могут осуществляться ручным способом или автоматически. Измерения ВАХ разделяются на статические, динамические и квазистатические в зависимости от скорости и характера изменения задаваемых ЭДС или тока (непрерывного или ступенчато-непрерывного) и инерционности (времени измерения) измерительных средств.

При *статических измерениях* значение измеряемой величины в течение времени измерения измерительного средства является неизменным. Статическими являются ручные измерения, а также автоматические измерения при очень низкой скорости непрерывного изменения задаваемых значений ЭДС (тока) или при большой длительности ступенек в случае их ступенчато-непрерывного изменения.

Статические измерения обеспечивают высокую точность из-за отсутствия составляющей погрешности, обусловленной изменением измеряемой величины во время измерения (динамической погрешности), но требуют достаточно большого времени на измерение ВАХ.

Однако при выборе способа измерения необходимо учитывать особенность полупроводникового прибора как объекта измерения. Она заключается в том, что даже при неизменных значениях приложенных к нему ЭДС или тока его измеряемые токи и напряжения изменяются во времени за счет изменения температуры кристалла, зависящей от рассеиваемой кристаллом мощности и времени приложения заданного воздействия. При большом времени измерения, свойственном статическим измерениям, изменение температуры кристалла является значительным и приводит к большим искажениям измеренной ВАХ.

Уменьшение температурной составляющей погрешности измерения достигается при *динамическом измерении ВАХ* путем увеличения скорости непрерывного периодического изменения (сви́пирования) ЭДС (тока) управляемых генераторов и повышения быстродействия измерительных средств, то есть уменьшения их времени измерения или инерционности. При этом за счет тепловой инерционности полупроводникового прибора температура кристалла не успевает существенно измениться за время одного измерения, а после нескольких периодов изменения задаваемых воздействий (после прогрева полупроводникового прибора) в кристалле устанавливается некоторая средняя практически постоянная температура. Уменьшение погрешности измерения, связанной с необходимым при динамических измерениях малым временем измерения токов и напряжений полупроводникового прибора, обеспечивается усреднением результатов многократных измерений по заданному числу периодов изменения ЭДС или токов управляемых генераторов.

Преимущества динамического режима измерения практически сохраняются и при квазистатическом измерении ВАХ. В этом режиме используется ступенчато-

непрерывное изменение задаваемых значений ЭДС или тока с минимальной длительностью ступеньки, определяемой временем измерения измерительного средства и задержкой измерения на время установления переходных процессов в схеме измерения.

Возможно также измерение ВАХ в импульсном квазистатическом режиме, когда в паузах между измерениями значения ЭДС или тока управляемых генераторов принимают нулевые значения, как и измеряемые значения тока и напряжения. Такой режим измерения используется для измерения ВАХ и параметров мощных полупроводниковых приборов.

2.5. Средства, используемые для измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов

Основными средствами измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов являются:

- набор стандартных измерительных приборов для ручного измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов;
- специализированные измерительные приборы для измерения параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем;
- специализированные приборы – характериографы для автоматического измерения ВАХ;
- автоматические измерители ВАХ и параметров полупроводниковых приборов на базе персональных компьютеров (ПК).

2.6. Традиционные средства измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов

Метод вольтметра-амперметра непосредственно реализуется при ручных измерениях ВАХ с помощью стандартных измерительных приборов – управляемых источников питания и измерителей напряжения и тока различного типа: электро-механических, электротепловых или электронных (аналоговых и цифровых), а также многофункциональных измерителей тока и напряжения – мультиметров.

Специализированные промышленные измерительные средства обеспечивают измерение как низкочастотных параметров полупроводниковых приборов, определяемых их вольт-амперной характеристикой, так и большого числа других – высокочастотных, температурных и т. д. параметров. Примерами их являются микропроцессорные измерители параметров диодов и биполярных транзисторов типа Л2-76, Л2-77 и микропроцессорные измерители параметров полевых транзисторов типа Л2-78, Л2-80 [7]. Такие специализированные измерительные приборы изучаются в курсе «Метрология и радиоизмерения».

Автоматическое измерение ВАХ с отображением их на экране дисплея – электронно-лучевой трубки или монитора ПК – обеспечивают специализированные

измерительные приборы – характериографы. Измерители ВАХ на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) выпускаются как самостоятельные измерительные приборы или в виде приставки к электронно-лучевым осциллографам – аналоговым и цифровым. Осциллографические средства вследствие высокого их быстродействия обеспечивают практически безынерционное измерение токов и напряжений. Ими наиболее полно реализуются преимущества динамического режима измерения ВАХ с непрерывным автоматическим изменением ЭДС или тока управляемого генератора, называемого в данном случае генератором развертки.

Структурная схема измерителя ВАХ на основе ЭЛТ (рис. 2.7) содержит генератор развертки, генератор ступенчатой функции, устройство их синхронизации, контролируемый (исследуемый) объект и дисплей на ЭЛТ.

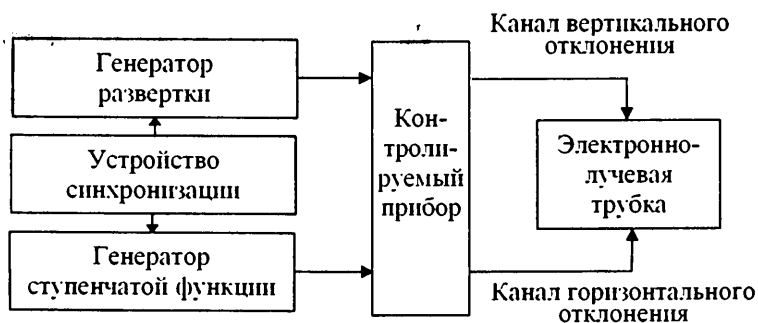


Рис. 2.7. Структурная схема измерителя ВАХ на основе ЭЛТ

Генератор развертки используется при измерении ВАХ как двухэлектродных, так и трехэлектродных полупроводниковых приборов, генератор же ступенчатой функции – только при измерении ВАХ трехэлектродных приборов, при этом один из генераторов подключается ко входной цепи полупроводникового прибора, а другой – к выходной в зависимости от вида прибора и измеряемой ВАХ. Напряжение или ток генератора ступенчатой функции изменяются дискретно с заданным шагом через каждый цикл генератора развертки. Напряжение между электродами полупроводникового прибора, являющееся аргументом измеряемой ВАХ, прикладывается к горизонтальным отклоняющим пластинам ЭЛТ или ко входу внешней развертки осциллографа (входу X), а напряжение между другими электродами или ток электрода, также преобразуемый с помощью датчика тока в пропорциональное напряжение, прикладываются к вертикальным отклоняющим пластинам ЭЛТ или ко входу Y осциллографа. В результате на экране ЭЛТ динамически воспроизводится семейство измеряемых ВАХ, соответствующих дискретным значениям тока электрода или напряжения между электродами, задаваемым генератором ступенчатой функции.

Например, при измерении семейства статических выходных характеристик биполярного транзистора $I_k = f(U_{кз})|I_6 = \text{const}$ в соответствии с базовой схемой измерения, приведенной на рис. 2.26, генератор развертки является источником ЭДС выходной цепи биполярного транзистора, а генератор ступенчатой функ-

ции – источником тока базы I_b входной цепи база–эмиттер. При этом на горизонтальные отклоняющие пластины ЭЛТ подается напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ}$, а на вертикальные – напряжение, пропорциональное току коллектора I_k .

При использовании цифрового осциллографа снимаемые с электродов полупроводникового прибора непрерывные сигналы напряжения и тока дискретизируются во времени с частотой дискретизации $f_{дл}$ аналого-цифрового преобразователя и оцифровываются. В результате получаются пары отсчетов напряжений или пары отсчетов напряжения и тока или пары отсчетов токов электродов, определяющие координаты дискретных точек измеряемой ВАХ, которые динамически выводятся на экран цифрового осциллографа. Такой измеритель обеспечивает высокую скорость измерения ВАХ, но ему присуща динамическая погрешность измерения напряжений и токов вследствие их непрерывного изменения. Эта погрешность дополнительно возрастает при использовании одного АЦП для поочередного измерения двух напряжений или токов за счет обусловленной этим неодновременности их измерения.

2.7. Средства измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов на базе ПЭВМ

К современным средствам автоматизированного измерения ВАХ и параметров полупроводниковых приборов относятся измерители ВАХ на базе ПК, реализуемые на основе компьютерных измерительных технологий, рассмотренных в параграфе 1.2. Аппаратное обеспечение таких измерителей включает ПК и УСД и соответствует общей структуре компьютерных измерительных систем (рис. 1.3), исследуемым объектом в которой является полупроводниковый прибор. Устройство сбора данных содержит каналы аналогового и цифрового ввода-вывода, через которые осуществляется взаимодействие ПК с исследуемым полупроводниковым прибором. По каналам аналогового вывода на полупроводниковый прибор передаются необходимые тестовые воздействия, аналогичные формируемым генераторами развертки и ступенчатой функции в измерителе ВАХ на основе ЭЛТ (рис. 2.7). Через каналы аналогового ввода поступают в ПК преобразованные в цифровые коды отсчеты напряжений и токов исследуемого полупроводникового прибора. Каналы цифрового ввода-вывода используются для управления измерительным комплексом.

Измерение ВАХ в компьютерных измерителях выполняется, как правило, квазистатическим способом. При этом с соответствующего канала вывода УСД выводится периодическое с периодом T_n ступенчато изменяющееся напряжение (ЭДС) с заданными пределами изменения $E_{нач}$, $E_{кон}$ и заданными значениями амплитуды ΔE и длительности ступенек ΔT (рис. 2.8).

На интервале каждой ступеньки ΔT АЦП с некоторой задержкой по времени T_z на установление переходных процессов в схеме измерения оцифровывает постоянные на интервале $T_{изм}$ значения токов и напряжений исследуемого полупроводникового прибора, по которым на экране монитора и воспроизводится его ВАХ.

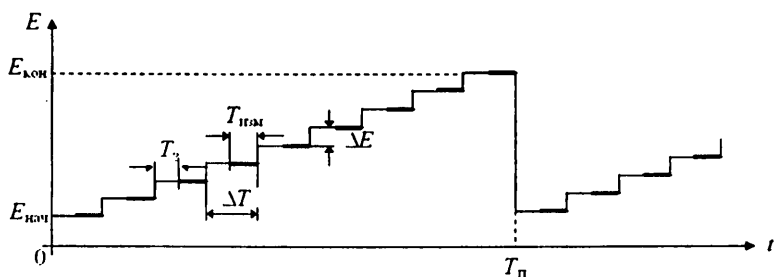


Рис. 2.8. Изменение ЭДС генератора развертки при измерении ВАХ квазистатическим способом

На рис. 2.9–2.12 приведены примеры возможных схем подключения исследуемых полупроводниковых приборов к УСД.

В схеме подключения стабилитрона (рис. 2.9) используется один канал вывода УСД АО1, два канала ввода AI1, AI2 и линии вывода цифровых сигналов DIO. Канал вывода АО1 является выходом управляемого источника ЭДС E_1 . Каналы ввода AI1, AI2 обеспечивают ввод и измерение ЭДС источника E_1 (AI1) и напряжения на стабилитроне $U_{ст}$ (AI2). По ним в соответствии со схемой измерения, представленной на рис. 2.4, вычисляются падение напряжения на балластном сопротивлении R_6 : $U_{R_6} = E_1 - U_{ст}$ и значения токов стабилитрона и нагрузки: $I_n = U_{ст} / R_n$, $I_{ст} = U_{R_6} / R_6 - I_n$.

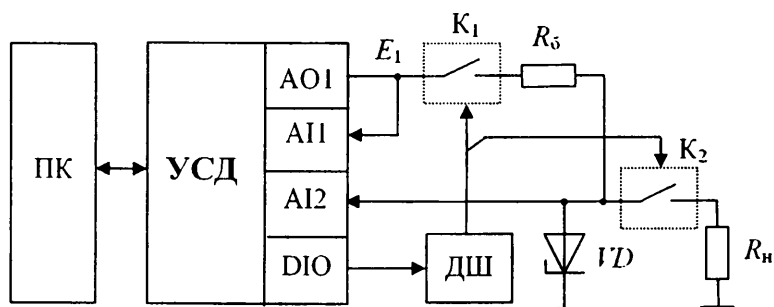


Рис. 2.9. Схема подключения стабилитрона к устройству сбора данных

С помощью дешифратора ДШ линий цифрового вывода осуществляется управление ключом K_1 , подключающим исследуемый прибор к источнику ЭДС E_1 (ключ выбора объектного модуля лабораторного макета) и ключом выбора сопротивления нагрузки K_2 .

На схеме подключения диодов (рис. 2.10) дополнительно показаны подключаемые с помощью ключей K_2 элементы внешней активно-емкостной нагрузки R_n , C_n , используемые при исследовании работы диода на переменном токе.

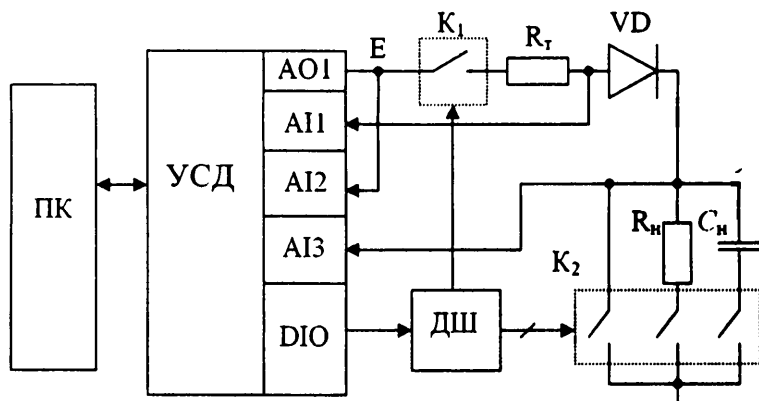


Рис. 2.10. Схема подключения диода к устройству сбора данных

Схема подключения исследуемого биполярного транзистора к УСД приведена на рис. 2.11. В данной схеме используется два канала вывода УСД AO1, AO2, являющиеся источниками ЭДС цепи коллектора E_K и цепи базы E_B , 4 канала ввода AI1–AI4 и линии цифрового вывода DIO. С помощью дешифратора ДШ линий цифрового вывода осуществляется управление ключами K_1 , K_2 , подключающими исследуемый транзистор к источникам ЭДС E_K , E_B (ключи выбора объектного модуля лабораторного макета).

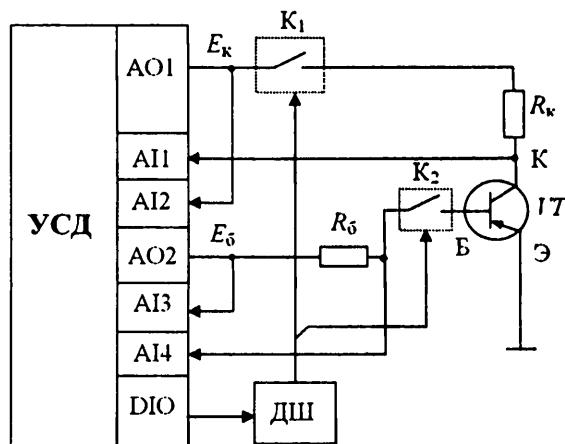


Рис. 2.11. Схема подключения исследуемого биполярного транзистора к устройству сбора данных

Каналы ввода используются для ввода и измерения напряжений база–эмиттер $U_{бэ}$ (AI4), коллектор–эмиттер $U_{кэ}$ (AI1) и ЭДС источников E_B (AI3) и E_K (AI2), по которым в соответствии со схемой измерения, представленной на рис. 2.5, вычис-

ляются падения напряжений на токоизмерительных резисторах R_6, R_k : $U_{R_6} = E_6 - U_{6э}$, $U_{R_k} = E_k - U_{кэ}$ и значения токов базы и коллектора: $I_6 = U_{R_6}/R_6$, $I_k = U_{R_k}/R_k$.

Схема подключения исследуемого полевого транзистора приведена на рис. 2.12. Схема использует два канала вывода УСД АО1, АО2, являющиеся источниками ЭДС цепи стока E_c и цепи затвора E_3 , три канала ввода АИ1–АИ3 и линии цифрового вывода DIO, управляющие через дешифратор ДШ ключами K_1, K_2 , подключающими транзистор к источникам ЭДС стока и затвора E_c, E_3 (ключи выбора объектного модуля лабораторного макета).

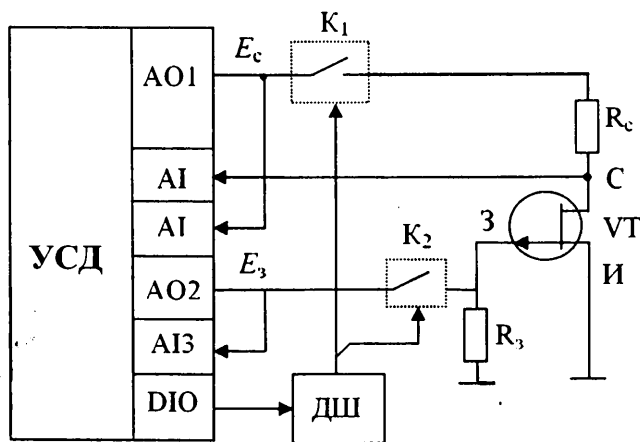


Рис. 2.12. Схема подключения исследуемого полевого транзистора к устройству сбора данных

Каналы ввода используются для ввода и измерения ЭДС источника E_3 , равной напряжению затвор–исток $U_{зи}$ (канал АИ3), напряжения сток–исток $U_{си}$ (канал АИ1) и ЭДС источника E_c (канал АИ2), по которым в соответствии со схемой измерения, приведенной на рис. 2.6, вычисляются падение напряжения на токоизмерительном резисторе R_c : $U_{R_c} = E_c - U_{си}$, и значение тока стока: $I_c = U_{R_c}/R_c$.

На основе компьютерных измерительных средств построена система автоматизированного лабораторного практикума с удаленным доступом по исследованию полупроводниковых приборов, которая рассматривается в последующих разделах.

Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Электроника»



3.1. Конфигурация АПК «Электроника» и его инструментальное обеспечение

Состав аппаратных и программных средств АПК «Электроника» и связи между ними соответствуют общей базовой конфигурации систем АЛП УД, представленной на рис. 1.1. АПК «Электроника» создан на основе компьютерных измерительных технологий *NI*. Этой технологии отвечают используемые инструментальные средства комплекса и средства разработки его сетевого и измерительного ПО.

Пользователи АПК «Электроника» с удаленных ПК клиента посредством клиентского сетевого и измерительного программного обеспечения взаимодействуют с аппаратными средствами системы объектового уровня. К этим средствам относятся измерительный ПК или ПК-сервер, совмещающий функции измерительного ПК в конфигурации, изображенной на рис. 1.2, а также инструментальное УСД и объект лабораторного исследования – автоматизированный лабораторный макет по электронике.

В качестве инструментального УСД, сопрягаемого с измерительным ПК, в системе применена многофункциональная плата сбора данных типа *NI PCI-6221M*, имеющая следующие технические характеристики:

- число каналов аналогового ввода – 16 несимметричных или 8 дифференциальных;
- число каналов аналогового вывода – 2;
- число каналов цифрового ввода-вывода – 8;
- диапазон вводимых и выводимых напряжений ± 10 В;
- разрядность АЦП – 16 бит;

- разрядность ЦАП – 16 бит;
- максимальная скорость аналогового ввода – 500 тыс. выборок/с;
- максимальная скорость аналогового вывода – 833 тыс. выборок/с;
- разрешение по аналоговому вводу-выводу ≤ 1 мВ.

Внешний вид платы *NI PCI-6221M* приведен на рис. 3.1.

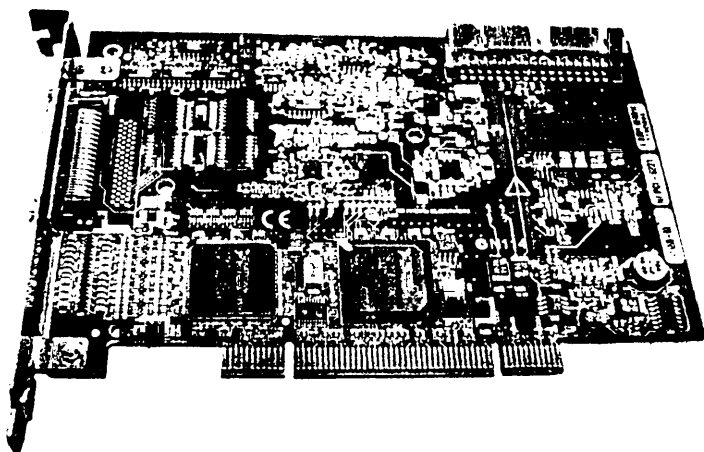


Рис. 3. 1. Плата сбора данных *NI PCI-6221M*

Плата устанавливается на высокоскоростную шину *PCI* измерительного ПК. В системе АЛП УД «Электроника» плата сбора данных выполняет функции, определяемые общей структурой устройства сбора данных (рис. 1.3) и развернутой структурной схемой многофункциональной платы сбора данных, показанной на рис. 1.5. Плата сопрягается с автоматизированным лабораторным макетом, обеспечивая вывод на него тестовых и управляющих сигналов (аналоговых и цифровых) и синхронизированный ввод аналоговых измерительных сигналов.

Ввод аналоговых сигналов в ПК осуществляется путем преобразования их из аналоговой формы в цифровую с помощью общего для всех каналов ввода 16-разрядного АЦП, а формирование выводимых аналоговых сигналов – путем преобразования в аналоговую форму цифровых сигналов ПК с помощью двух 16-разрядных ЦАП каналов вывода. С каналов АО0, АО1 платы сбора данных выводятся ЭДС управляемых источников E_1 , E_2 , которые подключаются к электродам исследуемых полупроводниковых приборов (рис. 3.1). С помощью программируемого аттенюатора ПА осуществляется управление амплитудой выводимых сигналов, а с помощью программируемого усилителя ПУ обеспечивается необходимое усиление вводимых аналоговых сигналов. По линиям цифрового вывода из ПК выводятся коды управления лабораторным макетом.

3.2. Автоматизированный лабораторный макет АПК «Электроника»

АЛМ АПК УД «Электроника» представляет совокупность объектных лабораторных модулей (модулей исследуемых объектов) и модуля, который обеспечивает его сопряжение с платой сбора данных и управление объектными модулями. В состав объектных модулей входят как исследуемые полупроводниковые приборы, так и электронные и электромеханические устройства коммутации (ключи).

Общая функциональная схема лабораторного макета и его подключения к плате сбора данных приведена на рис. 3.2. Лабораторный макет включает объектные модули «Диод», «Стабилитрон», «Биполярный транзистор», «Полевой транзистор», содержащие в себе по два субмодуля. Это субмодули германиевых и кремниевых выпрямительных диодов, субмодули стабилитронов с разными напряжениями стабилизации, субмодули биполярных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов, субмодули ПТ с управляющим $p-n$ -переходом и изолированным затвором (МДП-типа).

Конкретные типы установленных в объектных модулях типов полупроводниковых приборов могут быть изменены в процессе эксплуатации АПК «Электроника».

Предусмотрена возможность установки дополнительных объектных модулей для расширения исследуемых видов или типов полупроводниковых приборов.

С целью индивидуализации исследований и расширения решаемых исследовательских задач (в частности исследования технологического разброса) каждый из 8 субмодулей макета состоит из 4 однотипных полупроводниковых приборов (элементов), раздельно подключаемых к управляемым источникам ЭДС E_1 , E_2 . Это соответствует построению автоматизированных лабораторных макетов с рас-

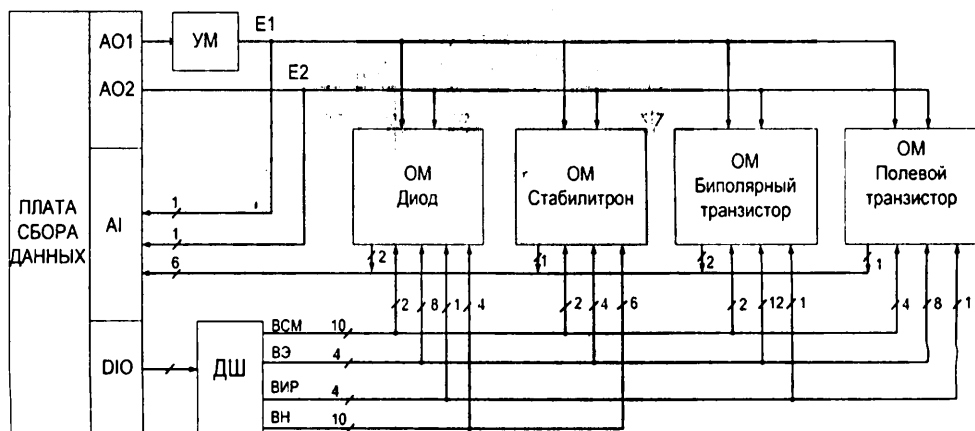


Рис. 3.2. Общая функциональная схема АЛМ

параллеливанием исследуемых однотипных объектов. Одновременно подключенным к источникам E_1 , E_2 платы сбора данных может быть только один из однотипных исследуемых элементов одного из объектных субмодулей лабораторного макета.

Усилитель мощности лабораторного макета УМ обеспечивает повышение нагрузочной способности линии вывода АОО управляемого источника E_1 , питающего выходные цепи исследуемых элементов. Выход АОО1 управляемого источника E_2 используется для питания цепей баз и затворов биполярных и полевых транзисторов (БТ и ПТ).

Дешифратор ДШ, подключенный к линиям цифрового ввода-вывода DIO, формирует сигналы управления ключами выбора субмодуля ВСМ, выбора исследуемого элемента ВЭ, выбора измерительного резистора ВИР и выбора нагрузки диода и стабилитрона ВН.

Выходы измерительных сигналов модулей подключены к линиям (каналам) аналогового ввода AI платы сбора данных также, как и выходы источников ЭДС E_1 , E_2 .

На рис. 3.3–3.6 представлены функциональные схемы объектных модулей диода, стабилитрона, БТ и ПТ.

В объектном модуле «Диод» (рис. 3.3) выбор субмодулей германиевых (VD1–VD4) и кремниевых (VD5–VD8) выпрямительных диодов осуществля-

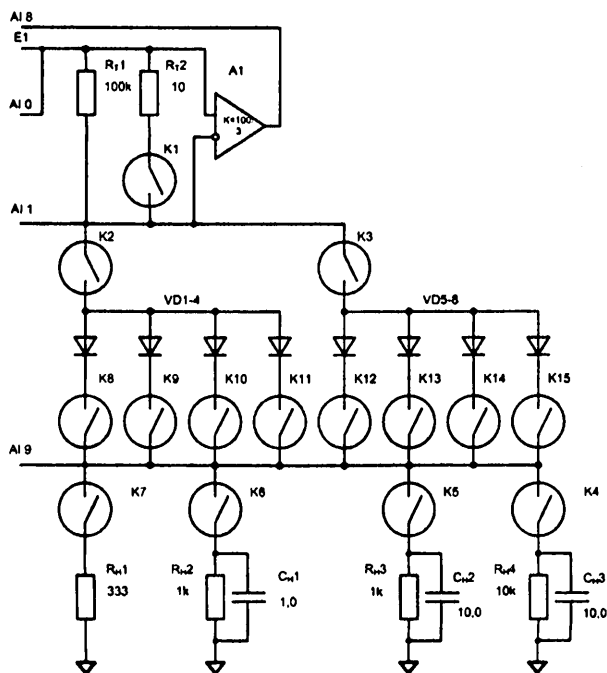


Рис. 3.3. Функциональная схема объектного модуля «Диод»

ется с помощью ключей К2, К3. В исходной версии в субмодулях установлены германиевые диоды VD1–VD4 типа ГД507А, кремниевые диоды VD5–VD8 типа КД521В. Субмодули подключаются к источнику ЭДС E_1 через токоизмерительный резистор $R_{т1}$ сопротивлением 100 кОм (при измерении обратной ветви ВАХ диода) или через низкоомный резистор $R_{т2}$ сопротивлением 10 Ом. Последний включается с помощью ключа выбора измерительного резистора К1 при измерении прямой ветви ВАХ диода и при исследовании работы диода на переменном токе. Необходимое разрешение по току при использовании резистора $R_{т2}$ обеспечивается с помощью дифференциального измерительного усилителя А1 с коэффициентом усиления $K_u = 30$, выход которого подключен ко входу канала аналогового ввода платы сбора данных А18. Задаваемые значения ЭДС E_1 контролируются путем подключения выхода источника E_1 ко входу канала ввода А10. Напряжение на анодах диодов измеряется путем считывания его в ПК по каналу ввода А11. Выбор исследуемого элемента (диода) производится с помощью ключей К8–К15.

При измерении ВАХ диодов в измерительную цепь включается также активное сопротивление нагрузки R_n1 сопротивлением 333 Ом с помощью ключа выбора нагрузки К7. Падение напряжения на нем вводится через канал ввода А19 в ПК. При измерении прямой ветви ВАХ по нему определяется значение тока диода.

При исследовании работы диода на переменном токе возможно подключение как активной нагрузки R_n1 , так и активно-емкостной (R_n2-C_n1 , R_n3-C_n2 , R_n4-C_n3), которое выполняется с помощью ключей К4–К7. При активно-емкостной нагрузке форма тока диода контролируется по падению напряжения на токоизмерительном резисторе $R_{т2}$, которое вводится в ПК через измерительный усилитель А1 и канал ввода А18.

В объектном модуле «Стабилитрон» (рис. 3.4) выбор субмодулей стабилитронов, отличающихся напряжениями стабилизации (VD1–VD4, VD5–VD8), осуществляется с помощью ключей К2, К3. В исходной версии в субмодулях установлены стабилитроны VD1–VD4 типа КС147А и VD5–VD8 типа КС133А. Субмодули подключаются к источнику ЭДС E_1 через токоизмерительный резистор $R_{т6}$ сопротивлением 200 Ом, являющийся одновременно и балластным резистором схемы параметрического стабилизатора напряжения на основе стабилитрона.

Задаваемые значения ЭДС E_1 контролируются путем подключения выхода источника E_1 ко входу канала ввода А16. Напряжение на катодах стабилитронов измеряется путем считывания его в ПК по каналу ввода А17. Выбор исследуемого элемента (стабилитрона) производится с помощью ключей К4–К7.

При измерении нагрузочных характеристик стабилизатора напряжения и исследовании его работы на переменном токе к выходу его с помощью ключей К8–К10, К12–К14 могут быть подключены нагрузочные резисторы R_n1-R_n3 , R_n4-R_n6 , имеющие сопротивления 200, 500, 1000 Ом.

В объектном модуле «Биполярный транзистор» (рис. 3.5) выбор субмодулей БТ $n-p-n$ -типа (VT1–VT4) и $p-n-p$ -типа (VT5–VT8) осуществляется с помощью

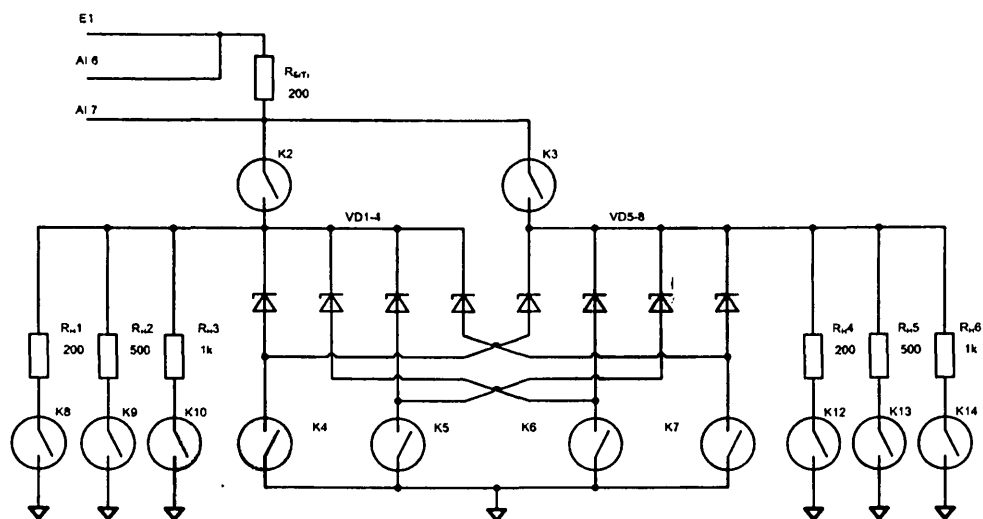


Рис. 3.4. Функциональная схема объектного модуля «Стабилитрон»

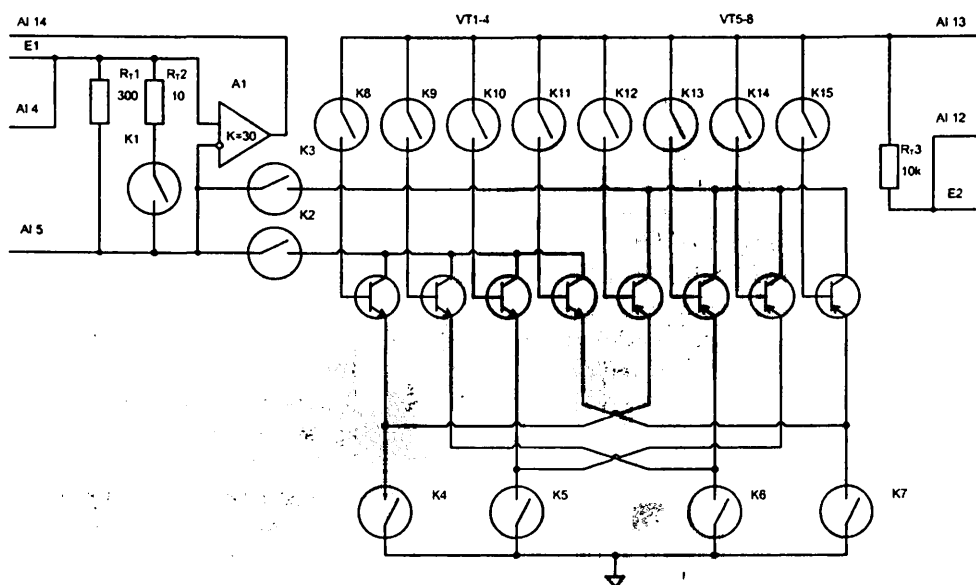


Рис. 3.5. Функциональная схема объектного модуля «Биполярный транзистор»

ключей К2, К3. В исходной версии в субмодулях установлены биполярные $n-p-n$ -транзисторы VT1–VT4 типа 2Т312А, и $p-n-p$ -транзисторы VT5–VT8 типа ГТ308В. Коллекторы транзисторов субмодулей подключаются к источнику ЭДС E_1 через токоизмерительный резистор $R_{т1}$ сопротивлением 300 Ом, который используется также в качестве сопротивления нагрузки при исследовании работы транзистора на переменном токе, или через низкоомный резистор $R_{т2}$ сопротивлением 10 Ом, который включается с помощью ключа выбора измерительного резистора К1. Необходимое разрешение по току при использовании резистора $R_{т2}$ обеспечивается с помощью дифференциального измерительного усилителя А1 с коэффициентом усиления $K_u = 30$, выход которого подключен ко входу канала аналогового ввода платы сбора данных А14. Задаваемые значения ЭДС E_1 контролируются путем подключения выхода источника E_1 ко входу канала ввода А14. Напряжение на коллекторах транзисторов измеряется путем считывания его в ПК по каналу ввода А15. Выбор исследуемого элемента (транзистора) производится с помощью ключей К4–К7 по цепям эмиттера и К8–К15 по цепям баз, которые через общий токоизмерительный резистор $R_{т3}$ сопротивлением 10 кОм подключаются к источнику ЭДС смещения E_2 . Задаваемые значения ЭДС E_2 контролируются путем подключения выхода источника E_2 ко входу канала ввода А12, а напряжения на базах транзисторов измеряются путем подключения их к каналу ввода платы сбора данных А13.

В объектном модуле «Полевой транзистор» (рис. 3.6) выбор субмодулей ПТ с управляющим $p-n$ -переходом (VT1–VT4) и изолированным затвором (VT5–VT8) осуществляется с помощью ключей К2, К3 и К4, К5. В исходной версии в субмодулях установлены ПТ с управляющим $p-n$ -переходом и p -каналом VT1–VT4 типа КП103М и транзисторы с изолированным затвором и n -каналом VT5–VT8 типа КП305Д. Стоки транзисторов субмодулей подключаются к источнику ЭДС E_1 через токоизмерительный резистор $R_{т1}$ сопротивлением 300 Ом, который используется также в качестве сопротивления нагрузки при исследовании работы транзистора на переменном токе, или через низкоомный резистор $R_{т2}$ сопротивлением 10 Ом, включающийся с помощью ключа выбора измерительного резистора К1. Необходимое разрешение по току при использовании резистора $R_{т2}$ обеспечивается с помощью дифференциального измерительного усилителя А1 с коэффициентом усиления $K_u = 30$, выход которого подключен ко входу канала аналогового ввода платы сбора данных А10. Задаваемые значения ЭДС E_1 контролируются путем подключения выхода источника E_1 ко входу канала ввода А12. Напряжения на стоках транзисторов измеряются путем считывания их в ПК по каналу ввода А15. Затворы транзисторов с помощью ключей К4, К5 подключаются к источнику смещения E_2 . Задаваемые значения ЭДС E_2 контролируются путем подключения выхода источника E_2 ко входу канала ввода А11.

Выбор исследуемого элемента (транзистора) производится с помощью ключей К8–К15 по цепям истока.

К затворам транзисторов подключены резисторы утечки R_3 сопротивлением 1 МОм.

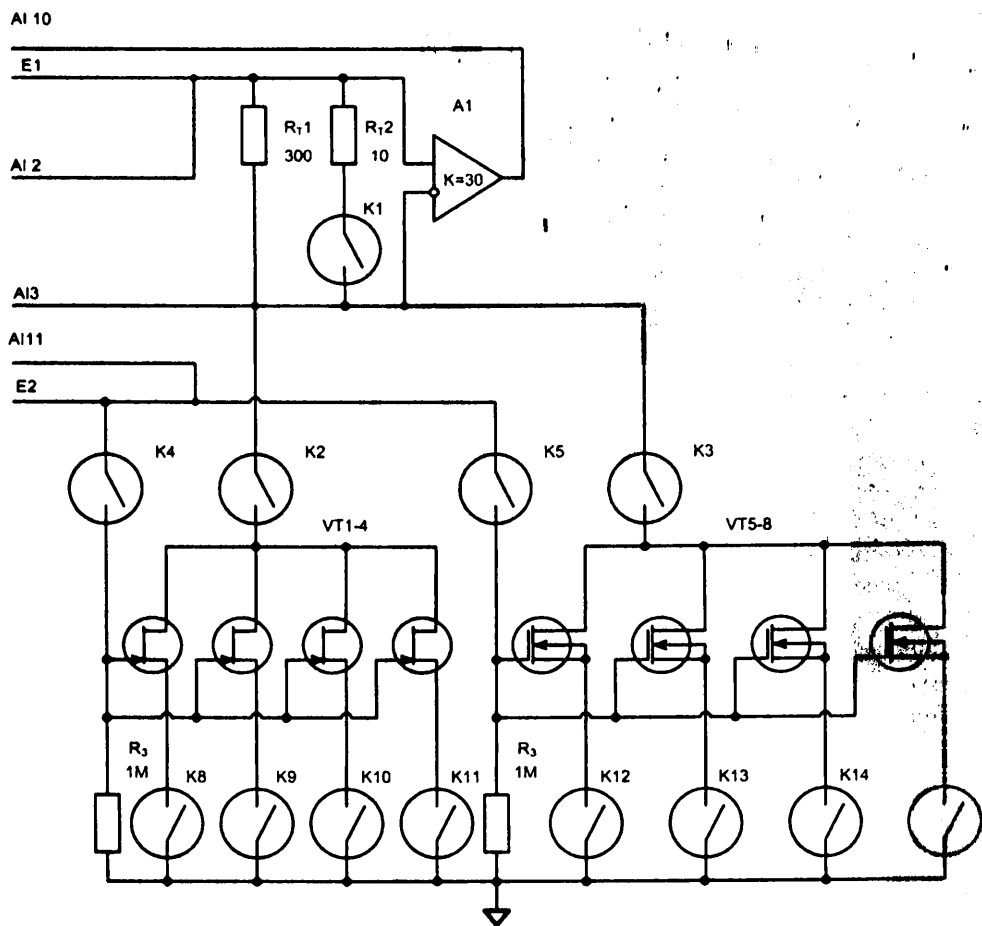


Рис. 3.6. Функциональная схема объектного модуля «Полевой транзистор»

3.3. Клиентское программное обеспечение АПК «Электроника»

Измерительное программное обеспечение системы АЛП УД разделяется на серверное и клиентское. Пользователь системы работает с измерительным программным обеспечением, установленным на ПК клиента.

Состав измерительного ПО системы определяется общей структурой автоматизированного лабораторного практикума по электронике. Практикум включает 12 лабораторных работ по экспериментальному исследованию конкретных типов полупроводниковых приборов.

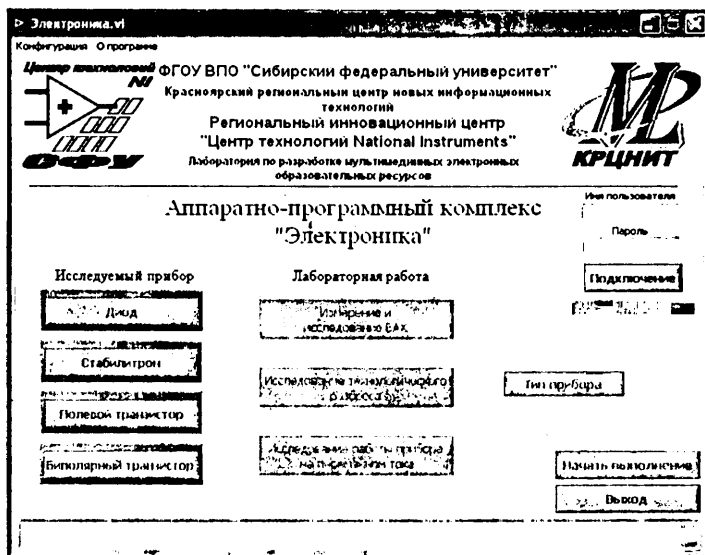


Рис. 3.7. Титульный экран АПК УД «Электроника»

Лабораторные работы по электронике в сетевом многопользовательском режиме выполняются под управлением программы «Электроника.exe».

После запуска программы «Электроника.exe» открывается титульный экран аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7).

С титульного экрана необходимо выполнить следующие действия:

- с помощью меню «Конфигурация» ввести выделенный адрес (имя) сервера и номер порта, через который осуществляется соединение с сервером;
- провести подключение к серверу нажатием клавиши «Подключение». После успешного подключения к серверу автоматически проводится диагностика АПК и в случае обнаружения неисправностей может быть выведено сообщение о недоступности одного или группы модулей АПК;
- выбрать исследуемый полупроводниковый прибор и соответствующий ему доступный модуль АПК («Диод», «Стабилитрон», «Биполярный транзистор», «Полевой транзистор») (рис. 3.8);
- выбрать выполняемую лабораторную работу («Измерение и исследование ВАХ», «Исследование технологического разброса», «Исследование работы прибора на переменном токе»);
- выбрать тип исследуемого полупроводникового прибора и номер индивидуального варианта;
- нажать клавишу «Начать выполнение».

В результате на экране монитора должна появиться лицевая панель виртуального лабораторного стенда, соответствующего выбранной лабораторной работе. Путем взаимодействия с лицевой панелью виртуального стенда и осуществляется выполнение лабораторной работы в соответствии с ее описанием.

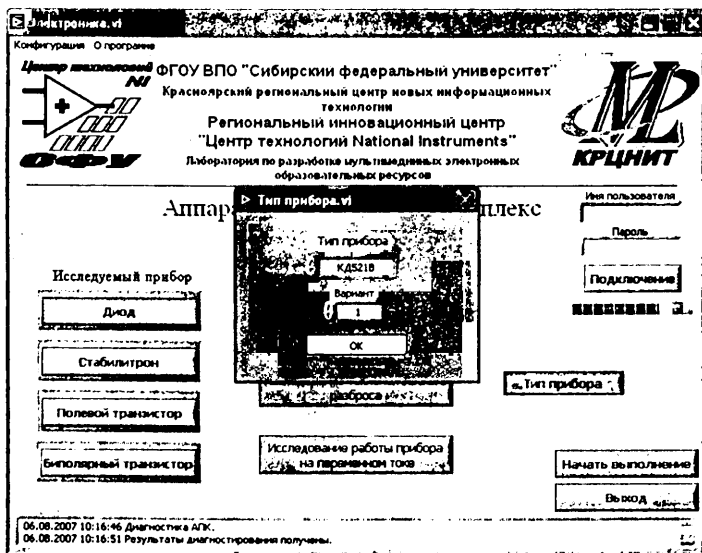


Рис. 3.8. Вид титульного экрана при выборе типа прибора

Каждая лабораторная работа выполняется с помощью собственной измерительной программы. Образующее ими измерительное программное обеспечение системы АЛП УД-Э включает следующие программы:

- «Программа измерения и исследования ВАХ и параметров выпрямительных диодов» (лабораторная работа № 1);
- «Программа измерения и исследования статистического (технологического) разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов» (лабораторная работа № 2);
- «Программа исследования работы выпрямительных диодов на переменном токе» (лабораторная работа № 3);
- «Программа измерения и исследования ВАХ и параметров стабилитронов» (лабораторная работа № 4);
- «Программа измерения и исследования статистического (технологического) разброса ВАХ и параметров стабилитронов» (лабораторная работа № 5);
- «Программа исследования работы стабилитронов на переменном токе» (лабораторная работа № 6);
- «Программа измерения и исследования ВАХ и параметров ПТ» (лабораторная работа № 7);
- «Программа измерения и исследования статистического (технологического) разброса ВАХ и параметров ПТ» (лабораторная работа № 8);
- «Программа исследования работы ПТ на переменном токе» (лабораторная работа № 9);
- «Программа измерения и исследования ВАХ и параметров БТ» (лабораторная работа № 10);

- «Программа измерения и исследования статистического (технологического) разброса ВАХ и параметров БТ» (лабораторная работа № 11);
- «Программа исследования работы БТ на переменном токе» (лабораторная работа № 12).

Вызов измерительных программ осуществляется путем выбора соответствующей лабораторной работы.

С каждой лабораторной работой и ее измерительной программой связан виртуальный лабораторный стенд, лицевая панель которого открывается при запуске измерительной программы. На лицевых панелях виртуальных лабораторных стендов отображаются схемы измерения, элементы настройки, управления, цифровой и графической индикации. Через лицевую панель виртуального лабораторного стенда осуществляется интерактивное взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой при выполнении лабораторных работ.

Лицевые панели виртуальных лабораторных стендов, относящихся к лабораторным работам по измерению и исследованию ВАХ и параметров полупроводниковых приборов (работы № 1, 4, 7, 10), имеют однотипную структуру. Также однотипны структуры виртуальных лабораторных стендов лабораторных работ № 2, 5, 9, 11 по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров полупроводниковых приборов и лабораторных работ № 3, 6, 9, 12 по исследованию работы полупроводниковых приборов на переменном токе.

3.4. Виртуальные стенды для лабораторных исследований ВАХ и параметров полупроводниковых приборов

3.4.1. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров выпрямительных диодов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой по измерению и исследованию ВАХ и параметров выпрямительных диодов осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы (рис. 3.9) отображается схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

В окне «Схема измерения» представлена схема измерения ВАХ полупроводниковых диодов методом вольтметра-амперметра, соответствующая базовой схеме, представленной на рис. 2.2. Она содержит управляемый источник ЭДС E с пределами изменения ЭДС, равными ± 10 В, токоизмерительные резисторы $R_{11} = 300$ Ом, $R_{12} = 100$ кОм, виртуальный миллиамперметр, измеряющий ток диода по падению напряжения на токоизмерительном резисторе, вольтметр для измерения напряжения на диоде, ключ выбора токоизмерительного резистора, циф-

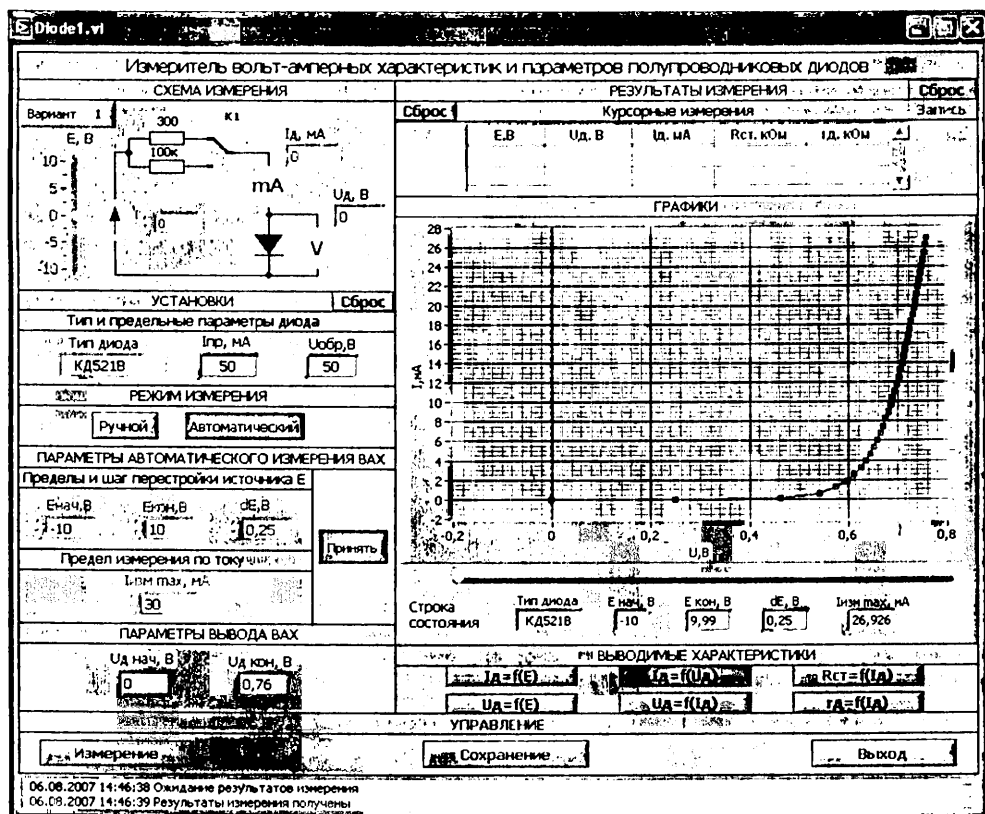


Рис. 3.9. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по измерению ВАХ и параметров выпрямительных диодов

ровые индикаторы напряжений и токов, измеряемых виртуальным вольтметром и миллиамперметром, а также шкалу и движок ручного управления ЭДС источника E , который может управляться как в ручном, так и в автоматическом режимах. В левом верхнем углу окна указывается номер выполняемого варианта.

Исходное, то есть выводимое при запуске программы, состояние схемы измерения соответствует автоматическому управлению источником E , при котором доступ к движку ручного управления ЭДС программно заблокирован. Исходно подключенным на схеме измерения является токоизмерительный резистор R_{T1} сопротивлением 300 Ом. При его отключении автоматически включенным остается токоизмерительный резистор R_{T2} сопротивлением 100 кОм.

С функциональной панели «Установки» с помощью элементов установки, индикации, клавишей и кнопок отображаются и задаются параметры настройки измерителя ВАХ:

- тип выбранного диода (германиевый – в исходной версии ГД507А) или кремниевый – в исходной версии КД521В) и его предельные параметры:

максимальный прямой ток $I_{пр}$ и максимальное обратное напряжение $U_{обр}$: для диода ГД507А $I_{пр} = 16$ мА, $U_{обр} = 20$ В; для диода КД521В $I_{пр} = 50$ мА, $U_{обр} = 50$ В.

- *режим измерения* – ручной или автоматический;
- *параметры автоматического измерения ВАХ*: начальное, конечное значение и шаг перестройки ЭДС источника E : $E_{нач} \geq -10$ В, $E_{кон} \leq 10$ В, $dE = (0,1-1,0)$ В с дискретом 0,05 В; предел измерения по току $I_{изм\ max} \leq 30$ мА при подключенном токоизмерительном резисторе $R_{т1} = 300$ Ом и $I_{изм\ max} \leq 0,1$ мА при подключенном токоизмерительном резисторе $R_{т2} = 100$ кОм;
- *параметры вывода ВАХ*: начальное и конечное значения напряжения на диоде $U_{д.нач}$, $U_{д.кон}$.

При запуске программа выводит на элементы панели «Установки» исходные параметры настройки измерителя ВАХ:

режим измерения «Автоматический»;

$E_{нач} = -10$ В, $E_{кон} = 10$ В, $dE = 0,25$ В;

$I_{изм\ max} = 30$ мА при $R_{т1} = 300$ Ом и $I_{изм\ max} = 0,1$ мА при $R_{т2} = 100$ кОм.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка правильности введенных параметров автоматического измерения в соответствии с условиями: $E_{нач} \leq E_{кон}$, $I_{изм\ max} \leq I_{пр}$. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{нач}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{кон}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{изм\ max} > I_{пр}$ » и т. д., и клавиша «Принять» при ее нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

В частности, измерение ВАХ в автоматическом режиме возможно сразу по исходным выводимым программой значениям параметров измерения (подтвержденным нажатием клавиши «Принять»).

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{д.нач}$, $U_{д.кон}$ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения.

При выборе режима измерения «Ручной» на функциональной панели «Схема измерения» становятся активными движок и элемент индикации, которыми задается и отображается значение ЭДС источника E .

Функциональная панель «Управление» содержит три командные клавиши: «Измерение», «Сохранение», «Выход». Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения в соответствии с заданными и подтвержденными (в автоматическом режиме) параметрами измерения. Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или данные цифровых индикаторов и графики ВАХ. При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального стенда и открывается титульный экран,

с которого можно, выбрав другой тип диода или другой вариант (другой диод того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения работы.

В *ручном режиме* в процессе измерения проверяется, не превышает ли ток значение, предельно допустимое для данного типа диода. Измерения выполняются только при значениях тока, меньших предельного.

В *автоматическом режиме* в процессе измерения проверяется, не превышает ли ток диода заданный *предел измерения по току* $I_{\text{изм. max}}$. В соответствии с этим током определяется фактическое конечное значение ЭДС $E_{\text{кон}}$, которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального тока происходит уже при $E = E_{\text{нач}}$, то выводится сообщение о необходимости уменьшить значение $E_{\text{нач}}$.

Панель «Результаты измерения» представлена:

- цифровыми и графическим индикаторами для каждого из режимов измерения – ручного и автоматического;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движком курсора для проведения курсорных измерений;
- панелью выбора выводимых в окно «Графики» характеристик.

В *автоматическом режиме* на цифровой индикатор выводятся числовые результаты курсорных измерений в выбираемых курсором точках ВАХ, отображаемой в окне «Графики». Они включают значения тока и напряжения диода I_d , U_d , значение ЭДС E , при которых они измерены, а также параметров диода, вычисляемых по ВАХ: статического сопротивления $R_{\text{д.ст}} = U_d/I_d$ и динамического (дифференциального) сопротивления $r_d = \Delta U_d/\Delta I_d$.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись – фиксация показаний в памяти индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

В *ручном режиме* числовые значения результатов измерения отображаются на цифровых индикаторах схемы измерения и выводятся на цифровой индикатор «Измерения ручные ВАХ». Путем нажатия кнопки «Запись» измеренные значения токов и напряжений фиксируются (сохраняются) в памяти цифрового индикатора и в окне графического индикатора ВАХ.

На панели «Выводимые характеристики» размещены кнопки, управляющие выбором выводимой характеристики в *автоматическом режиме измерения*. Это характеристики (и кнопки) $I_d = f(E)$, $I_d = f(U_d)$, $I_d = f(U_a)$ (ВАХ), $U_d = f(I_d)$, $R_{\text{ст}} = f(I_d)$, $r_d = f(U_d)$. В *исходном состоянии* кнопки этой панели недоступны для пользователя (не активны). После проведения первого (и последующих) измерений автоматически включается кнопка выбора характеристики $U_d = f(E)$ и в окно «Графики» выводится зависимость измеренных напряжений диода от задаваемых значений ЭДС E : $U_d = f(E)$. По ней определяются предельные значения напряжения диода $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$, являющиеся параметрами вывода ВАХ. Эти значения автоматически отображаются на индикаторах панели «Параметры вывода ВАХ». При этом индикаторы становятся доступными для ввода других необходимых значений параметров вывода, заключенных в найденных пределах и отвечающих условию $U_{\text{д.нач}} < U_{\text{д.кон}}$. Выбирая их, пользователь может отображать в окне «Графики» отдельные интересующие

его участки характеристики. Вводимые значения параметров вывода автоматически округляются к ближайшим измеренным значениям напряжения диода U_d . Изменение параметров вывода нужно подтвердить нажатием клавиши клавиатуры *Enter* или щелчком левой кнопки мышки на лицевой панели стенда.

Вывод графиков измеренных зависимостей осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом также выбирать интересующие его участки исследуемой характеристики. Для возврата к исходному представлению графика нужно выключить и снова включить кнопку выбора выводимой характеристики.

Вдоль горизонтальной оси графического индикатора находится движок для проведения курсорных измерений по отображаемой характеристике.

В окно «Графики» выводится также строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при формировании отчета. *Строка состояния* содержит значения: тип диода, $E_{нач}$, $E_{кон}$, dE , $I_{изм\ max}$. Номер варианта, также относящийся к строке состояния, отображается на панели «Схема измерения».

Кнопкой «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов.

Завершается работа с виртуальным лабораторным стендом последовательным нажатием клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране лабораторной работы.

3.4.2. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров стабилитронов

Взаимодействие пользователя с клиентской программой по измерению и исследованию вольт-амперных характеристик ВАХ и параметров стабилитронов осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы (рис. 3.10) отображается схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

Схема измерения стенда содержит управляемый источник ЭДС E , изменяемой в пределах ± 10 В, балластный резистор R_b сопротивлением 200 Ом, исследуемый стабилитрон, отдельные виртуальные миллиамперметры для измерения токов стабилитрона и нагрузки, виртуальный вольтметр, измеряющий напряжение стабилитрона, ключи и переключаемые ими нагрузочные резисторы сопротивлением 200, 500 и 1000 Ом, цифровые индикаторы измеряемых токов и напряжений, шкалу и движок ручного управления ЭДС источника E , которая может также управляться автоматически. В правом верхнем углу окна выводится номер выполняемого варианта.

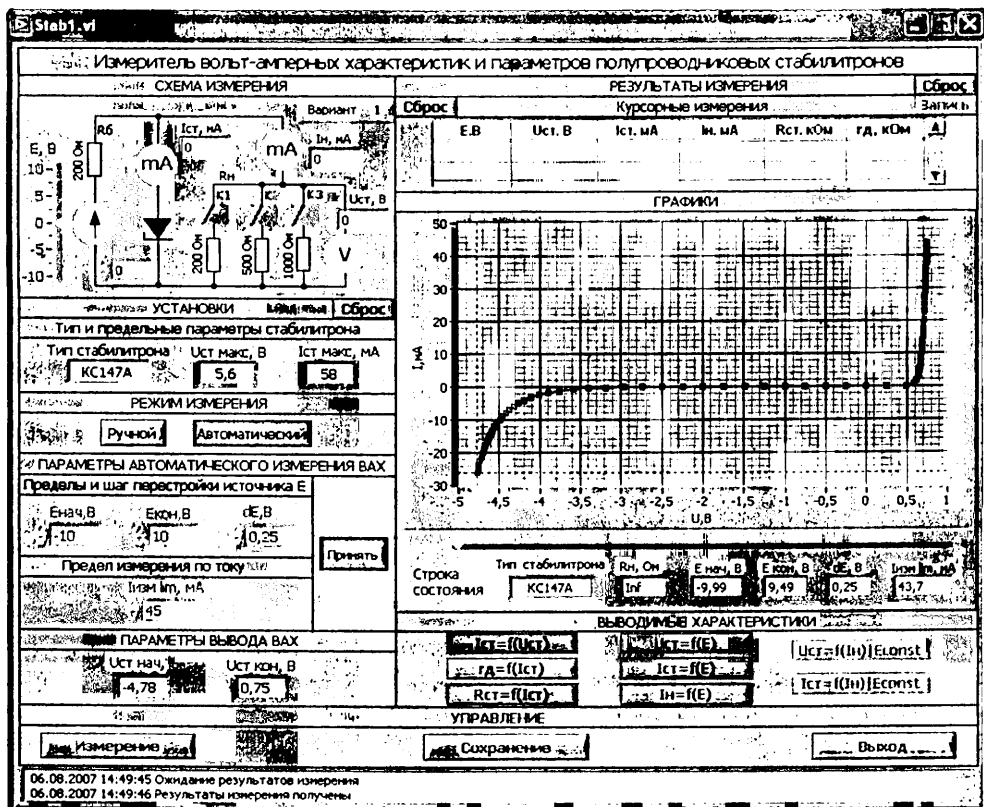


Рис. 3.10. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по измерению характеристик и параметров стабилизатора

В исходном состоянии схемы измерения программно заблокирован доступ к движку ручного управления источником E , что допускает автоматическое управление им, и отключены нагрузочные резисторы R_H , выбираемые ключами $K1-K4$, находящимися в выключенном положении.

С помощью элементов функциональной панели «Установки» задаются и индицируются параметры настройки измерителя ВАХ:

- тип выбранного стабилизатора (KS147A или KS133A) и его предельные параметры: максимальное напряжение стабилизации $U_{ст max}$ и максимальный ток стабилизации $I_{ст max}$; для стабилизатора KS147A $U_{ст max} = 5,2 B$, $I_{ст max} = 58 mA$, для стабилизатора KS133A $U_{ст max} = 3,65 B$, $I_{ст max} = 81 mA$.
- режим измерения – ручной или автоматический;
- параметры автоматического измерения ВАХ: начальное, конечное значения и шаг перестройки ЭДС источника E : $E_{нач} \geq -10 B$, $E_{кон} \leq 10 B$, $dE = (0,1-1,0) B$ с дискретом $0,05 B$; предел измерения по току $I_{изм max} \leq 45 mA$;
- параметры вывода ВАХ: начальное и конечное значения напряжения на стабилизаторе $U_{ст нач}$, $U_{ст кон}$.

При запуске программа выводит на элементы панели «Установки» исходные параметры настройки измерителя ВАХ:

режим измерения «Автоматический»;

$E_{\text{нач}} = -10 \text{ В}$, $E_{\text{кон}} = 10 \text{ В}$, $dE = 0,25 \text{ В}$, $I_{\text{изм max}} = 45 \text{ мА}$.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение в автоматическом режиме невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка правильности введенных параметров автоматического измерения в соответствии с условиями: $E_{\text{нач}} \leq E_{\text{кон}}$, $I_{\text{изм max}} \leq I_{\text{ст max}}$. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{\text{нач}}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{\text{кон}}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{\text{изм max}} > I_{\text{ст max}}$ » и т. д., и клавиша «Принять» при нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

В частности, измерение ВАХ в автоматическом режиме возможно сразу по исходным выводимым программой значениям параметров измерения (подтвержденным нажатием клавиши «Принять»).

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения.

При выборе режима измерения «Ручной» становятся активными движок и элемент индикации, которыми задается и отображается значение ЭДС источника E на схеме измерения. Активизируется также и командная клавиша «Измерение» на панели «Управление».

Панель «Управление» содержит 3 командные клавиши: «Измерение», «Сохранение», «Выход». Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения в ручном режиме и при подтвержденных параметрах измерения (нажатая клавиша «Принять») – в автоматическом. Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или данные цифровых индикаторов и графики ВАХ. При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой вариант (другой стабилизатор) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения лабораторной работы.

В *ручном режиме* в процессе измерения проверяется, не превышает ли ток значение, предельно допустимое для данного типа стабилизатора. Измерения выполняются только при значениях тока, меньших предельного.

В *автоматическом режиме* в процессе измерения проверяется, не превышает ли ток стабилизатора заданный *предел измерения по току* $I_{\text{изм max}}$. В соответствии с этим пределом определяется фактическое начальное или конечное значение ЭДС $E_{\text{нач}}$, $E_{\text{кон}}$, которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превыше-

ние максимального тока происходит уже при $E = E_{\text{нач}}$, то выводится сообщение о необходимости уменьшить значение $E_{\text{нач}}$.

Панель «Результаты измерения» представлена:

- графическим индикатором (окно «Графики») и цифровыми индикаторами ручных и автоматических измерений;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движком курсора для проведения курсорных измерений;
- панелью выбора выводимых в окна графики характеристик.

В *автоматическом режиме* на цифровом индикаторе отображаются числовые результаты курсорных измерений в выбранной с помощью курсоров точке ВАХ, отображаемой в окне «Графики». Они включают измеренные значения ЭДС E , тока и напряжения стабилитрона $I_{\text{ст}}$, $U_{\text{ст}}$, тока нагрузки $I_{\text{н}}$, статического $R_{\text{ст}} = U_{\text{ст}}/I_{\text{д}}$ и дифференциального $r_{\text{д}} = \Delta U_{\text{д}}/\Delta I_{\text{д}}$ сопротивлений стабилитрона.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись (фиксация) результатов измерения в память индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

В *ручном режиме* числовые значения результатов измерения E , $I_{\text{ст}}$, $U_{\text{ст}}$, $I_{\text{н}}$ отображаются на цифровых индикаторах схемы измерения и цифровом индикаторе ручных измерений. Путем нажатия кнопки «Запись» измеренные значения токов и напряжений фиксируются (сохраняются) в памяти цифрового индикатора и в окне графического индикатора ВАХ. Не зафиксированные результаты измерения при повторном измерении замещаются новыми значениями (в том числе и на графическом индикаторе).

На панели «Выводимые характеристики» размещены кнопки, управляющие выбором выводимой характеристики.

В *автоматическом режиме измерения* доступными являются кнопки вывода характеристик $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ (ВАХ), $r_{\text{д}} = f(I_{\text{ст}})$, $R_{\text{ст}} = f(I_{\text{ст}})$, $U_{\text{ст}} = f(E)$, $I_{\text{ст}} = f(E)$, $I_{\text{н}} = f(E)$. В исходном состоянии кнопки этой панели недоступны для пользователя (не активны). После проведения первого (и последующих) измерений автоматически включается кнопка выбора характеристики $U_{\text{ст}} = f(E)$ и в окно «Графики» выводится зависимость $U_{\text{д}} = f(E)$. По ней определяются предельные значения напряжения стабилитрона $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$, являющиеся параметрами вывода ВАХ. Эти значения автоматически отображаются на индикаторах панели «Параметры вывода ВАХ». При этом индикаторы становятся доступными для ввода других необходимых значений параметров вывода, заключенных в найденных пределах и отвечающих условию $U_{\text{ст.нач}} < U_{\text{ст.кон}}$. Выбирая их, пользователь может вывести для исследования отдельные интересующие его участки характеристик. Вводимые значения параметров вывода автоматически округляются к ближайшим измеренным значениям напряжения стабилитрона $U_{\text{ст}}$. Изменение параметров вывода нужно подтвердить нажатием клавиши клавиатуры *Enter* или щелчком левой кнопки мышки на лицевой панели стенда.

В *ручном режиме измерения* доступными являются кнопки вывода характеристик $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ (ВАХ), $U_{\text{ст}} = f(E)$, $U_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})|E = \text{const}$, $I_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})|E = \text{const}$. В исходном состоянии активной является кнопка $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$.

Вывод графиков измеренных зависимостей осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может

с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом также выбирать отображаемые на экране участки выводимой характеристики. Для возврата к исходному представлению графика нужно выключить и снова включить кнопку выбора выводимой характеристики.

Вдоль горизонтальной оси графического индикатора находится движок для проведения курсорных измерений по отображаемой в окне характеристике, доступный только в автоматическом режиме измерения.

При автоматических измерениях в окно «Графики» выводится также строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при формировании отчета. Строка состояния содержит значения $R_{н}$, $E_{нач}$, $E_{кон}$, dE , $I_{изм\ max}$. Бесконечному значению сопротивления нагрузки в строке состояния соответствует обозначение Inf . Номер варианта (номер стабилитрона), также относящийся к строке состояния, отображается на панели «Схема измерения».

Кнопкой «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов.

Завершается работа с виртуальным лабораторным стендом последовательным нажатием клавиш «Выход» и «Завершение работы» лицевой панели и титульного экрана.

3.4.3. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров полевых транзисторов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы (рис. 3.11) отображаются схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

В окне «Схема измерения» лицевой панели представлены:

- исследуемый ПТ, включенный по схеме с общим истоком;
- резистор R_c сопротивлением 10 Ом, выполняющий функции токоизмерительного при измерении статических ВАХ;
- резистор R_c сопротивлением 300 Ом, выполняющий функции нагрузки при измерении динамических ВАХ;
- резистор утечки R_u сопротивлением 1 МОм в цепи затвора;
- виртуальные измерительные приборы с цифровой индикацией – вольтметры, измеряющие напряжения $U_{зи}$, $U_{си}$, и миллиамперметр, измеряющий ток стока I_c по падению напряжения на резисторе R_c ;
- управляемые автоматически или с помощью движков источники ЭДС питания затвора и стока $E_{г}$, $E_{с}$ с пределами изменения ЭДС, равными ± 10 В.

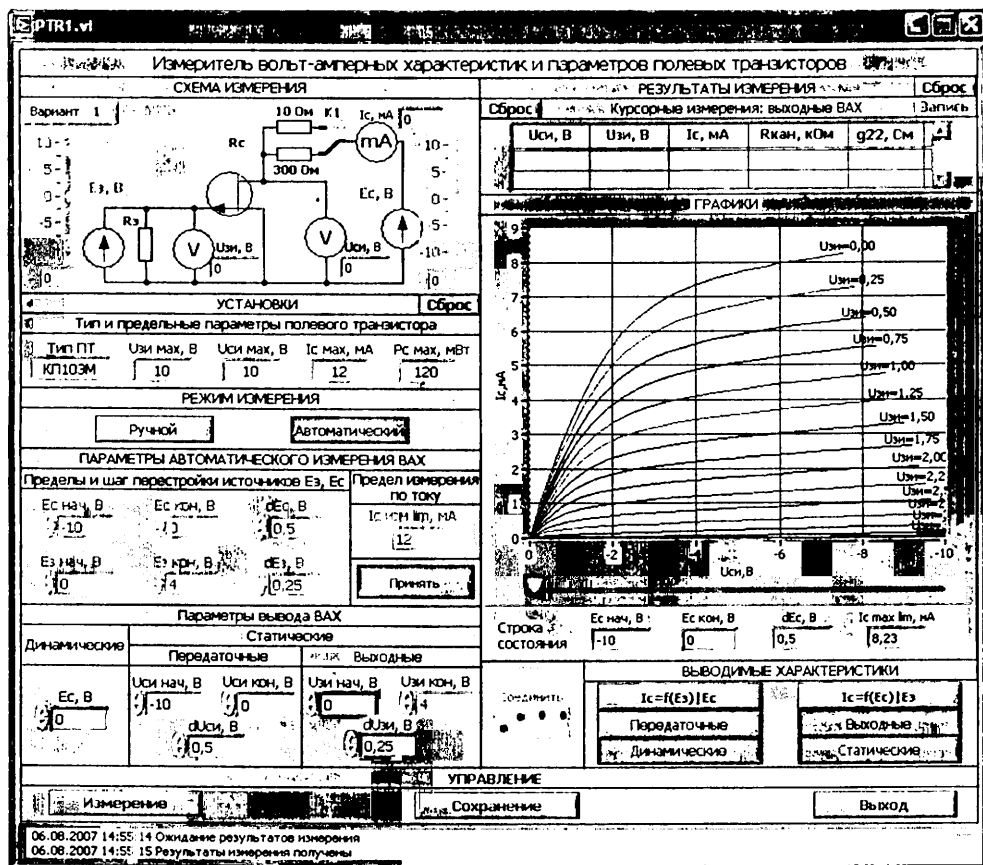


Рис. 3.11. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по измерению вольт-амперных характеристик ВАХ и параметров полевых транзисторов ПТ

В левом углу окна указывается номер выполняемого варианта.

Исходное изображение схемы измерения соответствует выбранному на титульном экране типу ПТ и сопротивлению токоизмерительного резистора $R_c = 10$ Ом. Ручное управление движками источников ЭДС заблокировано.

В окне «Установки» интерактивно задаются и (или) индицируются параметры настройки измерителя:

- тип выбранного ПТ (в исходной версии КП305Д – ПТ с изолированным затвором и n -каналом или КП103М – ПТ с управляющим p - n -переходом и p -каналом) и его предельные параметры: предельное напряжение затвор-исток $U_{зи\max}$, предельное напряжение сток-исток $U_{си\max}$, максимальный ток стока $I_{с\max}$ и максимальная рассеиваемая мощность $P_{с\max}$. Для ПТ КП305Д: $U_{зи\max} = 15$ В, $U_{си\max} = 15$ В, $I_{с\max} = 15$ mA, $P_{с\max} = 150$ мВт. Для ПТ КП103М: $U_{зи\max} = 10$ В, $U_{си\max} = 10$ В, $I_{с\max} = 12$ mA, $P_{с\max} = 120$ мВт;

- *режим измерения* – ручной, автоматический;
- *параметры автоматического измерения ВАХ*:
 - начальные и конечные значения ЭДС затвора и стока $E_{з.нач}$, $E_{з.кон}$, $E_{с.нач}$, $E_{с.кон}$, задаваемые в пределах ± 10 В и находящиеся в соотношении $E_{нач} \leq E_{кон}$;
 - шаг перестройки ЭДС затвора dE_z , кратный 0,1 В, шаг перестройки ЭДС стока dE_c , кратный 0,5 В;
 - предел измерения тока стока $I_{с.изм\ max} \leq 30$ мА;
- *параметры вывода ВАХ*:
 - для динамических ВАХ – ЭДС источника $E_{с.выв}$;
 - для статических передаточных – начальное, конечное значение и шаг по напряжению сток–исток $U_{си.нач}$, $U_{си.кон}$, $dU_{си}$;
 - для статических выходных – начальное, конечное значение и шаг по напряжению затвор–исток $U_{зи.нач}$, $U_{зи.кон}$, $dU_{зи}$.

Исходным при запуске программы является режим измерения «Автоматический». Ему соответствуют исходные значения параметров автоматического измерения ВАХ:

- для ПТ типа КП305Д: $E_{з.нач} = -2$ В, $E_{з.кон} = 2$ В, $dE_z = 0,25$ В, $E_{с.нач} = 0$ В, $E_{с.кон} = 10$ В; $dE_c = 0,5$ В; предел измерения по току стока $I_{с.изм\ max} = 10$ мА;
- для ПТ типа КП103М: $E_{з.нач} = 0$ В, $E_{з.кон} = 10$ В, $dE_z = 0,25$ В, $E_{с.нач} = -10$ В, $E_{с.кон} = 0$ В; $dE_c = 0,5$ В; предел измерения по току стока $I_{с.изм\ max} = 10$ мА;
- окно «Параметры вывода ВАХ» – заблокировано.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка введенных параметров автоматического измерения – правильности полярностей ЭДС E_z , E_c , непревышение ими предельных значений $U_{зи.пред}$, $U_{си.пред}$, выполнение соотношений $E_{нач} \leq E_{кон}$, $I_{с.изм\ max} \leq I_{с\ max}$, а также непревышение максимального числа одновременно измеряемых выходных статических характеристик. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{з.нач}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{с.кон}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{с.изм\ max} > I_{с\ max}$ » и т. д., и клавиша «Принять» при ее нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

В частности, пользователь может сразу, не изменяя выводимых программой начальных параметров (но подтвердив их нажатием клавиши «Принять»), произвести автоматическое измерение ВАХ нажатием клавиши «Измерение».

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения.

При выборе режима измерения «Ручной» на функциональной панели «Схема измерения» становятся активными движки и элементы индикации, которыми за-

даются и отображаются значения ЭДС источников E_a , E_c . Программа автоматически проверяет заданные значения E_a , E_c на соответствие знаков (полярностей) и непревышение предельных значений для исследуемого ПТ и в случае недопустимости их сообщает об этом мигающим красным цветом на изображении движка и индикатора неправильно заданного параметра. Одновременно блокируется клавиша «Измерение», что делает невозможным проведение измерения. Клавиша становится доступной для проведения измерения только при допустимых значениях задаваемых ЭДС E_a , E_c .

В *ручном режиме* в процессе измерения автоматически проверяется, не превышает ли ток стока значение, предельно допустимое для данного типа ПТ. Измерения выполняются только при значениях тока стока, меньших предельного.

Автоматическое измерение ВАХ осуществляется путем изменения ЭДС источников E_a , E_c в направлении, соответствующем возрастанию тока стока. При этом в зависимости от исследуемого транзистора ЭДС могут изменяться как от заданных начальных значений к конечным (для ПТ с изолированным затвором и n -каналом), так и от заданных конечных значений к начальным (для ПТ с управляющим p - n -переходом и p -каналом). В режиме автоматического измерения ВАХ проверяется, не превышает ли ток стока транзистора заданный предел измерения по току $I_{c,изм\ lim}$. В соответствии с этим током определяется фактическое начальное или конечное значение ЭДС источника цепи затвора E_a при заданном максимальном по модулю значении ЭДС источника E_c , которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального измеряемого тока происходит уже при исходном значении ЭДС источника E_a , с которого начинается измерение ВАХ, то выводится сообщение о необходимости изменить это значение E_a (которое может быть как начальным, так и конечным в зависимости от типа транзистора).

Панель «*Результаты измерения*» представлена:

- цифровым и графическим индикаторами для каждого из режимов измерения – ручного и автоматического;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движками курсоров для проведения курсорных измерений;
- панелью выбора выводимых в окно «Графики» характеристик.

В *автоматическом режиме* на цифровой индикатор выводятся числовые результаты курсорных измерений в выбираемых с помощью курсоров точках статической ВАХ, отображаемой в окне «Графики». При выборе передаточной ВАХ они включают значения тока стока I_c , напряжения затвор–исток $U_{зи}$, напряжения сток–исток $U_{си}$ и крутизны транзистора $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$. При выборе выходной ВАХ на цифровом индикаторе отображаются числовые результаты курсорных измерений тока стока I_c , напряжений $U_{зи}$, $U_{си}$, сопротивления канала $R_k = U_{си} / I_c$ и выходной проводимости $g_{22} = \Delta I_c / \Delta U_{си}$.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись – фиксация показаний в памяти индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

В *ручном режиме* измерения числовые значения результатов измерения I_c , $U_{зи}$, $U_{си}$, E_a , E_c выводятся как на индикаторы схемы измерения, так и на цифровые ин-

дикаторы «Измерения ручные: передаточная ВАХ» или «Измерения ручные: выходная ВАХ» в соответствии с выбранной измеряемой и выводимой ВАХ. По нажатию кнопки «Запись» измеренные значения E_3 , E_c , I_c , $U_{3н}$, $U_{сн}$ фиксируются (сохраняются) в памяти цифрового и в окне графического индикаторов ВАХ.

С помощью кнопки «Сброс» производится очистка цифровых индикаторов ручных и курсорных измерений.

В *исходном состоянии* программа выводит на лицевую панель цифровые индикаторы курсорных измерений для автоматического режима измерения.

На панели «Выводимые характеристики» размещены кнопки, управляющие выбором выводимой характеристики в ручном и автоматическом режимах измерения. Это кнопки (и характеристики) « $I_c = f(E_3)|E_c = \text{const}$ », « $I_c = f(E_c)|E_3 = \text{const}$ », «Передаточные», «Выходные», «Динамические», «Статические».

В *ручном режиме* активными являются кнопки измерения статических и динамических передаточных и выходных ВАХ.

В *автоматическом режиме в исходном состоянии* кнопки панели «Выводимые характеристики» недоступны для пользователя (не активны). После проведения первого (и последующих) измерений автоматически включается кнопка выбора характеристики « $I_c = f(E_3)|E_c = \text{const}$ » и в окно «Графики» выводится семейство измеренных зависимостей тока стока I_c от ЭДС затвора E_3 при постоянных значениях ЭДС стока E_c . Они представляют семейство динамических передаточных характеристик ПТ при сопротивлении нагрузки в цепи стока $R_c = 300$ Ом. С помощью кнопки « $I_c = f(E_c)|E_3 = \text{const}$ » можно вывести семейство обращенных зависимостей $I_c = f(E_c)|E_3 = \text{const}$, показывающих зависимость тока стока от ЭДС стока E_c при постоянных значениях ЭДС затвора E_3 . Эти зависимости непосредственно являются функциями заданных параметров автоматического измерения и показывают априорно неизвестные пределы изменения тока стока и реальные значения ЭДС $E_{3,нач}$, $E_{3,кон}$, выводимые в строку состояния измерителя ВАХ.

По характеристикам $I_c = f(E_3)|E_c = \text{const}$ программой определяются предельные значения параметров вывода статических выходных ВАХ $U_{3н,нач}$, $U_{3н,кон}$. В качестве шага по напряжению $dU_{3н}$ принимается значение шага изменения ЭДС dE_3 . Эти параметры автоматически выводятся на индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ».

Исходные и предельные значения параметров вывода передаточных характеристик $U_{сн,нач}$, $U_{сн,кон}$, $dU_{сн}$ определяются значениями параметров автоматического измерения $E_{с,нач}$, $E_{с,кон}$, dE_c и также автоматически выводятся на индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ».

При этом индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ» становятся доступными для ввода других необходимых значений параметров вывода передаточных и выходных ВАХ, заключенных в найденных пределах и с шагом, равным или кратным dE_3 , dE_c . Выбирая их, пользователь может ограничить число выводимых характеристик и отобразить в окне «Графики» интересующие их области. Вводимые значения параметров вывода $U_{3н}$, $U_{сн}$ автоматически округляются к их ближайшим дискретным значениям. Изменение параметров вывода нужно подтвердить нажатием клавиши клавиатуры *Enter*, или щелчком левой кнопки мыши на

лицевой панели стенда, или повторным выключением-включением кнопки выбора выводимых характеристик. При изменении параметров вывода программа выполняет проверку правильности заданных параметров и выдает сообщение об ошибке, если неправильно установлена их полярность или начальное значение напряжения превышает конечное.

Вывод графиков измеренных характеристик осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом также ограничить число выводимых характеристик и отобразить на экране интересующие их области. Для возврата к исходному представлению графика нужно выключить и снова включить кнопку выбора выводимой характеристики.

После проведения автоматического измерения становятся активными (доступными) все кнопки выбора выводимых графиков ВАХ (окно «Выводимые ВАХ»). При нажатии кнопок вывода «Передаточные», «Статические» на экран выводится семейство статических передаточных ВАХ $I_c = f(U_3)|U_c$, при нажатии кнопок «Выходные», «Статические» выводится семейство статических выходных ВАХ $I_c = f(U_c)|U_3$, при нажатии кнопок «Передаточные», «Динамические» выводится динамическая передаточная ВАХ $I_c = f(U_3)|E_{c.выв}$ для сопротивления нагрузки в цепи стока $R_c = 300$ Ом, при нажатии кнопок «Выходные», «Динамические» выводится динамическая выходная ВАХ $I_c = f(U_c)|E_{c.выв}$ для сопротивления нагрузки в цепи стока $R_c = 300$ Ом, где $E_{c.выв}$ соответствует параметру вывода динамических ВАХ. При совместном выборе кнопок вывода «Статические», «Динамические» будут одновременно выводиться графики статических и динамических ВАХ в соответствии с выбранной кнопкой вывода «Передаточные», «Выходные».

Если снова включить одну из кнопок вывода $I_c = f(E_3)|E_c = \text{const}$ или $I_c = f(E_c)|E_3 = \text{const}$, то на экран будут выведены исходные результаты измерения тока стока как функции от ЭДС E_c и E_3 .

При переходе из автоматического режима измерения в ручной результаты автоматического измерения временно сохраняются в буфере обмена и могут быть автоматически восстановлены при возврате к автоматическому режиму путем нажатия кнопки выбора выводимой ВАХ.

Вдоль осей графиков выводимых ВАХ на графическом индикаторе находятся движки курсоров для проведения курсорных измерений по ВАХ, измеренным в автоматическом режиме. При выводе зависимостей $I_c = f(E_3)|E_c = \text{const}$, $I_c = f(E_c)|E_3 = \text{const}$ и при ручных измерениях управление движками курсоров заблокировано.

В окно «Графики» выводится строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при формировании отчета. Строка состояния содержит фактические значения параметров измерения $E_{3.нач}$, $E_{3.кон}$, dE_3 , $E_{c.нач}$, $E_{c.кон}$, dE_c , $I_{c.изм}$ max.

При измерении ВАХ в *ручном режиме* измеряемая характеристика определяется выбором кнопок вывода «Передаточные», «Выходные». Кнопки «Динамические», «Статические» при этом не активны. Вид измеряемой характеристики – динамическая или статическая при этом определяется стратегией (траекторией) измерения.

При *ручном измерении* выходных статических ВАХ (выбрана кнопка «Выходные») задается фиксированное значение $E_3 = U_{3н} = \text{const}$ и различные значения E_c , при которых производятся измерения. Результаты измерения I_c , U_c выводятся на цифровой индикатор и в окно «Графики» в виде выборок или точек. Если результат измерения приемлем, он нажатием кнопки «Запись» фиксируется в окне «Графики» и в памяти цифрового индикатора. После завершения снятия одной характеристики выборки или точки необходимо соединить линией с помощью специальной кнопки соединения внизу окна «Графики». Если соединение измеренных точек ВАХ проведено, то последующие измерения будут снова выводиться на графическом индикаторе в виде точек (выборок) и будут условно соответствовать уже новой характеристике. Вновь полученные точки также соединяются и т. д.

Одновременно (или отдельно) с измерением статических выходных ВАХ в ручном режиме могут быть измерены динамические выходные ВАХ при фиксированных значениях $E_c = \text{const}$ и изменяемых значениях $E_3 = U_{3н} = \text{var}$. Получающиеся результаты измерения I_c , U_c при различных значениях E_3 фиксируются на цифровом индикаторе и в виде точек – в окне «Графики». По завершении измерений точки ВАХ соединяются линией с помощью кнопки соединения.

При выборе кнопок вывода «Передаточные», «Статические» проводится *ручное измерение* статических передаточных ВАХ. Для этого задается значение $E_3 = U_{3н}$, затем выставляется некоторое исходное значение $E_{c,исх}$, равное заданному значению $U_{сн,зад}$ для измеряемой передаточной ВАХ. Проводится пробное измерение, определяющее фактическое значение напряжения сток–исток $U_{сн,факт}$. Этот пробный результат не фиксируется кнопкой «Запись» на цифровом индикаторе и в окне «Графики». Затем напряжение E_c увеличивается на величину, равную разности $U_{сн,зад} - U_{сн,факт}$: $E_c = E_{c,исх} + (U_{сн,зад} - U_{сн,факт})$. Снова проводится измерение и уточняется значение $U_{сн}$. Если оно достаточно близко к $U_{сн,зад}$, то этот результат фиксируется на цифровом и графическом индикаторах. Если нет, то делается еще одна итерация и т. д. Затем задается другое значение $U_{3н}$, и процесс измерения повторяется, пока не будет снята одна передаточная ВАХ, соответствующая $U_{сн,зад} = \text{const}$. Измеренные точки этой ВАХ в окне «Графики» соединяются нажатием кнопки соединения.

При измерении статических передаточных ВАХ можно воспользоваться результатами измерения статических выходных ВАХ, по которым можно из графиков или с цифрового индикатора сразу определить значения ЭДС E_c , соответствующие заданным значениям $U_{сн}$ и $U_{3н}$.

Одновременно (или отдельно) с измерением статических передаточных ВАХ в ручном режиме могут быть измерены динамические передаточные ВАХ при фиксированных значениях $E_c = \text{const}$ и изменяемых значениях $E_3 = U_{3н} = \text{var}$. Из-

меренные значения I_c , U_c фиксируются на цифровом индикаторе и в виде точек – в окне «Графики». По завершении измерений точки ВАХ соединяются линией с помощью кнопки соединения.

При переходе от ручного измерения выходных ВАХ к ручному измерению передаточных ВАХ и наоборот (путем выбора соответствующей кнопки «Передаточные», «Выходные») результаты предыдущих измерений временно сохраняются в буфере обмена и автоматически восстанавливаются на цифровом и графическом индикаторах.

Результаты ручного измерения, сохраняемые в буфере обмена, могут быть восстановлены и при переходе из режима ручного измерения в автоматический режим и обратно.

Кнопками «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов. При этом возврат к выводу и отображению ранее измеренных характеристик становится невозможен.

Панель «Управление» кроме клавиши «Измерение» содержит командные клавиши «Сохранение» и «Выход».

Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или данные цифровых индикаторов и графики ВАХ.

При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального лабораторного стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой тип ПТ или другой вариант (другой ПТ того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу, либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения работы.

3.4.4. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию ВАХ и параметров биполярных транзисторов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы (рис. 3.12) отображаются схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

В окне «Схема измерения» лицевой панели представлены:

- исследуемый БТ, включенный по схеме с общим эмиттером (ОЭ);
- резистор R_k сопротивлением 10 Ом, выполняющий функции токоизмерительного при измерении статических ВАХ;
- резистор R_k сопротивлением 300 Ом, выполняющий функции нагрузки при измерении динамических ВАХ;
- токоизмерительный резистор R_6 сопротивлением 10 кОм в цепи базы;
- виртуальные измерительные приборы с цифровой индикацией – вольтметры, измеряющие напряжения $U_{бэ}$, $U_{кэ}$, и миллиамперметры, измеряющие

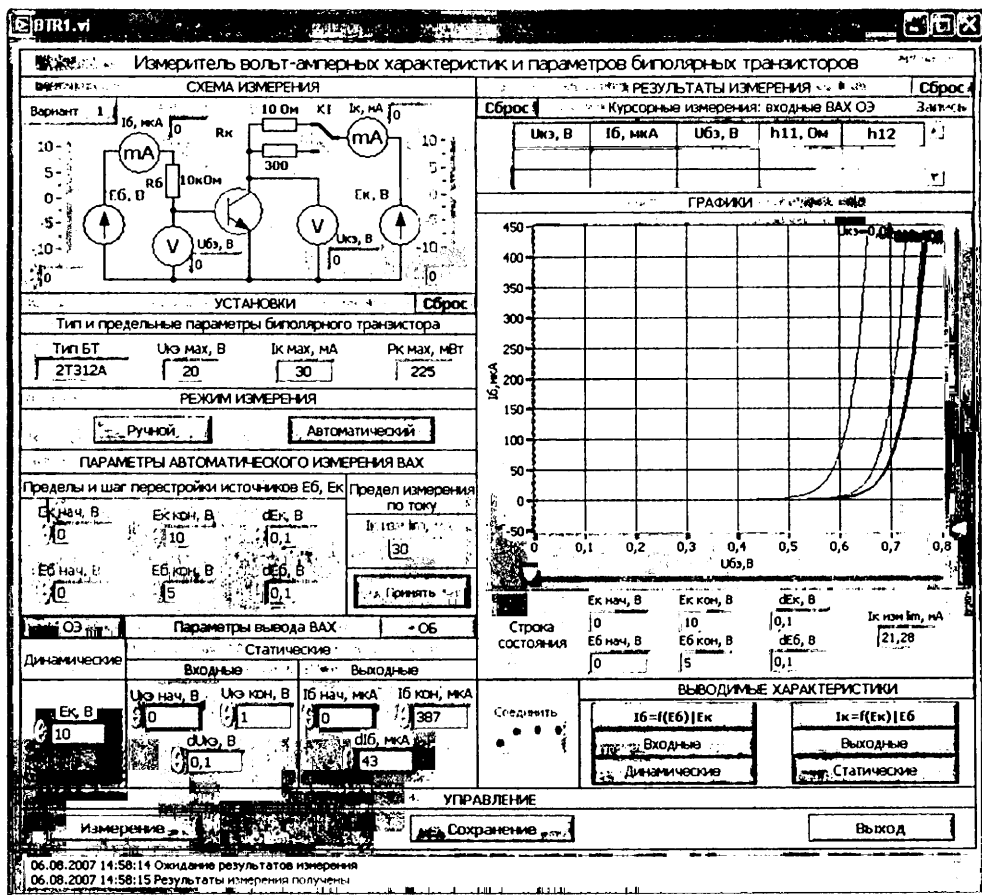


Рис. 3.12. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по измерению ВАХ и параметров БТ

токи коллектора I_k и базы I_6 по падению напряжения на токоизмерительных резисторах R_k и R_6 ;

- управляемые автоматически или с помощью движков источники ЭДС цепей питания базы и коллектора E_6 , E_k с пределами изменения ЭДС, равными ± 10 В.

В левом углу окна указывается номер выполняемого варианта.

Исходное изображение схемы измерения соответствует выбранному на титульном экране типу БТ. Ручное управление движками источников ЭДС заблокировано.

В окне «Установки» интерактивно задаются и (или) индицируются параметры настройки измерителя:

- *тип выбранного БТ* (в исходной версии ГТ308В – БТ $p-n-p$ -типа или КТ312А – БТ $n-p-n$ -типа) и его *предельные параметры*: предельное (макс-

симальное по модулю) напряжение коллектор–эмиттер $U_{кз\max}$, максимальный ток коллектора $I_{к\max}$ и максимальная рассеиваемая мощность $P_{к\max}$; для БТ типа ГТ308В: $U_{кз\max} = 12$ В, $I_{к\max} = 50$ мА, $P_{к\max} = 150$ мВт; для БТ типа КТ312А: $U_{кз\max} = 20$ В, $I_{к\max} = 30$ мА, $P_{к\max} = 225$ мВт;

- *режим измерения* – ручной (только для схемы с общим эмиттером), автоматический;
- *параметры автоматического измерения ВАХ*:
 - начальные и конечные значения ЭДС источников питания цепей базы и коллектора $E_{б,нач}$, $E_{б,кон}$, $E_{к,нач}$, $E_{к,кон}$, задаваемые в пределах ± 10 В и находящиеся в соотношении $E_{нач} \leq E_{кон}$;
 - шаг перестройки ЭДС источника питания (смещения) цепи базы $dE_б$ и шаг перестройки ЭДС источника питания цепи коллектора $dE_к$, кратные 0,1 В;
 - предел измерения тока коллектора $I_{к,изм\lim} \leq 30$ мА;
 - *кнопки выбора* схемы включения БТ, для которой выводятся ВАХ, – с общим эмиттером (ОЭ) или с общей базой (ОБ);
- *параметры вывода ВАХ*:
 - для динамических ВАХ в схеме с ОЭ – значение ЭДС источника $E_к$;
 - для статических входных ВАХ в схеме с ОЭ – начальное, конечное значения и шаг по напряжению коллектор–эмиттер $U_{кз,нач}$, $U_{кз,кон}$, $dU_{кз}$;
 - для статических выходных ВАХ в схеме с ОЭ – начальное, конечное значения и шаг по току базы $I_{б,нач}$, $I_{б,кон}$, $dI_б$;
 - для статических входных ВАХ в схеме с ОБ – начальное, конечное значения и шаг по напряжению коллектор–база $U_{кб,нач}$, $U_{кб,кон}$, $dU_{кб}$;
 - для статических выходных ВАХ в схеме с ОБ – начальное, конечное значения и шаг по току эмиттера: $I_{э,нач}$, $I_{э,кон}$, $dI_э$.

Исходным при запуске программы является режим измерения «Автоматический», схема с ОЭ. Ему соответствуют исходные значения параметров автоматического измерения ВАХ:

- для БТ типа ГТ308В: $E_{б,нач} = -4$ В, $E_{б,кон} = 0$, $dE_б = 0,1$ В, $E_{к,нач} = -10$ В, $E_{к,кон} = 0$; $dE_к = 0,1$ В; предел измерения по току коллектора $I_{к,изм\lim} = 30$ мА;
- для БТ типа КТ312А: $E_{б,нач} = 0$ В, $E_{б,кон} = 5$ В, $dE_б = 0,1$ В, $E_{к,нач} = 0$, $E_{к,кон} = 10$ В; $dE_к = 0,1$ В; предел измерения по току коллектора $I_{к,изм\lim} = 30$ мА.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка введенных параметров автоматического измерения – правильности полярностей ЭДС $E_б$, $E_к$, непревышение предельного значения $U_{кз,пред}$, выполнение соотношений $E_{нач} \leq E_{кон}$, $I_{к,изм\max} \leq I_{к\max}$, а также непревышение максимального числа одновременно измеряемых выходных статических характеристик. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{к,нач}$ », или «Введено недопустимое зна-

чение $E_{\text{к.кон}}$, или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{\text{к.изм max}} > I_{\text{к max}}$ » и т. д., и клавиша «Принять» при ее нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

В частности, пользователь может сразу, не изменяя выводимых программой начальных параметров (но подтвердив их нажатием клавиши «Принять»), произвести автоматическое измерение ВАХ, используя клавишу «Измерение».

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения так же, как и кнопка выбора схемы включения транзистора «ОБ» (общая база).

При выборе режима измерения «Ручной» на функциональной панели «Схема измерения» становятся активными движки и элементы индикации, которыми задаются и отображаются значения ЭДС источников E_b , E_k . Программа автоматически проверяет заданные значения E_b , E_k на соответствие знаков (полярностей) и не превышение предельных значений для исследуемого БТ и в случае недопустимости их сообщает об этом мигающим красным цветом на изображении движка и индикатора неправильно заданного параметра. Одновременно блокируется клавиша «Измерение», что делает невозможным проведение измерения. Клавиша становится доступной для проведения измерения только при допустимых значениях задаваемых ЭДС E_b , E_k .

В *ручном режиме* в процессе измерения автоматически проверяется, не превышает ли ток коллектора значение, предельно допустимое для данного типа транзистора. Измерения выполняются только при значениях тока коллектора, меньших предельного.

Автоматическое измерение ВАХ осуществляется путем изменения ЭДС источников E_b , E_k в направлении, соответствующем возрастанию токов базы и коллектора. При этом в зависимости от исследуемого транзистора ЭДС могут изменяться как от заданных начальных значений к конечным (для транзисторов $n-p-n$ -типа), так и от заданных конечных значений к начальным (для транзисторов $p-n-p$ -типа). В режиме автоматического измерения ВАХ проверяется, не превышает ли ток коллектора транзистора заданный предел измерения по току $I_{\text{к.изм max}}$. В соответствии с этим током определяется фактическое начальное или конечное значение ЭДС источника цепи базы E_b при заданном максимальном по модулю значении ЭДС источника E_k , которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального измеряемого тока происходит уже при исходном значении ЭДС источника E_b , с которого начинается измерение ВАХ, то выводится сообщение о необходимости изменить это значение E_b (которое может быть как начальным, так и конечным в зависимости от типа транзистора).

Панель «Результаты измерения» представлена:

- цифровыми и графическим индикаторами для каждого из режимов измерения – ручного и автоматического;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движками курсоров для проведения курсорных измерений;
- панелью выбора выводимых в окно «Графики» характеристик.

В автоматическом режиме на цифровой индикатор выводятся числовые результаты курсорных измерений в выбираемых с помощью курсоров точках статической ВАХ, отображаемой в окне «Графики».

При выборе входной ВАХ БТ в схеме с ОЭ на цифровой индикатор выводятся значения тока базы I_6 , напряжения база–эмиттер $U_{6э}$, напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$, параметров транзистора $h_{11} = \Delta U_{6э} / \Delta I_6 | U_{кэ}$, Ом, и $h_{12} = \Delta U_{6э} / \Delta U_{кэ} | I_6$.

При выборе выходной ВАХ БТ в схеме с ОЭ на цифровом индикаторе отображаются числовые результаты курсорных измерений тока коллектора $I_к$, тока базы I_6 , напряжения $U_{кэ}$ и параметров транзистора $h_{21} = \Delta I_к / \Delta I_6 | U_{кэ}$ и $1/h_{22} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_к | I_6$, Ом.

При выборе входной ВАХ БТ в схеме с ОБ показания цифрового индикатора курсорных измерений включают значения тока эмиттера $I_э$, напряжения эмиттер–база $U_{эб}$, напряжения коллектор–база $U_{кб}$ и параметров транзистора $h_{11} = \Delta U_{эб} / \Delta I_э | U_{кб}$, Ом, и $h_{12} = \Delta U_{эб} / \Delta U_{кб} | I_э$.

При выборе выходной ВАХ в схеме с ОБ на цифровом индикаторе отображаются числовые результаты курсорных измерений тока коллектора $I_к$, тока эмиттера $I_э$, напряжения $U_{кб}$ и параметров транзистора $h_{21} = \Delta I_к / \Delta I_э | U_{кб}$ и $1/h_{22} = \Delta U_{кб} / \Delta I_к | I_э$, Ом.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись – фиксация выводимых показаний в память индикатора с возможностью ее прокрутки и сохранения для отчета.

В *ручном режиме* измерения (возможен только в схеме с ОЭ) числовые значения результатов измерения $I_к$, I_6 , $U_{6э}$, $U_{кэ}$, E_6 , $E_к$ выводятся как на индикаторы схемы измерения, так и на цифровые индикаторы «Измерения ручные: входная ВАХ» или «Измерения ручные: выходная ВАХ» в соответствии с выбранной измеряемой и выводимой ВАХ. При нажатии кнопки «Запись» измеренные значения E_6 , $E_к$, $I_к$, I_6 , $U_{6э}$, $U_{кэ}$ фиксируются (сохраняются) в памяти цифрового индикатора и в окне графического индикатора ВАХ.

С помощью кнопки «Сброс» производится очистка цифровых индикаторов ручных и курсорных измерений.

В *исходном состоянии* программа выводит на лицевую панель цифровые индикаторы курсорных измерений для автоматического режима измерения в схеме с ОЭ.

На панели «Выводимые характеристики» размещены кнопки, управляющие выбором выводимой характеристики в ручном и автоматическом режимах измерения. Для схемы с ОЭ это кнопки (и характеристики) « $I_6 = f(E_6) | E_к = \text{const}$ », « $I_к = f(E_к) | E_6 = \text{const}$ », «Входные», «Выходные», «Динамические», «Статические». Для схемы с ОБ это кнопки (и характеристики) «Входные», «Выходные», «Статические».

В *ручном режиме* в схеме с ОЭ активными являются кнопки измерения статических и динамических входных и выходных ВАХ.

В *автоматическом режиме в исходном состоянии* кнопки панели «Выводимые характеристики» недоступны для пользователя (не активны). После проведения первого (и последующих) измерений автоматически включается кнопка выбора характеристики « $I_6 = f(E_6) | E_к = \text{const}$ » и в окно «Графики» выводится семейство измеренных зависимостей тока базы I_6 от ЭДС базы E_6 при постоянных значениях ЭДС коллектора $E_к$. Они представляют семейство динамических входных харак-

теристик БТ в схеме с ОЭ при сопротивлении нагрузки в цепи коллектора $R_k = 300 \text{ Ом}$. С помощью кнопки « $I_k = f(E_k)|E_b = \text{const}$ » можно вывести семейство зависимостей $I_k = f(E_k)|E_b = \text{const}$, показывающих зависимость тока коллектора от ЭДС коллектора E_k при постоянных значениях ЭДС базы E_b . Эти зависимости непосредственно являются функциями заданных параметров автоматического измерения и показывают априорно неизвестные пределы изменения тока коллектора и тока базы, а также реальные значения ЭДС $E_{б.нач}$, $E_{б.кон}$, выводимые в строку состояния измерителя ВАХ.

По характеристикам $I_b = f(E_b)|E_k = \text{const}$ программой определяются предельные значения параметров вывода статических выходных ВАХ в схеме с ОЭ $I_{б.нач}$, $I_{б.кон}$. В качестве шага по току базы dI_b принимается значение $dI_{б.нач} = (I_{б.кон} - I_{б.нач})/10$, округляемое до целого числа микроампер. К этому шагу округляются и предельные значения токов $I_{б.нач}$, $I_{б.кон}$, которые совместно со значением шага $dI_{б.нач}$ автоматически выводятся на индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ» для схемы с ОЭ.

Исходные и предельные значения параметров вывода входных характеристик $U_{кз.нач}$, $U_{кз.кон}$, $dU_{кз}$ схемы с ОЭ определяются значениями параметров автоматического измерения $E_{к.нач}$, $E_{к.кон}$, dE_k и также автоматически выводятся на индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ».

По характеристикам $I_k = f(E_k)|E_b = \text{const}$ программой определяются предельные значения параметров вывода статических выходных ВАХ в схеме с ОБ $I_{э.нач}$, $I_{э.кон}$. В качестве шага по току эмиттера dI_e принимается значение $dI_{э.нач} = (I_{э.кон} - I_{э.нач})/10$, округляемое до целого числа миллиампер. К этому шагу округляются и предельные значения токов $I_{э.нач}$, $I_{э.кон}$, которые совместно со значением шага $dI_{э.нач}$ автоматически выводятся на индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ» для схемы с ОБ.

Исходные и предельные значения параметров вывода входных характеристик $U_{кб.нач}$, $U_{кб.кон}$, $dU_{кб}$ схемы с ОБ определяются значениями параметров автоматического измерения $E_{к.нач}$, $E_{к.кон}$, dE_k и также автоматически выводятся на индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ».

При этом индикаторы панели «Параметры вывода ВАХ» становятся доступными для ввода других необходимых значений параметров вывода входных и выходных ВАХ, заключенных в найденных пределах и с шагом, равным или кратным $dI_{б.нач}$, $dI_{э.нач}$, dE_k . Выбирая их, пользователь может ограничить число выводимых характеристик и отобразить в окне «Графики» интересующие их области. Вводимые значения параметров вывода I_b , I_e , $U_{кз}$, $U_{кб}$ автоматически округляются к их ближайшим дискретным значениям. Изменение параметров вывода нужно подтвердить нажатием клавиши клавиатуры *Enter*, или щелчком левой кнопки мыши на лицевой панели стенда, или повторным выключением–включением кнопки выбора выводимых характеристик. При изменении параметров вывода программа выполняет проверку правильности заданных параметров и выдает сообщение об ошибке в тех случаях, когда неправильно установлена их полярность, начальное значение напряжения или тока превышает конечное значение, число выводимых входных характеристик более 10.

Вывод графиков измеренных характеристик осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом также ограничить число выводимых характеристик или отобразить на экране интересующие их области. Для возврата к исходному представлению графика нужно выключить и снова включить кнопку выбора выводимой характеристики.

После проведения автоматического измерения становятся активными (доступными) все кнопки выбора выводимых графиков ВАХ в схеме с ОЭ (окно «Выводимые ВАХ»). При нажатии кнопок вывода «Входные», «Статические» на экран выводится семейство входных статических ВАХ $I_6 = f(U_{63})|U_{к6}$, при нажатии кнопок «Выходные», «Статические» выводится семейство статических выходных ВАХ $I_k = f(U_{к3})|I_6$, при нажатии кнопок «Входные», «Динамические» выводится динамическая входная ВАХ $I_6 = f(U_{63})|E_{к.выб}$ для сопротивления нагрузки в цепи коллектора $R_k = 300$ Ом, при нажатии кнопок «Выходные», «Динамические» выводится динамическая выходная ВАХ $I_k = f(U_{к3})|E_{к.выб}$ для сопротивления нагрузки в цепи коллектора $R_k = 300$ Ом, где $E_{к.выб}$ соответствует параметру вывода динамических ВАХ. При совместном выборе кнопок вывода «Статические», «Динамические» будут одновременно выводиться графики статических и динамических ВАХ в соответствии с выбранной кнопкой вывода «Входные», «Выходные».

Если снова включить одну из кнопок вывода « $I_6 = f(E_6)|E_k = \text{const}$ » или « $I_k = f(E_k)|E_6 = \text{const}$ », то на экран будут выведены исходные результаты измерения тока базы и тока коллектора как функции от ЭДС E_k и E_6 .

При выборе схемы включения БТ с ОБ становятся активными (доступными) кнопки выбора выводимых графиков ВАХ «Статические», «Входные», «Выходные». При нажатии кнопки вывода «Входные» на экран выводится семейство входных статических ВАХ $I_3 = f(U_{36})|U_{к6}$, при нажатии кнопки «Выходные» выводится семейство статических выходных ВАХ $I_k = f(U_{к6})|I_3$.

При переключении кнопок выбора схемы включения «ОЭ», «ОБ» результаты измерения временно сохраняются в буфере обмена и автоматически восстанавливаются на графическом и цифровом индикаторах.

При переходе из автоматического режима измерения в ручной результаты автоматического измерения временно сохраняются в буфере обмена и автоматически могут быть восстановлены при возврате к автоматическому режиму путем нажатия кнопки выбора выводимой ВАХ.

Вдоль оси абсцисс графического индикатора ВАХ может перемещаться движок курсоров для проведения курсорных измерений по ВАХ, измеренным в автоматическом режиме. При выводе зависимостей $I_6 = f(E_6)|E_k = \text{const}$, $I_k = f(E_k)|E_6 = \text{const}$ и при ручных измерениях управление движками курсоров заблокировано.

При проведении курсорных измерений по одной выведенной характеристике на цифровые индикаторы параметров h_{21} , h_{12} выдается символическое сообщение NaN (not a number – нет числа) о невозможности их измерения по одной ВАХ.

Окно «Графики» выводится строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения.

Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при формировании отчета. Строка содержания содержит фактические значения параметров измерения $E_{б.нач}$, $E_{б.кон}$, $dE_б$, $E_{к.нач}$, $E_{к.кон}$, $dE_к$, $I_{к.изм \text{ lim}}$.

При измерении ВАХ в *ручном режиме* (в схеме с ОЭ) измеряемая характеристика определяется выбором кнопок вывода «Входные», «Выходные». Кнопки «Динамические», «Статические» при этом не активны. Вид измеряемой характеристики – динамическая или статическая при этом определяется стратегией (траекторией) измерения.

Наиболее легко в ручном режиме измеряются динамические выходные и входные ВАХ.

При *ручном измерении* динамической выходной ВАХ (выбрана кнопка «Выходные») задается фиксированное значение ЭДС источника питания цепи коллектора $E_к = E_{к.выв} = \text{const}$ и различные значения ЭДС питания цепи базы $E_б = \text{var}$, при которых производятся измерения. Результаты измерения $I_к$, $U_{кэ}$ выводятся на цифровой индикатор и в окно «Графики» в виде выборок или точек. Если результат измерения приемлем, он нажатием кнопки «Запись» фиксируется в окне «Графики» и в памяти цифрового индикатора. Измерения выполняются до значения $E_{б.кон}$, при котором ток коллектора достигает либо предельного для данного типа транзистора значения $I_{к \text{ max}}$, либо до значения, ограниченного верхним пределом измерения тока измерителя ВАХ $I_{к.изм \text{ max}}$. После завершения снятия одной характеристики ее выборки или точки необходимо соединить линией с помощью специальной кнопки соединения внизу окна «Графики». Если соединение измеренных точек ВАХ проведено, то последующие измерения будут снова выводиться на графическом индикаторе в виде точек (выборки) и будут условно соответствовать уже новой характеристике. Вновь полученные точки также соединяются и т. д.

При *ручном измерении* динамической входной ВАХ (выбрана кнопка «Входные») также задается фиксированное значение ЭДС источника питания цепи коллектора $E_к = E_{к.выв} = \text{const}$ и различные значения ЭДС питания цепи базы $E_б = \text{var}$, при которых производятся измерения. Результаты измерения $I_б$, $U_{бэ}$ выводятся на цифровой индикатор и в окно «Графики» в виде выборок или точек. Если результат измерения приемлем, он нажатием кнопки «Запись» фиксируется в окне «Графики» и в памяти цифрового индикатора. Измерения выполняются до значения $E_{б.кон}$, при котором ток коллектора (значения которого также выводятся на цифровой индикатор) достигает либо предельного для данного типа транзистора значения $I_{к \text{ max}}$, либо до значения, ограниченного верхним пределом измерения тока измерителя ВАХ $I_{к.изм \text{ max}}$. После завершения снятия одной характеристики выборки или точки необходимо соединить линией с помощью специальной кнопки соединения внизу окна «Графики».

Ручное измерение статических ВАХ требует установки заданных постоянных значений тока базы $I_б$ и напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$, которое осуществляется путем итерационного изменения ЭДС источников питания $E_к$, $E_б$ и является достаточно трудоемким.

При *ручном измерении* выходной ВАХ, соответствующей выбранному значению тока базы $I_{б.зад}$, можно установить начальное (максимальное или минимальное) значение ЭДС $E_{к1}$ и, изменяя с малым шагом ЭДС $E_б$ и проводя измерения (но не фиксируя их результаты), найти значение ЭДС $E_{б1}$, при котором ток базы достаточно близок к значению $I_{б.зад}$. Соответствующий этому результат измерения фиксируется на цифровом и графическом индикаторах. Аналогичным образом находятся другие точки этой характеристики при других возможных значениях ЭДС $E_к$. После завершения снятия одной характеристики ее точки нужно соединить линией.

Установив значение ЭДС $E_б = 0$ и проводя измерения при различных значениях ЭДС $E_к$, можно получить график зависимости обратного (теплового) тока коллектора $I_{к0}$ от напряжения коллектор–эмиттер.

При *ручном измерении* входной ВАХ, соответствующей выбранному значению напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ.зад}$, можно установить начальное (максимальное или минимальное) значение ЭДС $E_{б1}$ и, изменяя с малым шагом ЭДС $E_к$ и проводя измерения (но не фиксируя их результаты), найти значение ЭДС $E_{к1}$, при котором напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ}$ достаточно близко к значению $U_{кэ.зад}$. Соответствующий этому результат измерения фиксируется на цифровом и графическом индикаторах. Аналогичным образом находятся другие точки этой характеристики при других значениях ЭДС $E_б$. После завершения снятия одной характеристики ее точки нужно соединить линией.

Наиболее просто измеряется входная статическая характеристика при $U_{кэ.зад} = 0$. Для этого нужно установить значение ЭДС $E_к = 0$ и провести измерения при различных значениях ЭДС $E_б$, фиксируя измеренные значения $I_б$, $U_{бэ}$ на цифровом и графическом индикаторах. Полученные точки ВАХ соединяются затем линией.

При переходе от ручного измерения выходных ВАХ к ручному измерению входных ВАХ и наоборот (путем выбора соответствующей кнопки «Входные», «Выходные») результаты предыдущих измерений временно сохраняются в буфере обмена и автоматически восстанавливаются на цифровом и графическом индикаторах.

Результаты ручного измерения, сохраняемые в буфере обмена, могут быть восстановлены и при переходе из режима ручного измерения в автоматический режим и обратно. Кнопкой «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов. При этом возврат к выводу и отображению ранее измеренных характеристик становится невозможен.

Панель «Управление», кроме клавиши «Измерение», содержит командные кнопки «Сохранение» и «Выход».

Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или данные цифровых индикаторов и графики ВАХ.

При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального лабораторного стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой тип БТ или другой вариант (другой БТ того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения работы.

3.5. Виртуальные стенды для лабораторных исследований технологического разброса ВАХ и параметров полупроводниковых приборов

3.5.1. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой осуществляется через лицевую панель виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы (рис. 3.13) отображается схема измерения, элементы настройки и управления, окна графической и цифровой индикации.

Под управлением клиентской программы средствами виртуального лабораторного стенда осуществляется поочередное автоматическое измерение ВАХ четырех однотипных выпрямительных диодов. По результатам измерения в окно «Графики» совместно выводятся 4 измеренные ВАХ, а также ВАХ, полученная их усреднением $I_{д.ср} = f(U_{д.ср})$. С помощью курсорных измерений для выбранной точки усредненной ВАХ определяются соответствующие ей средние значения тока диодов $I_{д.ср}$, напряжения на диодах $U_{д.ср}$, а также максимальные абсолютные $\Delta I_{д. \max}$, $\Delta U_{д. \max}$ и относительные $\Delta I_{д. \max}/I_{д.ср}$, $\Delta U_{д. \max}/U_{д.ср}$ отклонения ВАХ отдельных диодов от усредненной ВАХ. Они характеризуют разброс ВАХ у полупроводниковых диодов одного типа.

Схема измерения стенда содержит автоматически управляемый источник ЭДС E с пределами изменения ЭДС ± 10 В, токоизмерительные резисторы $R_{т1} = 300$ Ом, $R_{т2} = 100$ кОм, виртуальный миллиамперметр, измеряющий токи диодов по падению напряжения на токоизмерительном резисторе, вольтметр для измерения напряжений на диодах, набор ключей и однотипных выпрямительных диодов, автоматически переключаемых в процессе измерения.

С помощью элементов функциональной панели «Установки» задаются и индицируются параметры настройки измерителя ВАХ:

- *тип выбранного диода* (германиевый – в исходной версии ГД507А или кремниевый – в исходной версии КД521В) и его предельные параметры: максимальный прямой ток $I_{пр}$ и максимальное обратное напряжение $U_{обр}$; для диода ГД507А $I_{пр} = 16$ мА, $U_{обр} = 20$ В; для диода КД521В $I_{пр} = 50$ мА, $U_{обр} = 50$ В.
- *параметры автоматического измерения ВАХ*: начальное, конечное значения и шаг перестройки ЭДС источника E : $E_{нач} \geq -10$ В, $E_{кон} \leq 10$ В, $dE = (0,1 - 1,0)$ В с дискретом 0,05 В; предел измерения по току $I_{изм \max} \leq 30$ мА при под-

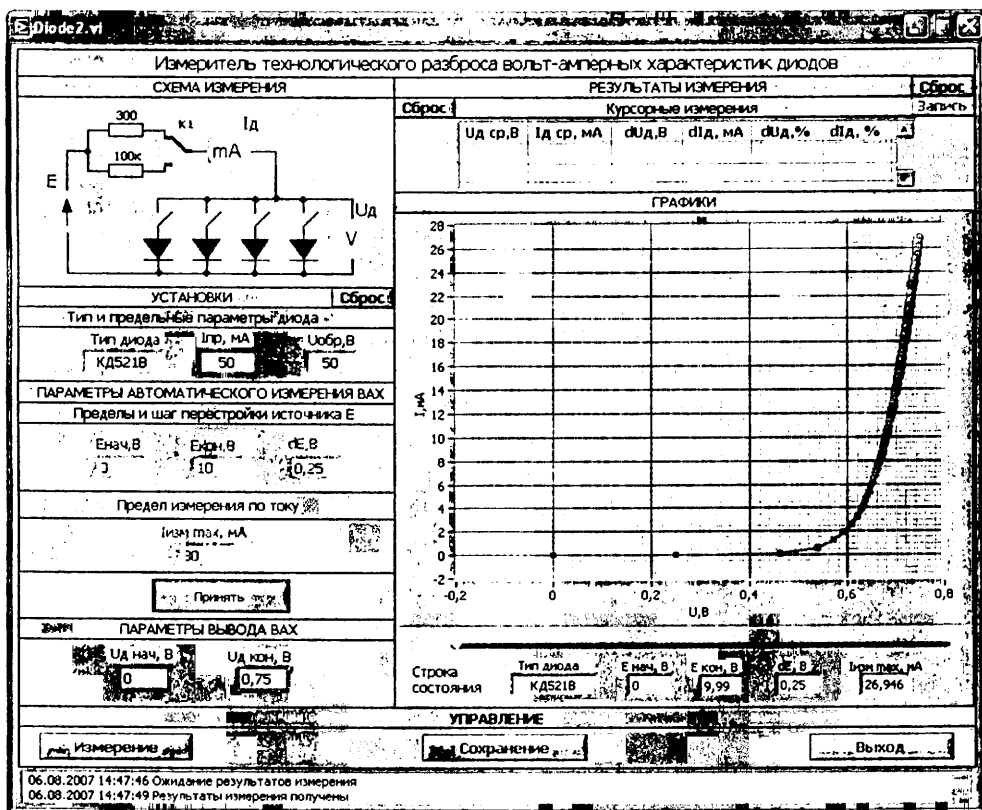


Рис. 3.13. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по исследованию технологического разброса ВАХ выпрямительных диодов

ключенном токоизмерительном резисторе $R_{T1} = 300 \text{ Ом}$ и $I_{изм\ max} \leq 0,1 \text{ мА}$ при токоизмерительном резисторе $R_{T2} = 100 \text{ кОм}$;

- **параметры вывода ВАХ:** начальное и конечное значения напряжения на диоде $U_{д\ нач}$, $U_{д\ кон}$.

При запуске программа выводит на элементы панели «Установки» исходные параметры настройки измерителя ВАХ:

$E_{нач} = -10 \text{ В}$, $E_{кон} = 10 \text{ В}$, $dE = 0,25 \text{ В}$, $I_{изм\ max} = 30 \text{ мА}$ при $R_{T1} = 300 \text{ Ом}$ или $I_{изм\ max} = 0,1 \text{ мА}$ при $R_{T2} = 100 \text{ кОм}$.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение в автоматическом режиме невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша

«Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка правильности введенных параметров автоматического измерения в соответствии с условиями: $E_{\text{нач}} \leq E_{\text{кон}}$, $I_{\text{изм max}} \leq I_{\text{пр}}$. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{\text{нач}}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{\text{кон}}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{\text{изм max}} > I_{\text{пр}}$ », и т. д. и клавиша «Принять» не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и разблокирует клавишу «Измерение».

В частности, измерение ВАХ в автоматическом режиме возможно сразу по исходным выводимым программой значениям параметров измерения (подтвержденным нажатием клавиши «Принять»).

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения.

Панель «Управление» содержит 3 командные клавиши: «Измерение», «Сохранение», «Выход». Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения при подтвержденных параметрах измерения (нажатой клавише «Принять»). Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или данные цифрового индикатора и графики ВАХ. При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального стенда и открывается титульный экран, с которого можно поменять тип диода и продолжить лабораторную работу, нажав клавишу «Начать выполнение», либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения лабораторной работы.

В процессе измерения программа проверяет, не превысил ли ток диода заданный *предел измерения по току* $I_{\text{изм max}}$. В соответствии с этим пределом определяется фактическое конечное значение ЭДС $E_{\text{кон}}$, которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального тока происходит уже при $E = E_{\text{нач}}$, то выводится сообщение о необходимости уменьшить значение $E_{\text{нач}}$.

Панель «Результаты измерения» представлена:

- графическим индикатором (окно «Графики») и цифровым индикатором курсорных измерений;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движком курсора для проведения курсорных измерений.

После нажатия клавиши «Измерение» результаты измерения выводятся на графический индикатор. Выводимые графики ВАХ диодов отличаются по цвету и типу линий. На элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$ автоматически выводятся их исходные значения, соответствующие заданным параметрам автоматического измерения ВАХ. При этом индикаторы становятся доступными для ввода других необходимых значений параметров вывода, заключенных в найденных пределах и отвечающих условию $U_{\text{д.нач}} < U_{\text{д.кон}}$. Выбирая их, пользователь может отображать в окне «Графики» отдельные

интересующие его участки характеристик. Вводимые значения параметров вывода автоматически округляются к ближайшим измеренным значениям напряжения диода U_d . Изменение параметров вывода нужно подтвердить нажатием клавиши *Enter* на клавиатуре или щелчком левой кнопки мыши на лицевой панели стенда.

Вывод графиков измеренных зависимостей осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом также выбирать интересующие его участки исследуемой характеристики.

Вдоль горизонтальной оси графического индикатора находится движок для проведения курсорных измерений.

Курсорные измерения осуществляются при заданных положениях движка курсора относительно усредненной ВАХ. Их результаты отображаются на цифровом индикаторе курсорных измерений. Они включают значения $U_{д.ср}$, $I_{д.ср}$, dU_d , dI_d , dU_d , %, dI_d , %, соответствующие вышеприведенным параметрам технологического разброса ВАХ диодов $U_{д.ср}$, $I_{д.ср}$, $\Delta I_{д.макс}$, $\Delta U_{д.макс}$, $\Delta I_{д.макс}/I_{д.ср}$, $\Delta U_{д.макс}/U_{д.ср}$.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись (фиксация) результатов измерения в память индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

В окно «Графики» выводится также строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при формировании отчета. Строка состояния содержит значения: тип диода, $E_{нач}$, $E_{кон}$, dE , $I_{изм.макс}$.

Кнопкой «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов.

Завершается работа с виртуальным лабораторным стендом последовательным нажатием клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране лабораторной работы.

3.5.2. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров стабилитронов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда (рис. 3.14).

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы отображается схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

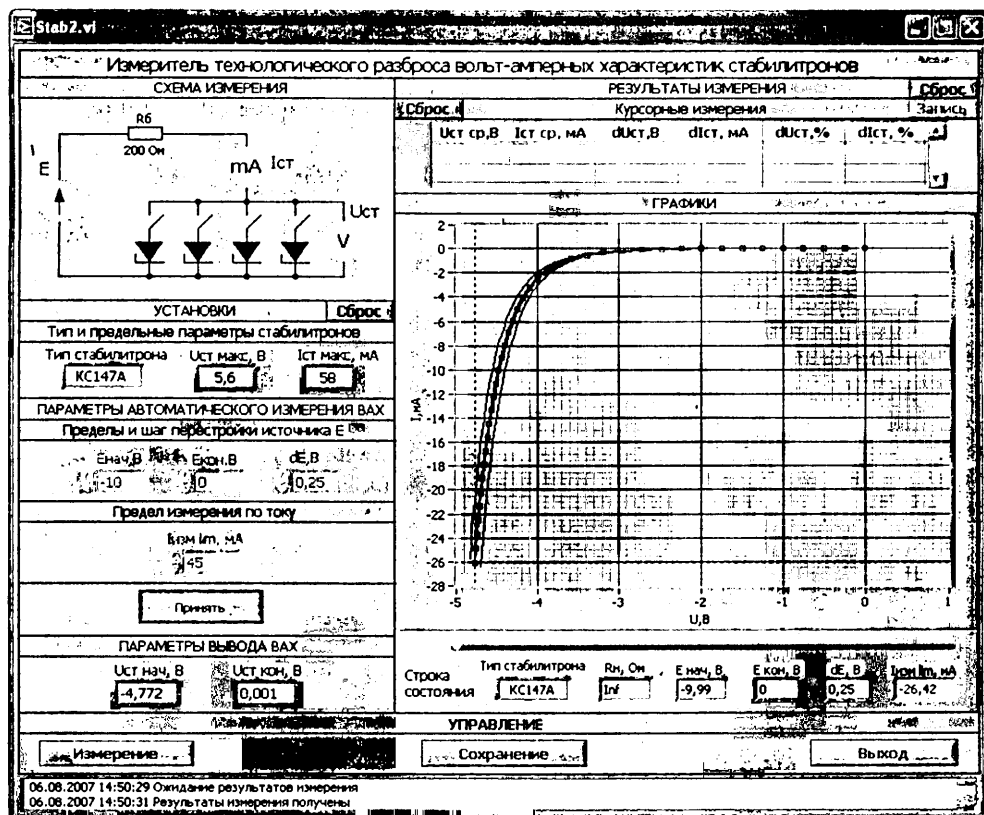


Рис. 3.14. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по исследованию технологического разброса ВАХ стабилизаторов

Под управлением клиентской программы средствами виртуального лабораторного стенда осуществляется поочередное автоматическое измерение ВАХ четырех однотипных стабилизаторов. По результатам измерения в окно «Графики» совместно выводятся 4 измеренные ВАХ, а также ВАХ, полученная их усреднением $I_{ст.ср} = f(U_{ст.ср})$. С помощью курсорных измерений для выбранной точки усредненной ВАХ определяются соответствующие ей средние значения тока стабилизаторов $I_{ст.ср}$, напряжения на стабилизаторах $U_{ст.ср}$, а также максимальные абсолютные $\Delta I_{ст.ср}$, $\Delta U_{ст.ср}$ и относительные $\Delta I_{ст.ср}/I_{ст.ср}$, $\Delta U_{ст.ср}/U_{ст.ср}$ отклонения ВАХ отдельных стабилизаторов от усредненной ВАХ. Они характеризуют разброс ВАХ у полупроводниковых стабилизаторов одного типа.

Схема измерения стенда содержит автоматически управляемый источник ЭДС E с пределами изменения ЭДС ± 10 В, балластный резистор R_6 сопротивлением 200 Ом, виртуальный миллиамперметр и вольтметр для измерения токов и

напряжений стабилизаторов, набор ключей и однотипных стабилизаторов, автоматически переключаемых в процессе измерения.

С помощью элементов функциональной панели «Установки» задаются и индицируются параметры настройки измерителя ВАХ:

- *тип и предельные параметры стабилизатора*: максимальное напряжение $U_{\text{ст max}}$ и ток стабилизации $I_{\text{ст max}}$;
- *параметры автоматического измерения ВАХ*: начальное, конечное значение и шаг перестройки ЭДС источника E : $E_{\text{нач}} \geq -10 \text{ В}$, $E_{\text{кон}} \leq 10 \text{ В}$, $dE = (0,1 - 1,0) \text{ В}$ с дискретом $0,05 \text{ В}$; предел измерения по току $I_{\text{изм max}} \leq 45 \text{ мА}$.
- *параметры вывода ВАХ*: начальное и конечное значения напряжения на стабилизаторе $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$.

При запуске программа выводит на элементы панели «Установки» *исходные параметры настройки измерителя ВАХ*:

тип стабилизатора КС147А, $U_{\text{ст max}} = 5,2 \text{ В}$, $I_{\text{ст max}} = 58 \text{ мА}$;

$E_{\text{нач}} = -10 \text{ В}$, $E_{\text{кон}} = 10 \text{ В}$, $dE = 0,25 \text{ В}$, $I_{\text{изм max}} = 45 \text{ мА}$.

При выборе стабилизатора типа КС133А выводятся его предельные параметры $U_{\text{ст max}} = 3,65 \text{ В}$, $I_{\text{ст max}} = 81 \text{ мА}$.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение в автоматическом режиме невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка правильности введенных параметров автоматического измерения в соответствии с условиями: $E_{\text{нач}} \leq E_{\text{кон}}$, $I_{\text{изм max}} \leq I_{\text{ст max}}$. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{\text{нач}}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{\text{кон}}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{\text{изм max}} > I_{\text{ст max}}$ », и т. д., и клавиша «Принять» при нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

В частности, измерение ВАХ в автоматическом режиме возможно сразу по исходным выводимым программой значениям параметров измерения (подтвержденным нажатием клавиши «Принять»).

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения.

Панель «Управление» содержит три командные клавиши: «Измерение», «Сохранение», «Выход». Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения при подтвержденных параметрах измерения (нажата клавиша «Принять»). Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или данные цифрового индикатора и графики ВАХ. При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального стенда и открывается титульный экран, с которого можно либо продолжить лабораторную рабо-

ту, нажав клавишу «Начать выполнение», либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения лабораторной работы.

В процессе измерения программа проверяет, не превысил ли ток стабилизатора заданный предел измерения по току $I_{\text{изм max}}$. В соответствии с этим пределом определяется фактическое начальное или конечное значение ЭДС $E_{\text{нач}}$, $E_{\text{кон}}$, которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального тока происходит уже при $E = E_{\text{нач}}$, то выводится сообщение о необходимости уменьшить значение $E_{\text{нач}}$.

Панель «Результаты измерения» представлена:

- графическим индикатором (окно «Графики») и цифровым индикатором курсорных измерений;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движком курсора для проведения курсорных измерений.

После нажатия клавиши «Измерение» и его успешного завершения результаты измерения выводятся на графический индикатор. Выводимые графики ВАХ стабилизаторов отличаются по цвету и типу линий. На элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$ автоматически выводятся их исходные значения, соответствующие заданным параметрам автоматического измерения ВАХ. При этом индикаторы становятся доступными для ввода других необходимых значений параметров вывода, заключенных в найденных пределах и отвечающих условию $U_{\text{ст.нач}} < U_{\text{ст.кон}}$. Выбирая их, пользователь может отображать в окне «Графики» отдельные интересующие его участки характеристик. Вводимые значения параметров вывода автоматически округляются до ближайших измеренных значений напряжения стабилизатора $U_{\text{ст}}$. Изменение параметров вывода нужно подтвердить нажатием клавиши клавиатуры *Enter* или щелчком левой кнопки мышки на лицевой панели стенда.

Вывод графиков измеренных зависимостей осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом также выбирать интересующие его участки исследуемой характеристики.

Вдоль горизонтальной оси графического индикатора находится движок для проведения курсорных измерений.

Курсорные измерения осуществляются при заданных положениях движка курсора относительно усредненной ВАХ. Их результаты отображаются на цифровом индикаторе курсорных измерений. Они включают значения $U_{\text{ст.ср}}$, $I_{\text{ст.ср}}$, $dU_{\text{ст}}$, $dI_{\text{ст}}$, $dU_{\text{ст}}/\%$, $dI_{\text{ст}}/\%$, соответствующие вышеприведенным параметрам технологического разброса ВАХ стабилизаторов $U_{\text{ст.ср}}$, $I_{\text{ст.ср}}$, $\Delta U_{\text{ст max}}$, $\Delta I_{\text{ст max}}$, $\Delta U_{\text{ст max}}/U_{\text{ст.ср}}$, $\Delta I_{\text{ст max}}/I_{\text{ст.ср}}$.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись (фиксация) результатов измерения в память индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

В окно «Графики» выводится также строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при формировании отчета. Строка состояния содержит значения: $R_{н}$, $E_{нач}$, $E_{кон}$, dE , $I_{изм\ max}$. Бесконечному значению сопротивления нагрузки в строке состояния соответствует обозначение Inf .

Кнопкой «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов.

Завершается работа с виртуальным лабораторным стендом последовательным нажатием клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране.

3.5.3. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда (рис. 3.15).

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы отображаются схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

Под управлением клиентской программы средствами виртуального лабораторного стенда осуществляется поочередное автоматическое измерение ВАХ четырех однотипных ПТ. По результатам измерения в окно «Графики» совместно выводятся 4 измеренные ВАХ, а также ВАХ, полученная их усреднением. С помощью курсорных измерений для выбранной точки усредненной ВАХ определяются соответствующие ей средние значения тока стока, крутизны и выходной проводимости и максимальные относительные отклонения токов стока, крутизны и выходной проводимости транзисторов от их средних значений. Они характеризуют разброс ВАХ у ПТ одного типа.

В окне «Схема измерения» отображается схема, на которой приведены:

- исследуемые однотипные ПТ;
- ключи, автоматически переключающие ПТ в процессе измерения;
- резисторы R_c сопротивлением 10 Ом в цепи стока и $R_z = 1$ МОм в цепи затвора;
- виртуальные измерительные приборы с цифровой индикацией – вольтметры, измеряющие напряжения $U_{зи}$, $U_{си}$, и миллиамперметр, измеряющий ток стока I_c по падению напряжения на токоизмерительном резисторе в цепи стока;

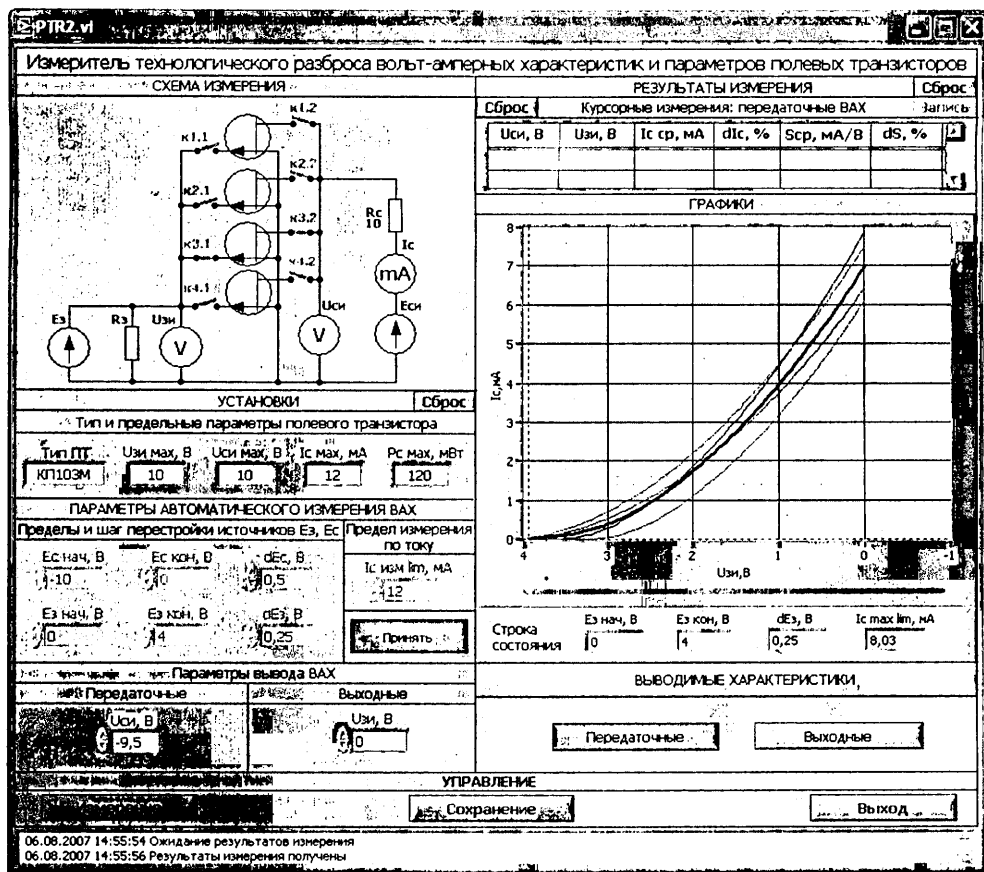


Рис. 3.15. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по измерению технологического разброса ВАХ ПТ

- управляемые автоматически источники ЭДС цепей затвора и стока E_z , E_c с пределами изменения ЭДС, равными ± 10 В.

Исходное изображение схемы измерения соответствует выбранному на титульном экране типу ПТ.

В окне «Установки» интерактивно задаются и (или) индицируются параметры настройки измерителя:

- *тип выбранного ПТ* (в исходной версии КП305Д – ПТ с изолированным затвором и n -каналом или КП103М – ПТ с управляющим p - n -переходом и p -каналом) и его предельные параметры:
 - предельное напряжение затвор–исток $U_{зи\max}$, предельное напряжение сток–исток $U_{си\max}$, максимальный ток стока $I_{с\max}$ и максимальная рассеиваемая мощность $P_{с\max}$;

- для ПТ КП305Д: $U_{\text{зи max}} = 15 \text{ В}$, $U_{\text{си max}} = 15 \text{ В}$, $I_{\text{с max}} = 15 \text{ мА}$, $P_{\text{с max}} = 150 \text{ мВт}$;
- для ПТ КП103М: $U_{\text{зи max}} = 10 \text{ В}$, $U_{\text{си max}} = 10 \text{ В}$, $I_{\text{с max}} = 12 \text{ мА}$, $P_{\text{с max}} = 120 \text{ мВт}$;
- *параметры автоматического измерения ВАХ:*
 - начальные и конечные значения ЭДС затвора и стока $E_{\text{з,нач}}$, $E_{\text{з,кон}}$, $E_{\text{с,нач}}$, $E_{\text{с,кон}}$, задаваемые в пределах $\pm 10 \text{ В}$ и находящиеся в соотношении: $E_{\text{нач}} \leq E_{\text{кон}}$;
 - шаг перестройки ЭДС затвора $dE_{\text{з}}$, кратный $0,1 \text{ В}$, шаг перестройки ЭДС стока $dE_{\text{с}}$, кратный $0,5 \text{ В}$;
 - предел измерения тока стока $I_{\text{с,изм max}} \leq 30 \text{ мА}$.
- *параметры вывода ВАХ:*
 - для статических передаточных – напряжение сток–исток $U_{\text{си}}$;
 - для статических выходных – напряжение затвор–исток $U_{\text{зи}}$.

Исходными являются следующие значения параметров автоматического измерения ВАХ:

- для ПТ типа КП305Д: $E_{\text{з,нач}} = -2 \text{ В}$, $E_{\text{з,кон}} = 2 \text{ В}$, $dE_{\text{з}} = 0,25 \text{ В}$, $E_{\text{с,нач}} = 0 \text{ В}$, $E_{\text{с,кон}} = 10 \text{ В}$; $dE_{\text{с}} = 0,5 \text{ В}$; $I_{\text{с,изм max}} = 10 \text{ мА}$;
- для ПТ типа КП103М: $E_{\text{з,нач}} = 0 \text{ В}$, $E_{\text{з,кон}} = 10 \text{ В}$, $dE_{\text{з}} = 0,25 \text{ В}$, $E_{\text{с,нач}} = -10 \text{ В}$, $E_{\text{с,кон}} = 0 \text{ В}$; $dE_{\text{с}} = 0,5 \text{ В}$; предел измерения по току стока $I_{\text{с,изм max}} = 10 \text{ мА}$.

Окно «Параметры вывода ВАХ» заблокировано.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение невозможно, так как инициирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка введенных параметров автоматического измерения – правильности полярностей ЭДС $E_{\text{з}}$, $E_{\text{с}}$, непревышение ими предельных значений $U_{\text{зи,пред}}$, $U_{\text{си,пред}}$, выполнение соотношений $E_{\text{нач}} \leq E_{\text{кон}}$, $I_{\text{с,изм max}} \leq I_{\text{с max}}$, а также непревышение максимального числа одновременно измеряемых выходных статических характеристик. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{\text{з,нач}}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{\text{с,кон}}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{\text{с,изм max}} > I_{\text{с max}}$ », и т. д., и клавиша «Принять» при ее нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения в соответствии с заданными (допустимыми) параметрами измерения. В частности, пользователь может сразу, не изменяя выводимых программой начальных параметров (но подтвердив их нажатием клавиши «Принять»), произвести измерение ВАХ.

Элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ панели «Параметры вывода ВАХ» недоступны (заблокированы) до проведения первого измерения.

Автоматическое измерение ВАХ осуществляется путем изменения ЭДС источников $E_{\text{з}}$, $E_{\text{с}}$ в направлении, соответствующем возрастанию тока стока. При этом в зависимости от исследуемого транзистора ЭДС могут изменяться как от

заданных начальных значений к конечным (для ПТ с изолированным затвором и n -каналом), так и от заданных конечных значений к начальным (для ПТ с управляющим p - n -переходом и p -каналом). В режиме автоматического измерения ВАХ проверяется, не превышает ли ток стока транзистора заданный предел измерения по току $I_{c,изм\ lim}$. В соответствии с этим током определяется фактическое начальное или конечное значение ЭДС источника цепи затвора E_z при заданном максимальном по модулю значении ЭДС источника E_c , которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального измеряемого тока происходит уже при исходном значении ЭДС источника E_z , с которого начинается измерение ВАХ, то выводится сообщение о необходимости изменить это значение E_z (которое может быть как начальным, так и конечным в зависимости от типа транзистора).

Панель «Результаты измерения» представлена:

- графическим индикатором (окно «Графики») и цифровым индикатором курсорных измерений;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движками курсоров для проведения курсорных измерений.

На панели «Выводимые характеристики» размещены кнопки, управляющие выбором выводимой характеристики, – «Передаточные», «Выходные».

После нажатия клавиши «Измерение» и его успешного завершения на графический индикатор выводятся выходные ВАХ $I_c = f(U_{си})|U_{зи}$ четырех исследуемых ПТ, соответствующие заданному начальному значению напряжения $U_{зи} = E_{з,нач}$, и ВАХ, получаемая путем их усреднения (усредненная выходная ВАХ) $I_{c,ср} = f(U_{си,ср})|U_{зи}$. Выводимые графики ВАХ ПТ отличаются по цвету и типу линий. При выборе кнопки «Передаточные» выводятся передаточные ВАХ $I_c = f(U_{зи})|U_{си}$ четырех исследуемых ПТ, соответствующие заданному начальному значению напряжения $U_{си} = E_{с,нач}$, и ВАХ, получаемая путем их усреднения (усредненная передаточная ВАХ) $I_{c,ср} = f(U_{зи,ср})|U_{си}$.

При переключении кнопок «Передаточные», «Выходные» происходит восстановление соответствующих им графиков.

Начальные значения параметров вывода ВАХ $U_{зи}$, $U_{си}$ автоматически выводятся на элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ. Далее в окне «Параметры вывода ВАХ» могут быть заданы другие необходимые или рекомендуемые значения напряжения $U_{си}$ в пределах $E_{с,нач} - E_{с,кон}$ с шагом dE_c и напряжения $U_{зи}$ в пределах $E_{з,нач} - E_{з,кон}$ с шагом dE_z . При вводе новых значений параметров вывода $U_{си}$, $U_{зи}$ происходят их округление до ближайших дискретных значений и автоматическое обновление графиков ВАХ.

Вывод графиков измеренных зависимостей осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом выбирать интересующие его участки исследуемых характеристик. Для возврата к исходному представлению гра-

фиков нужно выключить и снова включить кнопку выбора выводимых характеристик.

В окно «Графики» выводится строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при оформлении отчета. Строка состояния содержит фактические значения $E_{з.нач}$, $E_{з.кон}$, dE_z , $E_{с.нач}$, $E_{с.кон}$, dE_c , $I_{с.изм\ max}$.

Вдоль осей графиков выводимых ВАХ на графическом индикаторе находятся движки курсоров для проведения курсорных измерений. Курсорные измерения осуществляются при заданных положениях движков курсоров относительно усредненной выходной или передаточной ВАХ. Их результаты, определяющие параметры технологического разброса ВАХ ПТ, отображаются на цифровом индикаторе курсорных измерений.

При курсорных измерениях по передаточным ВАХ, соответствующим заданному напряжению $U_{сн}$, показания цифрового индикатора включают значения напряжения затвор–исток $U_{зи}$, напряжения сток–исток $U_{си}$, среднее по четырем ПТ значение тока стока $I_{с.ср}$, максимальное относительное отклонение токов стока ПТ от среднего dI_c , %, среднее по четырем ПТ значение крутизны $S_{ср}$ и максимальное относительное отклонение значений крутизны ПТ от среднего dS , %.

При курсорных измерениях по выходным ВАХ, соответствующим заданному напряжению $U_{зи}$, показания цифрового индикатора включают значения напряжения затвор–исток $U_{зи}$, напряжения сток–исток $U_{си}$, среднее по четырем ПТ значение тока стока $I_{с.ср}$, относительное отклонение токов стока ПТ от среднего dI_c , %, среднее по четырем ПТ значение выходной проводимости $g_{22ср}$ и относительное отклонение значений выходной проводимости от среднего dg_{22} , %.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись (фиксация) результатов курсорных измерений в память индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

Кнопкой «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов. При этом возврат к выводу и отображению ранее измеренных характеристик становится невозможен.

Функциональная панель «Управление» кроме клавиши «Измерение» включает также командные клавиши «Сохранение» и «Выход».

Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору лицевую панель или совместно данные цифровых индикаторов и графики ВАХ. При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального лабораторного стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой тип ПТ или другой вариант (другой полевой транзистор того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу, либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения работы.

3.5.4. Виртуальный лабораторный стенд по измерению и исследованию технологического разброса ВАХ и параметров биполярных транзисторов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели виртуального лабораторного стенда выполняемой лабораторной работы (рис. 3.16) отображаются схема измерения, элементы настройки и управления, окна «Графики» и цифровой индикации.

Под управлением клиентской программы средствами виртуального лабораторного стенда осуществляется поочередное автоматическое измерение ВАХ че-

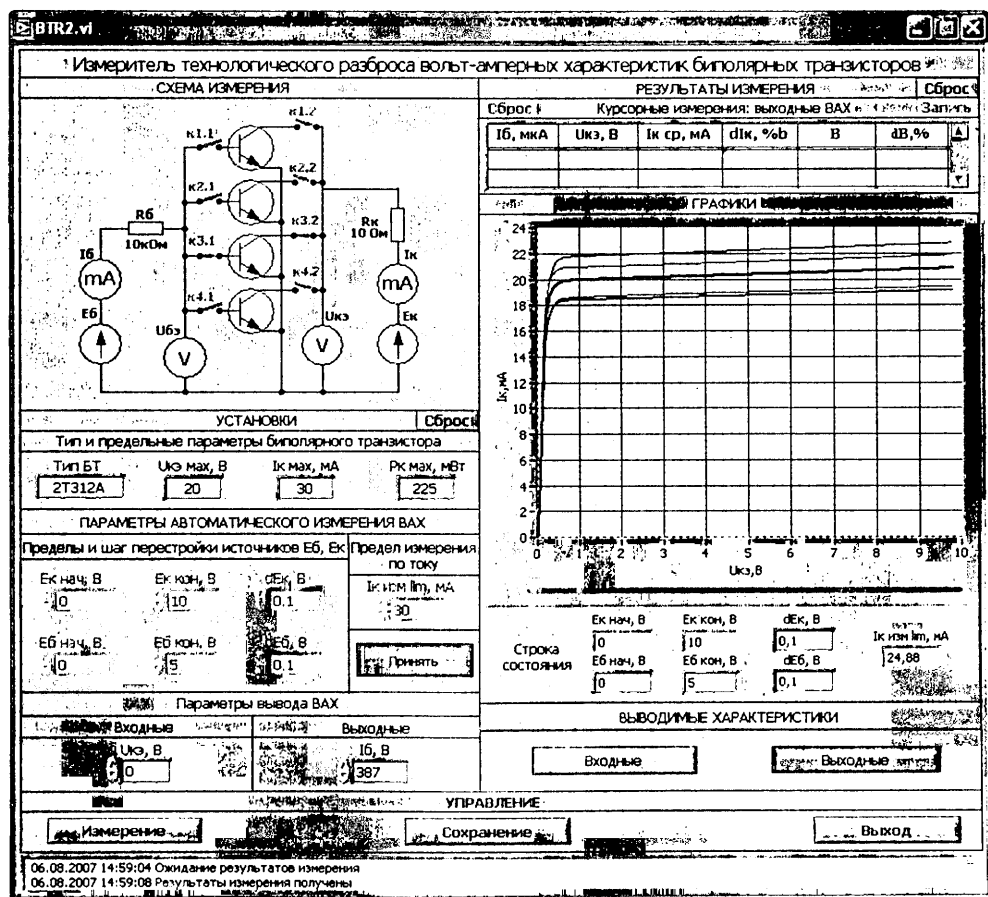


Рис. 3.16. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по измерению технологического разброса ВАХ БТ

тырех однотипных БТ. По результатам измерения в окно «Графики» совместно выводятся 4 измеренные ВАХ, а также ВАХ, полученная их усреднением. С помощью курсорных измерений для выбранной точки усредненной ВАХ определяют соответствующие ей средние значения тока коллектора, тока базы, статического коэффициента усиления по току (параметр $\beta_{ст}$) и входного сопротивления (параметр h_{11}), а также максимальные относительные отклонения этих параметров от их средних значений. Они характеризуют разброс ВАХ у БТ одного типа.

В окне «Схема измерения» лицевой панели представлены:

- исследуемые однотипные БТ, включенные по схеме с общим эмиттером;
- ключи, автоматически переключающие БТ в процессе измерения;
- резисторы R_k сопротивлением 10 Ом в цепи коллектора и $R_b = 10$ кОм в цепи базы;
- виртуальные измерительные приборы с цифровой индикацией – вольтметры, измеряющие напряжения $U_{эв}$, $U_{св}$, и миллиамперметры, измеряющие токи коллектора I_k и базы I_b по падению напряжения на токоизмерительных резисторах в цепи коллектора и цепи базы;
- управляемые автоматически источники ЭДС питания цепей базы и коллектора E_b , E_k с пределами изменения ЭДС, равными ± 10 В.

Исходное изображение схемы измерения соответствует выбранному на титульном экране типу БТ.

В окне «Установки» интерактивно задаются и (или) индицируются параметры настройки измерителя:

- *тип выбранного БТ* (в исходной версии ГТ308В – БТ $p-n-p$ -типа или КТ312А – БТ $n-p-n$ -типа) и его предельные параметры:
 - предельное (максимальное по модулю) напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ\max}$, максимальный ток коллектора $I_{к\max}$ и максимальная рассеиваемая мощность $P_{к\max}$;
 - для БТ типа ГТ308В: $U_{кэ\max} = 12$ В, $I_{к\max} = 50$ мА, $P_{к\max} = 150$ мВт;
 - для БТ типа КТ312А: $U_{кэ\max} = 20$ В, $I_{к\max} = 30$ мА, $P_{к\max} = 225$ мВт;
- *параметры автоматического измерения ВАХ*:
 - начальные и конечные значения ЭДС базы и коллектора $E_{б,нач}$, $E_{б,кон}$, $E_{к,нач}$, $E_{к,кон}$, задаваемые в пределах ± 10 В и находящиеся в соотношении: $E_{нач} \leq E_{кон}$;
 - шаг перестройки ЭДС базы dE_b , кратный 0,1 В, шаг перестройки ЭДС коллектора dE_k , кратный 0,1 В;
 - предел измерения тока коллектора $I_{к,изм\max} \leq 30$ мА;
- *параметры вывода ВАХ*:
 - для статических входных – напряжение коллектор–эмиттер $U_{кэ}$;
 - для статических выходных – ток базы I_b .

Исходными являются следующие значения параметров автоматического измерения ВАХ:

- для БТ типа ГТ308В: $E_{б,нач} = -4$ В, $E_{б,кон} = 0$, $dE_b = 0,1$ В, $E_{к,нач} = -10$ В, $E_{к,кон} = 0$; $dE_k = 0,1$ В; предел измерения по току коллектора $I_{к,изм\max} = 30$ мА;
- для БТ типа КТ312А: $E_{б,нач} = 0$ В, $E_{б,кон} = 5$ В, $dE_b = 0,1$ В, $E_{к,нач} = 0$, $E_{к,кон} = 10$ В; $dE_k = 0,1$ В; предел измерения по току коллектора $I_{к,изм\max} = 30$ мА.

Параметры автоматического измерения ВАХ доступны для изменения при выключенном (отжатом) положении клавиши «Принять», предназначенной для их проверки и подтверждения. До нажатия этой клавиши измерение невозможно, так как иницилирующая процесс измерения клавиша «Измерение» на панели «Управление» является недоступной (заблокированной). При нажатии клавиши «Принять» осуществляется проверка введенных параметров автоматического измерения – правильности полярностей ЭДС E_b , E_k , неперевышение предельного значения $U_{кз, пред}$, выполнение соотношений $E_{нач} \leq E_{кон}$, $I_{к, изм\ max} \leq I_{к\ max}$, а также неперевышение максимального числа одновременно измеряемых выходных статических характеристик. Если эти условия не выполняются, выдается сообщение об ошибке: «Введено недопустимое значение $E_{к, нач}$ », или «Введено недопустимое значение $E_{к, кон}$ », или «Введено недопустимое значение предела измерения по току $I_{к, изм\ max} > I_{к\ max}$ », и т. д., и клавиша «Принять» при ее нажатии не включается. При правильном вводе параметров измерения при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение».

В частности, пользователь может сразу, не изменяя выводимых программой начальных параметров (но подтвердив их нажатием клавиши «Принять»), произвести автоматическое измерение ВАХ нажатием клавиши «Измерение».

Автоматическое измерение ВАХ осуществляется путем изменения ЭДС источников E_b , E_k в направлении, соответствующем возрастанию токов базы и коллектора. При этом в зависимости от исследуемого транзистора ЭДС могут изменяться как от заданных начальных значений к конечным (для транзисторов $n-p-n$ -типа), так и от заданных конечных значений к начальным (для транзисторов $p-n-p$ -типа). В режиме автоматического измерения ВАХ проверяется, не превышает ли ток коллектора транзистора заданный предел измерения по току $I_{к, изм\ max}$. В соответствии с этим током определяется фактическое начальное или конечное значение ЭДС источника цепи базы E_b при заданном максимальном по модулю значении ЭДС источника E_k , которое выводится в строку состояния (см. ниже). Если превышение максимального измеряемого тока происходит уже при исходном значении ЭДС источника E_b , с которого начинается измерение ВАХ, то выводится сообщение о необходимости изменить это значение E_b (которое может быть как начальным, так и конечным в зависимости от типа транзистора).

Панель «Результаты измерения» представлена:

- графическим индикатором (окном «Графики») и цифровым индикатором курсорных измерений;
- строкой состояния в окне «Графики»;
- движками курсоров для проведения курсорных измерений;
- панелью выбора выводимых в окно «Графики» характеристик.

На панели «Выводимые характеристики» размещены кнопки, управляющие выбором выводимой характеристики, – «Входные», «Выходные».

После нажатия клавиши «Измерение» и успешного завершения процесса измерения на графический индикатор выводятся выходные ВАХ $I_k = f(U_{кз})/I_b$ четырех исследуемых БТ, соответствующие автоматически определенному начальному значению тока базы $I_b = I_{b, нач}$, и ВАХ, получаемая путем их усреднения

(усредненная выходная ВАХ) $I_{к,ср} = f(U_{к,ср})/I_6$. Выводимые графики ВАХ БТ отличаются по цвету и типу линий. При выборе кнопки «Входные» выводятся входные ВАХ $I_6 = f(U_{бз})/U_{кз}$ четырех исследуемых ПТ, соответствующие заданному начальному значению напряжения $U_{кз} = E_{к,нач}$, и ВАХ, получаемая путем их усреднения (усредненная передаточная ВАХ) $I_{б,ср} = f(U_{бз,ср})/U_{кз}$.

При переключении кнопок «Входные», «Выходные» происходит восстановление соответствующих им графиков.

На элементы установки и индикации параметров вывода ВАХ $U_{кз}$, I_6 после измерения автоматически выводятся их начальные значения $I_{б,нач}$, $U_{кз,нач}$, определяемые по заданным (или фактическим) начальным значениям ЭДС питания цепи базы и коллектора $E_{б,нач}$, $E_{к,нач}$. Далее в окне «Параметры вывода ВАХ» могут быть заданы другие необходимые или рекомендуемые значения напряжения $U_{кз}$ в пределах $E_{к,нач} - E_{к,кон}$ с шагом dE_k и тока базы I_6 в автоматически определенных пределах $I_{б,нач} - I_{б,кон}$ с шагом $dI_6 = (I_{б,кон} - I_{б,нач})/20$, округленным до целого числа микроампер. При вводе новых значений параметров вывода $U_{кз}$, I_6 происходят их округление до ближайших дискретных значений и автоматическое обновление графиков ВАХ.

Вывод графиков измеренных зависимостей осуществляется с автоматическим масштабированием их значений по осям абсцисс и ординат. Пользователь может с клавиатуры принудительно изменять пределы вывода на индикаторах шкал абсцисс и ординат и таким способом выбирать интересующие его участки исследуемых характеристик. Для возврата к исходному представлению графиков нужно выключить и снова включить кнопку выбора выводимых характеристик.

В окно «Графики» выводится строка состояния, показывающая, каким исходным данным соответствуют представленные на графиках результаты измерения. Это вызвано тем, что пользователь может изменить установки после проведения измерения, что создаст неопределенность в интерпретации графиков как во время выполнения лабораторной работы, так и при оформлении отчета. Строка состояния содержит фактические значения $E_{б,нач}$, $E_{б,кон}$, dE_b , $E_{к,нач}$, $E_{к,кон}$, dE_k , $I_{к,изм\ лим}$.

Вдоль осей графиков выводимых ВАХ на графическом индикаторе находятся движки курсоров для проведения курсорных измерений.

Курсорные измерения осуществляются при заданных положениях движков курсоров относительно усредненной выходной или входной ВАХ. Их результаты, определяющие параметры технологического разброса ВАХ БТ, отображаются на цифровом индикаторе курсорных измерений.

При курсорных измерениях по входным ВАХ, соответствующим заданному напряжению $U_{кз}$, показания цифрового индикатора включают значения напряжения коллектор–эмиттер $U_{кз}$, среднего по четырем БТ напряжения база–эмиттер $U_{бз}$, среднего по четырем БТ тока базы $I_{б,ср}$, максимального относительного отклонения токов базы БТ от среднего dI_6 , %, среднего по четырем БТ значения параметра $h_{11ср}$ и максимального относительного отклонения значений параметра h_{11} от среднего dh_{11} , %.

При курсорных измерениях по выходным ВАХ, соответствующим заданному току базы I_6 , показания цифрового индикатора включают значения тока базы I_6 ,

среднего по четырем БТ напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$, среднего по четырем БТ тока коллектора $I_{к.ср}$, относительного отклонения токов коллектора БТ от среднего $dI_{к.}$, %, среднего по четырем БТ параметра $\beta_{ст.ср}$ и максимального относительного отклонения значений параметра $\beta_{ст}$ от среднего $d\beta_{ст}$, %.

С помощью кнопки «Запись» осуществляется запись (фиксация) результатов курсорных измерений в память индикатора с возможностью их прокрутки и сохранения для отчета.

Кнопками «Сброс» осуществляется очистка цифрового и графического индикаторов. При этом возврат к выводу и отображению ранее измеренных характеристик становится невозможен.

Функциональная панель «Управление», кроме клавиши «Измерение», включает также командные кнопки «Сохранение» и «Выход».

Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору лицевую панель или одновременно данные цифровых индикаторов и графики ВАХ. При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального лабораторного стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой тип БТ или другой вариант (другой биполярный транзистор того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы». Клавиши «Сохранение» и «Выход» доступны на всех этапах выполнения работы.

3.6. Виртуальные стенды для лабораторных исследований полупроводниковых приборов на переменном токе

3.6.1. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе выпрямительных диодов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой по исследованию работы выпрямительных диодов на переменном токе осуществляется через лицевую панель виртуального лабораторного стенда.

Лицевая панель виртуального лабораторного стенда для исследования работы выпрямительных диодов на переменном токе приведена на рис. 3.17.

На лицевой панели стенда представлены исследуемая схема, функциональные панели индикации типа диода и его предельных параметров, установки параметров источников постоянной и переменной ЭДС, панель элементов управления, окно измерителя ВАХ диода и лицевая панель четырехканального цифрового осциллографа. В окно исследуемой схемы выводится также номер выполняемого варианта.

Исследуемая схема представляет электрическую цепь из последовательно соединенных источников постоянной и переменной ЭДС E_0 , E_m , токоизмерительно-

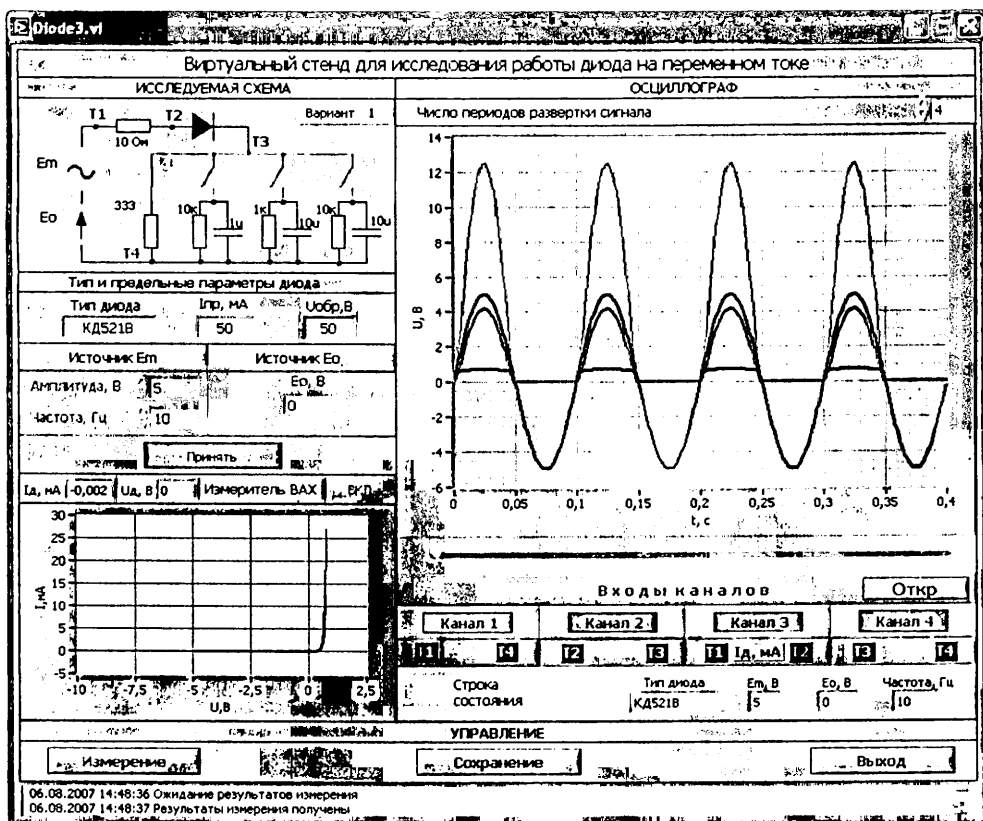


Рис. 3.17. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по исследованию работы выпрямительного диода на переменном токе

го резистора сопротивлением 10 Ом, выпрямительного диода и переключаемых нагрузок: активной $R_{н1} = 333$ Ом и активно-емкостных (10 кОм – 1 мкФ, 1 кОм – 10 мкФ, 10 кОм – 10 мкФ). На схеме показаны также контрольные точки T1, T2, T3, T4, к которым подключены соответствующие входы цифрового осциллографа.

По умолчанию на титульный экран и лицевую панель в исходной версии выводится тип диода КД521В с предельными параметрами $U_{обр} = 50$ В, $I_{пр} = 50$ мА.

При выборе германиевого диода (в исходной версии типа ГД507А) выводятся значения его предельных параметров $I_{пр} = 16$ мА, $U_{обр} = 20$ В.

Исследованию работы диода на переменном токе (в динамическом режиме) предшествует автоматическое измерение его ВАХ, инициируемое нажатием кнопки «ВКЛ» на панели измерителя ВАХ. Измерение ВАХ проводится во всем диапазоне допустимых для данного диода значений ЭДС E . В результате успешного измерения на графическом индикаторе измерителя ВАХ появляются прямая и обратная ветви измеренной ВАХ $I_d = f(U_d)$. На графике ВАХ отображаются так-

же рабочая точка и область изменения тока и напряжения диода (рабочая область ВАХ), соответствующие выводимым исходным значениям параметров источников постоянной и переменной ЭДС E_0 , E_m . На цифровые индикаторы измерителя ВАХ выводятся значения тока и напряжения диода в рабочей точке ВАХ, определяемые установленным по умолчанию постоянным смещением E_0 .

После измерения ВАХ становятся доступными элементы установки параметров источников постоянных и переменных ЭДС E_0 , E_m .

Ввод параметров источников ЭДС выполняется при отжатом положении клавиши «Принять». Параметрами источника переменной ЭДС E_m являются ее амплитуда E_m и частота F , задаваемая дискретными значениями 10, 100, 200, 1000 Гц; параметром источника постоянной ЭДС является задаваемое смещение E_0 положительной и отрицательной полярности. Суммарное значение $E_0 \pm E_m$ должно находиться в пределах ± 10 В, что проверяется программой при подтверждении введенных значений клавишей «Принять». При невыполнении этого условия выводится сообщение об ошибке ввода.

В процессе ввода значений ЭДС источников E_0 , E_m в окне «Графики» измерителя ВАХ меняется положение соответствующей им рабочей точки и области изменений тока и напряжения диода, а на цифровых индикаторах измерителя ВАХ – значения тока и напряжения диода в рабочей точке. Это позволяет, изменяя ЭДС источников E_0 и E_m , достаточно просто и наглядно задавать режим работы диода по постоянному току до проведения измерений.

На панель «Управление» выведены клавиши «Измерение», «Сохранение» и «Выход». Две последние доступны сразу после запуска программы, а клавиша «Измерение» – только при нажатом положении клавиши «Принять», подтверждающем правильность введенных параметров измерения.

После нажатия клавиши «Измерение» и успешного завершения на экран цифрового осциллографа выводятся осциллограммы сигналов в заданных контрольных точках исследуемой схемы. Каждый из четырех каналов цифрового осциллографа имеет два дифференциальных входа А, В, которые жестко подключены к контрольным точкам исследуемой схемы. При этом осциллограммы сигналов каналов соответствуют разности потенциалов $U_A - U_B$ между контрольными точками схемы, подключенными ко входам А, В осциллографа. С помощью канала 1, подключенного входами к контрольным точкам Т1, Т4, измеряются осциллограммы ЭДС входного воздействия; с помощью канала 2, подключенного входами к контрольным точкам Т2, Т3, измеряются осциллограммы напряжения на диоде; с помощью канала 3, подключенного входами к контрольным точкам Т1, Т2, измеряются осциллограммы напряжения на токоизмерительном сопротивлении, которое пропорционально току диода; с помощью канала 4, подключенного входами к контрольным точкам Т3, Т4, измеряются осциллограммы напряжения на нагрузке.

Выводимые на экран осциллограммы напряжений каналов отличаются цветом и типом линий. С помощью кнопок «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3», «Канал 4» можно вывести на экран осциллограмму одного канала или двух каналов в любом их сочетании.

Каналы осциллографа имеют открытые и закрытые входы. Выбор входов осуществляется кнопкой «Открытый/Закрытый». В случае открытых входов выводятся полные осциллограммы напряжений в точках схемы, в случае закрытых исключаются их постоянные составляющие.

Настройка осциллографа, кроме выбора типа входов, включает установку числа выводимых на экран периодов развертки сигнала, которое задается в пределах 1–4.

По измеренным мгновенным значениям тока и напряжения диода в заданном диапазоне изменения ЭДС источника тестового сигнала $E_0 \pm E_m$ находится ВАХ диода, измеренная в динамическом режиме. Она накладывается на ВАХ, измеренную в статическом режиме, и совместно с нею отображается в окне «Графики» измерителя ВАХ.

С помощью перемещаемого вдоль осциллограмм вертикального курсора можно считывать мгновенные значения тока и напряжения диода, которые отображаются точками на графике динамически измеренной ВАХ и выводятся на цифровые индикаторы измерителя ВАХ. Это позволяет наблюдать перемещения рабочей точки на ВАХ диода при изменении ЭДС на входе схемы и проводить курсорные измерения. На высоких частотах на графике измеренной в динамическом режиме ВАХ может наблюдаться гистерезис, обусловленный инерционностью схемы измерения.

В строку состояния выводятся параметры, при которых проведено измерение: тип диода, значения смещения E_0 , амплитуды E_m и частоты F .

Завершается работа с виртуальным лабораторным стендом последовательным нажатием клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране лабораторной работы.

3.6.2. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе стабилитронов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой по исследованию работы стабилитронов на переменном токе осуществляется через лицевую панель виртуального лабораторного стенда.

На лицевой панели стенда (рис. 3.18) представлены исследуемая схема, функциональные панели индикации типа стабилитрона и его предельных параметров, установки параметров источников постоянной и переменной ЭДС, панель элементов управления, окно измерителя ВАХ стабилитрона и лицевая панель трехканального цифрового осциллографа. В окно исследуемой схемы выводится также номер выполняемого варианта.

Исследуемая схема представляет параметрический стабилизатор напряжения, состоящий из последовательно соединенных источников постоянной и переменной ЭДС E_0 , E_m , балластного резистора $R_0 = 300$ Ом, стабилитрона и трех переключаемых резисторов нагрузки: $R_{n1} = 200$ Ом, $R_{n2} = 500$ Ом, $R_{n3} = 1000$ Ом. На схеме

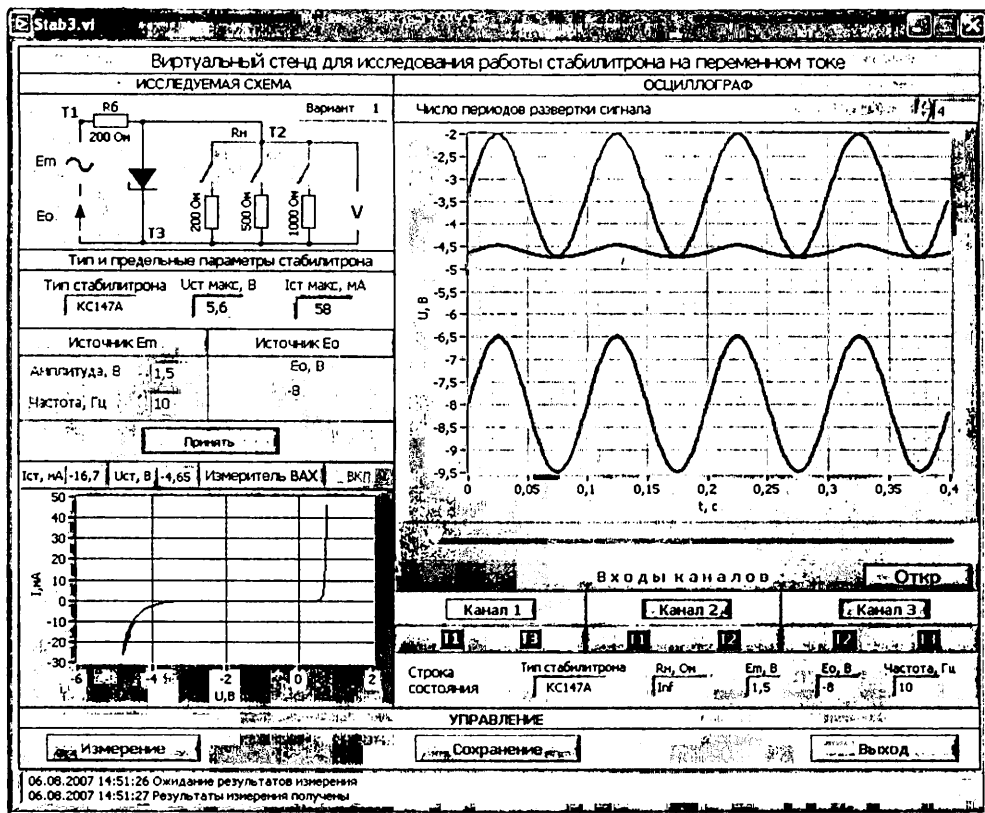


Рис. 3.18. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по исследованию работы стабилизатора на переменном токе

показаны также контрольные точки T1, T2, T3, к которым подключены соответствующие входы цифрового осциллографа.

По умолчанию на лицевую панель выводится тип стабилизатора КС147А с предельными параметрами $U_{ст\ max} = 5,2\ В$, $I_{ст\ max} = 58\ мА$. При выборе стабилизатора типа КС133А выводятся его предельные параметры $U_{ст\ max} = 3,65\ В$, $I_{ст\ max} = 81\ мА$.

Исследованию работы стабилизатора на переменном токе (в динамическом режиме) предшествует автоматическое измерение его ВАХ, инициируемое нажатием кнопки «ВКЛ» на панели измерителя ВАХ. Измерение ВАХ проводится во всем диапазоне допустимых для данного стабилизатора значений ЭДС E . В результате измерения на графическом индикаторе измерителя ВАХ появляются прямая и обратная ветви измеренной ВАХ стабилизатора $I_{ст} = f(U_{ст})$. На графике ВАХ отображаются также рабочая точка и область изменения тока и напряжения стабилизатора (рабочая область ВАХ), которые соответствуют выводимым исходным значениям параметров источников постоянной и переменной ЭДС. На цифровые индикаторы измерителя ВАХ выводятся значения тока и напряжения ста-

билитрона в рабочей точке ВАХ, определяемые установленным по умолчанию постоянным смещением E_0 .

После измерения ВАХ становятся доступными элементы установки параметров источников постоянных и переменных ЭДС E_0 , E_m .

Ввод параметров источников ЭДС выполняется при отжатом положении клавиши «Принять». Параметрами источника переменной ЭДС являются ее амплитуда E_m и частота F , задаваемая дискретными значениями 10, 100, 200, 1000 Гц; параметром источника постоянной ЭДС является задаваемое смещение E_0 положительной и отрицательной полярности. Суммарное значение $E_0 \pm E_m$ должно находиться в пределах ± 10 В, что проверяется программой при подтверждении введенных значений клавишей «Принять». При невыполнении этого условия выводится сообщение об ошибке ввода.

В процессе ввода значений ЭДС источников E_0 , E_m в окне «Графики» измерителя ВАХ меняется положение соответствующей им рабочей точки и области изменений тока и напряжения стабилитрона, а на цифровых индикаторах измерителя ВАХ – значения тока и напряжения стабилитрона в рабочей точке. Это позволяет; изменяя ЭДС источников E_0 и E_m , достаточно просто и наглядно задавать режим работы стабилитрона по постоянному току до проведения измерений.

На панель «Управление» выведены клавиши «Измерение», «Сохранение» и «Выход». Две последние доступны сразу после запуска программы, а клавиша «Измерение» – только при нажатом положении клавиши «Принять», подтверждающем правильность введенных параметров измерения.

После нажатия клавиши «Измерение» и успешного завершения процесса измерения на экран цифрового осциллографа выводятся осциллограммы сигналов в заданных контрольных точках исследуемой схемы. Каждый из трех каналов цифрового осциллографа имеет два дифференциальных входа А, В, которые жестко подключены к контрольным точкам исследуемой схемы. При этом осциллограммы сигналов каналов соответствуют разности потенциалов $U_A - U_B$ между контрольными точками схемы, подключенными ко входам А, В осциллографа. С помощью канала 1, подключенного входами к контрольным точкам Т1, Т3, измеряются осциллограммы ЭДС входного воздействия; с помощью канала 2, подключенного входами к контрольным точкам Т1, Т2, измеряются осциллограммы напряжения на балластном сопротивлении R_b , которое пропорционально суммарному току стабилитрона и нагрузки; с помощью канала 3, подключенного входами к контрольным точкам Т2, Т3, измеряются осциллограммы напряжения на стабилитроне и нагрузке.

Выводимые на экран осциллограммы напряжений каналов отличаются цветом и типом линий. С помощью кнопок «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3» можно вывести на экран осциллограмму одного канала или двух каналов в любом их сочетании.

Каналы осциллографа имеют открытые и закрытые входы. Выбор входов осуществляется кнопкой «Открытый/Закрытый». В случае открытых входов выводятся полные осциллограммы напряжений в точках схемы, в случае закрытых исключаются их постоянные составляющие.

Настройка осциллографа, кроме выбора типа входов, включает установку *числа выводимых на экран периодов развертки сигнала*, которое задается в пределах 1–4.

По измеренным мгновенным значениям тока и напряжения стабилитрона в заданном диапазоне изменения ЭДС источника тестового сигнала $E_0 \pm E_m$ находится ВАХ стабилитрона, измеренная в динамическом режиме. Она накладывается на ВАХ, измеренную в статическом режиме, и отображается совместно с нею в окне «Графики» измерителя ВАХ.

С помощью перемещаемого вдоль осциллограмм вертикального курсора можно считывать мгновенные значения тока и напряжения стабилитрона, которые отображаются точкой на графике динамически измеренной ВАХ и выводятся на цифровые индикаторы измерителя ВАХ. Это позволяет наблюдать перемещения рабочей точки на ВАХ стабилитрона при изменении входной ЭДС и проводить курсорные измерения. На высоких частотах (1000 Гц) на графике измеренной в динамическом режиме ВАХ может наблюдаться гистерезис, обусловленный инерционностью схемы измерения.

В строку состояния выводятся параметры, при которых проведено измерение: значение сопротивления нагрузки R_n , смещения E_0 , амплитуды E_m и частоты F . Бесконечному сопротивлению нагрузки (отключенной нагрузке) соответствует в строке состояния символ *Inf*.

Завершается работа с виртуальным лабораторным стендом последовательным нажатием клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране лабораторной работы.

3.6.3. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе полевых транзисторов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой по исследованию работы ПТ на переменном токе осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда (рис. 3.19).

На лицевой панели стенда представлены исследуемая схема, функциональные панели индикации типа ПТ и его предельных параметров, установки параметров источников постоянной и переменной ЭДС, панель элементов управления, окно измерителя ВАХ ПТ и лицевая панель трехканального цифрового осциллографа. В окно исследуемой схемы выводится также номер выполняемого варианта.

Исследуемая схема содержит ПТ с подключенными к нему сопротивлениями в цепи стока и затвора $R_c = 300 \text{ Ом}$, $R_z = 1 \text{ МОм}$ и управляемый источник питания в цепи стока E_c , образующие усилительный каскад на ПТ с общим истоком. Ко входу каскада подключены последовательно включенные управляемые источники ЭДС смещения затвора E_{z0} и переменной (гармонической) ЭДС E_{zm} . На схеме показаны контрольные точки Т1–Т4, к которым постоянно подключены входы каналов трехканального цифрового осциллографа, а также ключи выбора сопротивления нагрузки R_c в режиме анимации: $R_c = 100, 300, 600 \text{ Ом}$ (см. ниже).

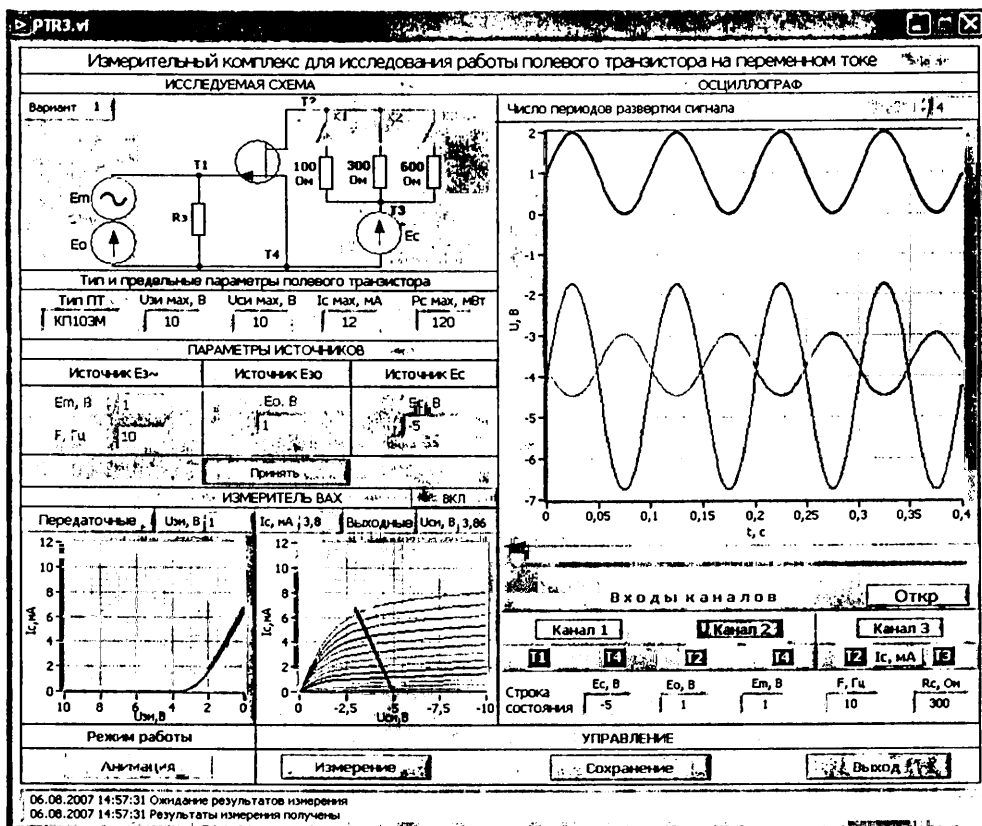


Рис. 3.19. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по исследованию работы ПТ на переменном токе

Исходное изображение исследуемой схемы соответствует выбранному на титульном экране типу ПТ.

По умолчанию на титульный экран и лицевую панель в исходной версии выводится тип ПТ КП305Д с изолированным затвором и n -каналом, имеющий предельные параметры: предельное напряжение затвор–исток $U_{зи \max} = 15 V$, предельное напряжение сток–исток $U_{си \max} = 15 V$, максимальный ток стока $I_{с \max} = 15 mA$ и постоянная рассеиваемая мощность $P_{с \max} = 150 mBt$. При выборе ПТ другого типа (в исходной версии КП103М) выводятся значения его предельных параметров $U_{зи \max} = 10 V$, $U_{си \max} = 10 V$, $I_{с \max} = 12 mA$, $P_{с \max} = 120 mBt$.

Исследование работы ПТ в динамическом режиме становится возможным только после проведения автоматического измерения его ВАХ путем нажатия кнопки «ВКЛ» на панели измерителя ВАХ. Измерение ВАХ проводится во всем диапазоне возможных для каждого ПТ значений ЭДС E_0 , E_c . После успешного завершения измерения на первом графическом индикаторе измерителя ВАХ появ-

ляется динамическая передаточная ВАХ, на втором – динамическая выходная ВАХ, наложенная на семейство измеренных статических выходных ВАХ. Динамические ВАХ соответствуют значению сопротивления нагрузки $R_c = 300 \text{ Ом}$ и выводимому по умолчанию значению ЭДС стока $E_c = 5 \text{ В}$ (для ПТ КП103М с каналом p -типа $E_c = -5 \text{ В}$).

При этом становятся доступными элементы установки параметров источников постоянных и переменных ЭДС в цепи затвора и стока.

Ввод параметров источников ЭДС выполняется при отжатом положении клавиши «Принять». Параметрами источника переменной гармонической ЭДС E_m являются амплитуда E_m , задаваемая в пределах от 0 до 10 В, и частота F , имеющая дискретные значения 10, 100, 200, 500 Гц; с помощью источника постоянной ЭДС E_{c0} положительной и отрицательной полярности задается смещение E_0 в цепи затвора ПТ. От источника постоянной ЭДС E_c осуществляется питание цепи стока. Значение ЭДС E_c может быть задано в пределах $\pm 10 \text{ В}$ с учетом необходимой для каждого ПТ полярности. Суммарное значение ЭДС $E_m \pm E_0$ не должно выходить за пределы $\pm 10 \text{ В}$, а соответствующее ему напряжение затвор–исток и ток стока должны удовлетворять предельным параметрам ПТ. Введенные значения параметров источников подтверждаются нажатием клавиши «Принять». Если какие-либо из указанных условий не выполняются, то выводится сообщение об ошибке ввода и клавиша «Принять» не включается. Если введены правильные значения параметров источников, то при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение», размещенной на панели «Управление».

В процессе ввода значений ЭДС источников E_0 , E_m и E_c в окнах «Графики» измерителя ВАХ на передаточной и выходной динамических характеристиках ПТ отображаются соответствующие им рабочие точки и рабочие области изменения тока стока и напряжений сток–исток, затвор–исток.

Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения в соответствии с заданными параметрами источников (в том числе выводимыми по умолчанию). После успешного завершения измерения на экран цифрового осциллографа выводятся осциллограммы напряжений в контрольных точках исследуемой схемы. Измеренные мгновенные значения тока стока и напряжений затвор–исток и сток–исток отображаются также на передаточной и выходной динамических характеристиках ПТ в окнах «Графики» измерителя ВАХ. Каждый из трех каналов цифрового осциллографа имеет два дифференциальных входа А, В, которые жестко подключены к контрольным точкам исследуемой схемы. Осциллограммы каналов соответствуют изменениям во времени разности потенциалов $U_A - U_B$ между контрольными точками схемы, подключенными ко входам А, В осциллографа. С помощью канала 1, подключенного входами к контрольным точкам Т1, Т4, измеряются осциллограммы напряжения затвор–исток ПТ; с помощью канала 2, подключенного входами к контрольным точкам Т2, Т4, измеряются осциллограммы напряжения сток–исток; с помощью канала 3, подключенного входами к контрольным точкам Т2, Т3, измеряются осциллограммы напряжения на сопротивлении нагрузки R_c , которое пропорционально току стока.

Выводимые на экран осциллограммы канальных сигналов отличаются цветом и типом линий. С помощью кнопок «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3» можно вывести на экран осциллограмму одного канала или двух каналов в любом их сочетании.

Каналы осциллографа имеют открытые и закрытые входы. Выбор входов осуществляется кнопкой «Открытый/Закрытый». В случае открытых входов выводятся полные осциллограммы сигналов в точках схемы, в случае закрытых исключаются их постоянные составляющие.

Настройка осциллографа, кроме выбора типа входов, включает установку числа выводимых на экран периодов развертки сигнала, которое задается в пределах 1–4.

В строку состояния выводятся параметры, при которых проведено измерение: тип ПТ, значения ЭДС E_c , смещения E_0 , амплитуды E_m , частоты F и сопротивления нагрузки R_c .

С помощью перемещаемого вдоль осциллограмм вертикального курсора можно считывать мгновенные значения напряжений на затворе, стоке и сопротивлении нагрузки, которые отображаются точками на графиках динамических ВАХ и выводятся на цифровые индикаторы курсора. Это позволяет наблюдать перемещения рабочей точки на ВАХ ПТ при изменении ЭДС входного сигнала и проводить курсорные измерения.

Наряду с физическими измерениями в программе предусмотрено исследование работы ПТ на переменном токе в режиме анимации, который выбирается с помощью клавиши «Анимация». В этом режиме мгновенные значения тока стока и напряжений сток–исток и затвор–исток находятся по заданным параметрам тестового воздействия и измеренным ВАХ ПТ и с низкой частотой развертки выводятся на экран цифрового осциллографа и индикаторы измерителя ВАХ. Работа в режиме анимации включает его выбор путем нажатия клавиши «Анимация», подключение необходимого резистора нагрузки в цепи стока с помощью ключей K_1 , K_2 , K_3 , становящихся доступными в этом режиме, установку параметров источников ЭДС и подтверждение установленных параметров нажатием клавиши «Принять», которой в данном режиме непосредственно инициируется процесс анимации. По выводимым в результате осциллограммам могут визуально оцениваться изменения формы сигналов и проводиться курсорные измерения их параметров. Для установки новых параметров источников ЭДС нужно перевести клавишу «Принять» в выключенное состояние так же, как и для выхода из режима анимации, который завершается путем выключения клавиши «Анимация».

На панель «Управление», кроме клавиши «Измерение», выведены кнопки «Сохранение» и «Выход», доступные на всех этапах выполнения работы.

Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору: лицевую панель или одновременно осциллограммы сигналов и графики ВАХ.

При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального лабораторного стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой тип ПТ или другой вариант (другой ПТ того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу либо завершить ее, нажав клавишу «Завершение работы».

3.6.4. Виртуальный лабораторный стенд по исследованию работы на переменном токе биполярных транзисторов

Взаимодействие пользователя с клиентской измерительной программой по исследованию работы БТ на переменном токе осуществляется посредством лицевой панели виртуального лабораторного стенда.

Лицевая панель виртуального лабораторного стенда для исследования работы БТ в динамическом режиме приведена на рис. 3.20.

На лицевой панели стенда представлены исследуемая схема, функциональные панели индикации типа БТ и его предельных параметров, установки параметров источников постоянной и переменной ЭДС, панель элементов управления, окно

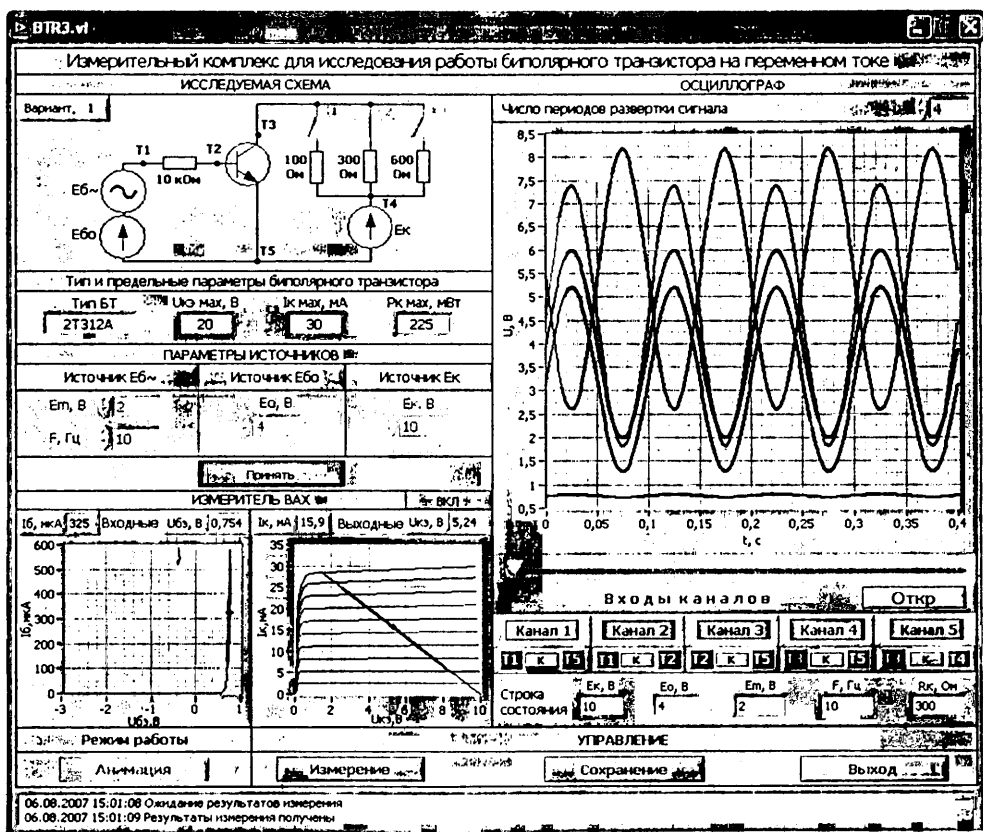


Рис. 3.20. Лицевая панель виртуального лабораторного стенда по исследованию работы БТ на переменном токе

измерителя ВАХ БТ и лицевая панель пятиканального цифрового осциллографа. В окно исследуемой схемы выводится также номер выполняемого варианта.

Исследуемая схема содержит БТ с подключенными к нему сопротивлениями в цепи коллектора и базы $R_k = 300 \text{ Ом}$, $R_b = 10 \text{ кОм}$ и управляемый источник питания в цепи коллектора E_k , образующие усилительный каскад на БТ с общим эмиттером. Ко входу каскада подключены последовательно включенные управляемые источники ЭДС смещения базы $E_{\phi 0}$ и переменной (гармонической) ЭДС E_{ϕ} . На схеме показаны контрольные точки Т1–Т5, к которым постоянно подключены входы каналов пятиканального цифрового осциллографа, а также ключи выбора сопротивления нагрузки R_k в режиме анимации: $R_k = 100, 300, 600 \text{ Ом}$.

Исходное изображение исследуемой схемы соответствует выбранному на титульном экране типу БТ.

По умолчанию на титульный экран и лицевую панель в исходной версии выводится тип БТ КТ312А (БТ $n-p-n$ -типа), имеющий предельные параметры: предельное (максимальное по модулю) напряжение коллектор–эмиттер $U_{к\max} = 20 \text{ В}$, максимальный ток коллектора $I_{к\max} = 30 \text{ мА}$ и максимальная рассеиваемая мощность $P_{к\max} = 225 \text{ мВт}$.

При выборе в исходной версии БТ типа ГТ308В выводятся значения его предельных параметров: $U_{к\max} = 12 \text{ В}$, $I_{к\max} = 50 \text{ мА}$, $P_{к\max} = 150 \text{ мВт}$.

Исследование работы БТ в динамическом режиме становится возможным только после проведения автоматического измерения его ВАХ путем нажатия кнопки «ВКЛ» на панели измерителя ВАХ. Измерение ВАХ проводится во всем диапазоне возможных для каждого БТ значений ЭДС E_b , E_k . После успешного завершения измерения на первом графическом индикаторе измерителя ВАХ появляется динамическая входная ВАХ, на втором – динамическая выходная ВАХ, наложенная на семейство измеренных статических выходных ВАХ. Динамические ВАХ соответствуют значению сопротивления нагрузки $R_k = 300 \text{ Ом}$ и выводимому по умолчанию значению ЭДС питания коллектора $E_k = 5 \text{ В}$ (для БТ ГТ308В $E_k = -5 \text{ В}$).

При этом становятся доступными элементы установки параметров источников постоянных и переменных ЭДС в цепи базы и коллектора.

Ввод параметров источников ЭДС выполняется при отжатом положении клавиши «Принять». Параметрами источника переменной гармонической ЭДС E_{ϕ} являются амплитуда E_m , задаваемая в пределах от 0 до 10 вольт, и частота F , имеющая дискретные значения 10, 100, 200, 500 Гц; с помощью источника постоянной ЭДС $E_{\phi 0}$ положительной и отрицательной полярности задается смещение в цепи базы БТ. От источника постоянной ЭДС E_k осуществляется питание цепи коллектора. Значение ЭДС E_k может быть задано в пределах $\pm 10 \text{ В}$ с учетом необходимой для каждого БТ полярности. Суммарное значение ЭДС $E_m \pm E_{\phi 0}$ не должно выходить за пределы $\pm 10 \text{ В}$, а соответствующее ему напряжение база–эмиттер и ток коллектора должны удовлетворять предельным параметрам БТ. Введенные значения параметров источников подтверждаются нажатием клавиши «Принять». Если какие-либо из указанных условий не выполняются, то выводится со-

общение об ошибке ввода и клавиша «Принять» не включается. Если введены правильные значения параметров источников, то при нажатии включается клавиша «Принять» и происходит разблокировка клавиши «Измерение», размещенной на панели «Управление».

В процессе ввода значений ЭДС источников E_0 , E_m и E_k в окнах «Графики» измерителя ВАХ на входной и выходной динамических характеристиках БТ отображаются соответствующие им рабочие точки и рабочие области изменения токов коллектора и базы и напряжений коллектор–эмиттер, база–эмиттер. Значения токов и напряжений БТ в рабочей точке выводятся также на цифровые индикаторы измерителя ВАХ. Это позволяет, изменяя ЭДС источников E_0 и E_k , достаточно просто и наглядно задавать режим работы БТ по постоянному току до проведения измерений.

Сразу после измерения ВАХ на графиках отображается рабочая точка и рабочие области, соответствующие исходным (выводимым по умолчанию) значениям параметров источников.

Нажатие клавиши «Измерение» непосредственно запускает процесс измерения в соответствии с заданными параметрами источников (в том числе выводимыми по умолчанию). После успешного завершения измерения на экран цифрового осциллографа выводятся осциллограммы напряжений в контрольных точках исследуемой схемы. Измеренные мгновенные значения токов коллектора и базы и напряжений база–эмиттер и коллектор–эмиттер отображаются также на входной и выходной динамических характеристиках БТ в окнах «Графики» измерителя ВАХ. Каждый из пяти каналов цифрового осциллографа имеет две группы дифференциальных входов А, В, которые жестко подключены к контрольным точкам исследуемой схемы. Осциллограммы каналов соответствуют изменениям во времени разности потенциалов $U_A - U_B$ между контрольными точками схемы, подключенными ко входам А, В осциллографа.

При подключении канала 1 к контрольным точкам Т1, Т5 измеряются осциллограммы входных источников постоянной и переменной ЭДС E_{60} , E_{6-} .

При подключении канала 2 к контрольным точкам Т1, Т2 измеряются осциллограммы падения напряжения на сопротивлении R_6 , пропорционального току базы I_6 .

При подключении канала 3 к контрольным точкам Т2, Т5 измеряются осциллограммы напряжения база–эмиттер.

При подключении канала 4 к контрольным точкам Т3, Т5 измеряются осциллограммы напряжения коллектор–эмиттер.

При подключении канала 5 к контрольным точкам Т4, Т3 измеряются осциллограммы падения напряжения на сопротивлении R_k , пропорционального току коллектора I_k .

Выводимые на экран осциллограммы канальных сигналов отличаются цветом и типом линий. С помощью кнопок «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3», «Канал 4»,

«Канал 5» можно вывести на экран осциллограммы любого числа каналов в произвольном сочетании.

Каналы осциллографа имеют открытые и закрытые входы. Выбор входов осуществляется кнопкой «Открытый/Закрытый». В случае открытых входов выводятся полные осциллограммы сигналов в точках схемы, в случае закрытых исключаются их постоянные составляющие.

Настройка осциллографа, кроме выбора типа входов, включает установку числа выводимых на экран периодов развертки сигнала, которое задается в пределах 1–4.

В строку состояния выводятся параметры, при которых проведено измерение: тип БТ, значения ЭДС источника E_{κ} , смещения E_0 , амплитуды E_m , частоты F и сопротивления нагрузки R_{κ} .

С помощью перемещаемого вдоль осциллограмм вертикального курсора можно считывать мгновенные значения ЭДС входного источника E_0 , напряжений на базе и коллекторе, падений напряжений на сопротивлении R_6 и сопротивлении нагрузки R_{κ} , которые выводятся на цифровые индикаторы курсорной линии осциллографа. Перемещения курсора на экране осциллографа отображаются также перемещениями точки на графиках входной и выходной динамических ВАХ, а соответствующие этой точке значения напряжений и токов БТ выводятся на цифровые индикаторы измерителя ВАХ. Это позволяет наблюдать перемещения рабочей точки на ВАХ БТ при изменении ЭДС входного сигнала и проводить курсорные измерения. С помощью специальных кнопок можно выборочно отключать вывод цифр на индикаторы курсорной линии, особенно на те из них, что дублируются показаниями цифровых индикаторов измерителя ВАХ.

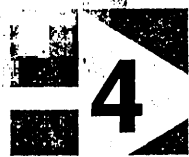
Наряду с физическими измерениями в программе предусмотрено исследование работы БТ на переменном токе в режиме *анимации*, который выбирается с помощью клавиши «Анимация». В этом режиме мгновенные значения токов коллектора и базы и напряжений коллектор–эмиттер и база–эмиттер находятся по заданным параметрам тестового воздействия и измеренным ВАХ БТ и с низкой частотой развертки выводятся на экран цифрового осциллографа и индикаторов измерителя ВАХ. Работа в режиме анимации включает его выбор путем нажатия клавиши «Анимация», подключение необходимого резистора нагрузки в цепи коллектора с помощью ключей K1, K2, K3, которые становятся доступными в этом режиме, установку параметров источников ЭДС и подтверждение установленных параметров нажатием клавиши «Принять», которой в данном режиме непосредственно инициируется процесс анимации. По выводимым в результате осциллограммам могут визуально оцениваться изменения формы сигналов и проводиться курсорные измерения их параметров. Для установки новых параметров источников ЭДС нужно перевести клавишу «Принять» в выключенное состояние так же, как и для выхода из режима анимации, который завершается путем нажатия клавиши «Анимация».

На панель «Управление», кроме клавиши «Измерение», выведены клавиши «Сохранение» и «Выход», которые доступны на всех этапах выполнения работы.

Клавиша «Сохранение» позволяет сохранить для отчета по выбору лицевую панель или одновременно осциллограммы сигналов и графики ВАХ.

При нажатии клавиши «Выход» закрывается лицевая панель виртуального лабораторного стенда и открывается титульный экран, с которого можно, выбрав другой тип БТ или другой вариант (другой БТ того же типа) и нажав клавишу «Начать выполнение», продолжить лабораторную работу либо завершить ее, используя клавишу «Завершение работы».

Исследование полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ



4.1. Модели, средства и технология исследования полупроводниковых приборов с помощью моделирования на ПЭВМ

В лабораторном практикуме по исследованию полупроводниковых приборов на основе системы АЛП УД «Электроника» в качестве программного средства моделирования используется демонстрационная версия системы автоматизированного проектирования *OrCAD 9.1* [21]. Моделирование электронных устройств на ПЭВМ основывается на математических моделях, образующих их компоненты. В приложении 2 приведены встроенные в систему *OrCAD* математические *Pspice*-модели электрорадиоэлементов и их параметры, которые используются при проведении исследований. Встроенные *Pspice*-модели являются динамическими моделями большого сигнала, справедливыми для частот ниже СВЧ-диапазона.

Для проведения исследований на ПЭВМ должна быть предварительно установлена демонстрационная версия системы *OrCAD 9.1* с компакт-диска, идущего в комплекте с данным пособием. Указания по инсталляции системы приведены в файле *Install.doc*. Также с компакт-диска на жесткий диск ПЭВМ должна быть скопирована папка *Electronica*. При копировании в любую другую папку нужно убедиться, что путь к этой папке прописан латинскими буквами.

Моделирование электронных устройств в системе *OrCAD* осуществляется на основе их эквивалентных схем замещения, которые создаются с помощью схемотехнического редактора *Capture*. В лабораторном практикуме с целью сокращения непродуктивных затрат времени на выполнение работ пользователю представляются предварительно подготовленные и апробированные файлы проектов с эквивалентными схемами замещения для каждого из исследуемых полупроводниковых приборов и выполняемых лабораторных заданий. Они включают файлы

проектов для исследования ВАХ полупроводниковых приборов, файлы проектов для исследования технологического разброса и файлы проектов для исследования работы полупроводниковых приборов на переменном токе. Файлы проектов размещены в папке *Electronica*. Структура каталога для поиска файлов приведена на рис. 4.1.

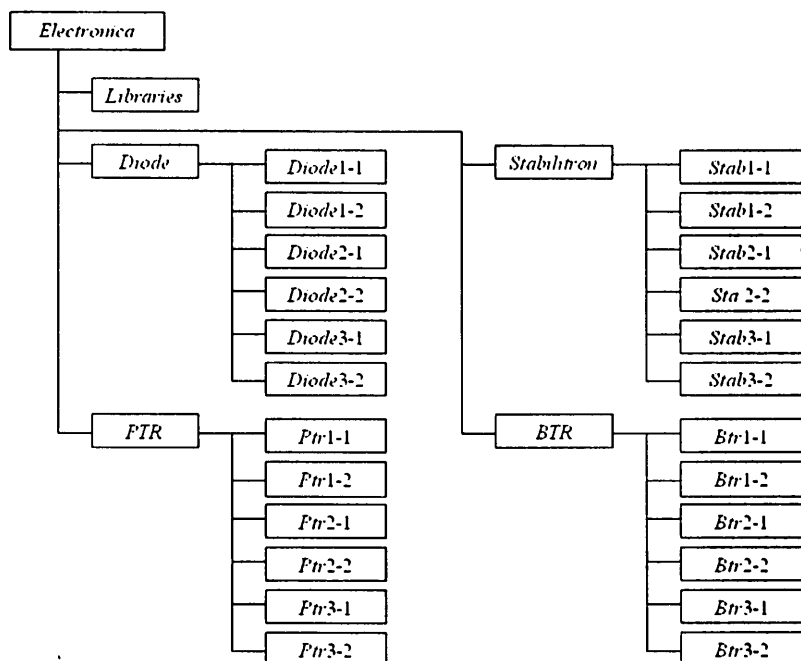


Рис. 4.1. Структура каталогов

Эквивалентные схемы замещения для исследования ВАХ полупроводниковых приборов (файлы проектов *Diode1-1*, *Diode1-2*, *Diode2-1*, *Diode2-2*, *Stab1-1*, *Stab1-2*, *Stab2-1*, *Stab2-2*, *Ptr1-1*, *Ptr1-2*, *Ptr2-1*, *Ptr2-2*, *Btr1-1*, *Btr1-2*, *Btr2-1*, *Btr2-2*) построены на основе схем измерения ВАХ методом вольтметра-амперметра, рассмотренным в главе 2. Средства OrCAD обеспечивают непосредственное определение тока в указанной маркером ветви схемы, что позволяет использовать простейшие схемы измерения ВАХ с управляемыми источниками ЭДС и тока, которые, в отличие от схем измерения, применяемых в лабораторных стендах АПК УД «Электроника», не содержат токоизмерительных резисторов (рис. 2.2).

Эквивалентные схемы замещения для исследования работы полупроводниковых приборов на переменном токе (файлы проектов *Diode3-1*, *Diode3-2*, *Stab3-1*, *Stab3-2*, *Ptr3-1*, *Ptr3-2*, *Btr3-1*, *Btr3-2*) непосредственно соответствуют схемам измерения объектных модулей АПК «Электроника».

В лабораторном практикуме в ряде вариантов задания моделирование на ПЭВМ выполняется совместно с экспериментальными исследованиями в соответствии с заданиями, приводимыми в методических указаниях к лабораторным работам в главе 5. Моделирование дополнительно предусматривает исследования температурных и частотных свойств полупроводниковых приборов, которые не реализуются средствами АПК УД «Электроника». Содержание и объем проводимых исследований могут также задаваться преподавателем в индивидуальном порядке.

Организация исследований с использованием математического моделирования в рамках сетевой лаборатории описана в главе 6.

При проведении исследований в автономном режиме необходимо:

- запустить графический редактор схем Capture (Пуск – Программы – OrCAD demo – Capture CIS Demo);
- открыть файл проекта, соответствующий проводимым исследованиям (меню *File – Open – Project*).

После запуска файла проекта открывается *менеджер проекта*, который расположен в левой части экрана программы *Capture* (рис. 4.2).

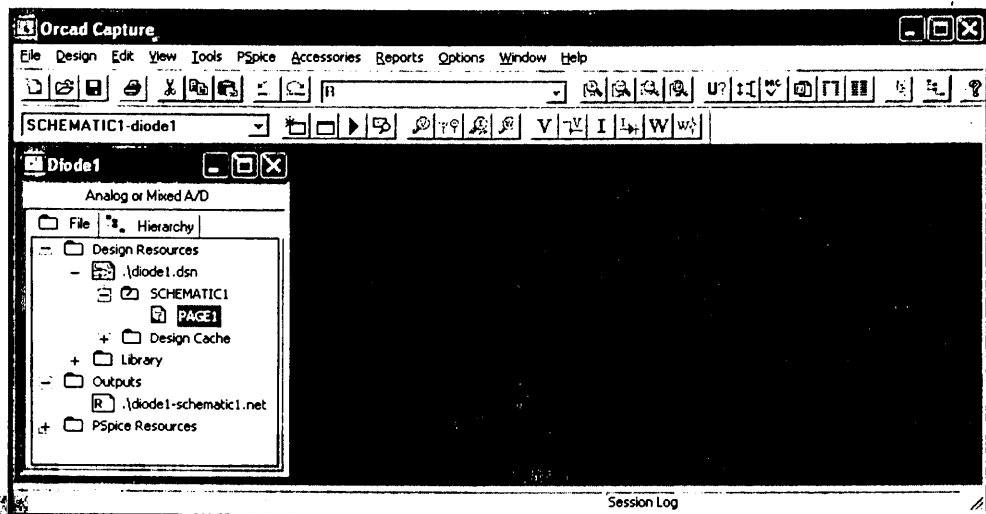


Рис. 4.2. Менеджер проекта

В режиме *File* разворачивается плоская файловая структура проекта, в режиме *Hierarchy* – его иерархическая структура. Файловая структура проекта содержит ряд разделов:

- *Design Resource* – описание проекта (файл проекта *.dsn, отдельные страницы схемы, перечень компонентов *Design Cache*, VHDL-файлы, перечень используемых библиотек компонентов *.olb);

- *Outputs* – результаты проектирования;
- *PSpice Resource* – информация для моделирования (*Include Files, Model Library, Simulation Profiles, Stimulus Files*) и др.

Двойной щелчок левой кнопкой мыши по имени конкретного файла или по его значку загружает его в соответствующий редактор (при выборе файла схем загружается редактор схем, при выборе текстового файла – встроенный текстовый редактор).

На рис. 4.3 показано окно редактора страницы принципиальной схемы, на которой расположены дополнительные панели инструментов.

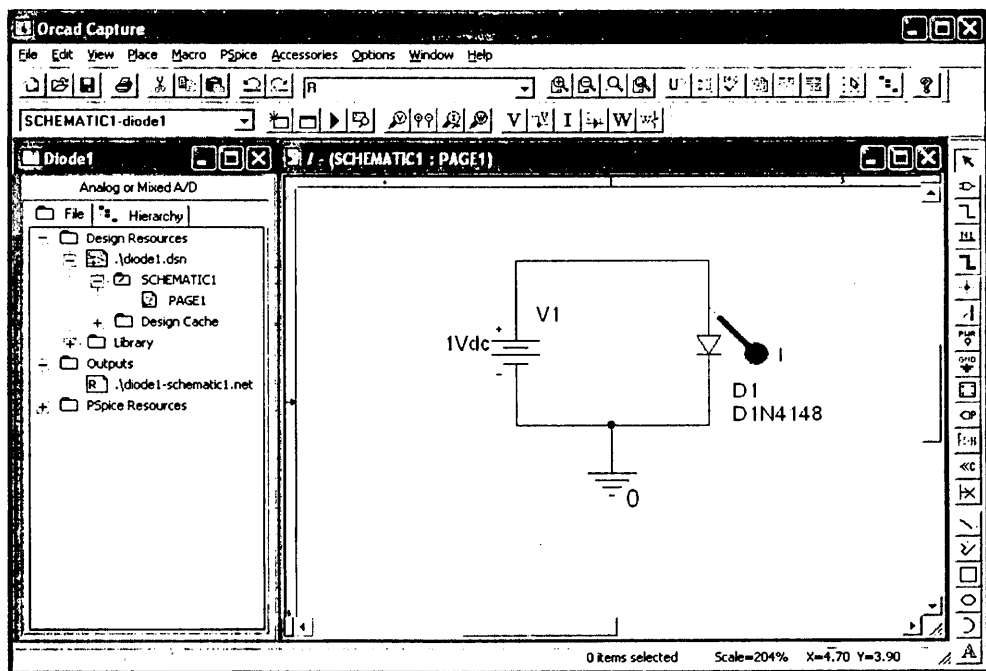


Рис. 4.3. Окно редактора страницы принципиальной схемы

Перечень используемых команд, соответствующих пиктограммам панели инструментов в режиме редактирования схем, приведен в табл. 4.1. Перечень команд, соответствующих пиктограммам панели инструментов в режиме моделирования, приведен в табл. 4.2.

Подключение библиотеки с математическими моделями исследуемых радиокомпонентов осуществляется в меню *Simulation setting* на вкладке *Libraries*. Нажатием на клавишу *Browse* выбирается файл библиотеки *Electronica.lib*, находящийся в каталоге *Libraries*, который активацией клавиши *Add to Design* подключается к проекту.

Таблица 4.1. Пиктограммы панели инструментов режима редактирования схем

Пиктограмма	Эквивалентная схема	Описание команды
	<i>Select</i>	Режим выбора объектов
	<i>Place Part</i>	Выбор в библиотеке компонента для размещения его символа на схеме
	<i>Place Wire</i>	Рисование электрических цепей. При нажатии кнопки <i>Shift</i> возможен ввод неортогональных цепей
	<i>Place Ground</i>	Размещение символов выводов источников питания и «земли»

Таблица 4.2. Пиктограммы панели инструментов режима моделирования

Пиктограмма	Эквивалентная схема	Описание команды
	<i>New Simulation Profile</i>	Создание нового файла задания на моделирование
	<i>Edit Simulation Setting</i>	Редактирование задания на моделирование
	<i>Run PSpice</i>	Запуск программы <i>PSpice</i> на моделирование
	<i>View Simulation Results</i>	Просмотр графических результатов моделирования
	<i>Voltage/Level Marker</i>	Установка маркера напряжения/логического уровня
	<i>Current Marker</i>	Установка маркера тока
	<i>Voltage Differential Markers</i>	Установка двух маркеров разности напряжений

В последующих параграфах излагаются общие алгоритмы выполнения лабораторных исследований полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ. Пользователи, имеющие навыки работы в среде *OrCAD*, могут выполнять эти задания в соответствии с самостоятельно разработанными методиками.

4.2. Исследование на ПЭВМ выпрямительных диодов

4.2.1. Исследование ВАХ и параметров выпрямительного диода

Для проведения исследования ВАХ и параметров выпрямительного диода необходимо запустить соответствующий файл проекта:

- **Diode1-1.opj** – при исследовании математической модели кремниевого диода КД521В (каталог *Diode1-1*, рис. 4.1);
- **Diode1-2.opj** – при исследовании математической модели германиевого диода ГД507А (каталог *Diode1-2*, рис. 4.1).

Исследование ВАХ и параметров выпрямительного диода проводится в соответствии с эквивалентной схемой замещения, приведенной на рис. 4.4.

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току *DC Sweep*.

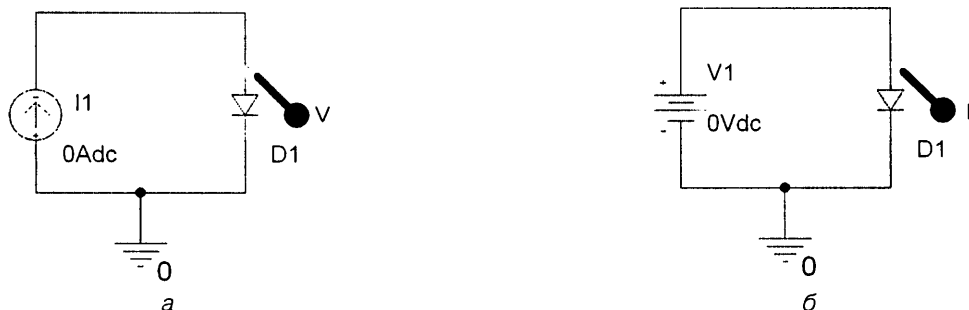


Рис. 4.4. Эквивалентные схемы замещения для исследования прямой (а) и обратной (б) ветвей ВАХ выпрямительного диода: D1 – исследуемый диод; I1 – источник тока; V1 – источник напряжения¹

4.2.1.1. Методика исследования прямой ветви ВАХ выпрямительного диода

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation Setting* (см. параграф 4.1) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьлируемой переменной (*Sweep Variable*) указывается источник тока (*Current source*) I1 и задаются пределы его перестройки в соответствии с предельно допустимыми параметрами диода, приведенными в приложении 3. В поле *Start Value* (рис. 4.5) устанавливается начальное значение I1, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение приращения I1; способ изменения (*Sweep Type*) – *Linear* (линейный).
2. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *PsPice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PsPice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture* (см. параграф 4.1).
3. Для отображения результатов моделирования в виде зависимости тока диода от напряжения на диоде в программе моделирования аналоговых и сме-

¹ Графика символов в главе 4 приведена в соответствии с графикой программного обеспечения OrCAD 9.1.

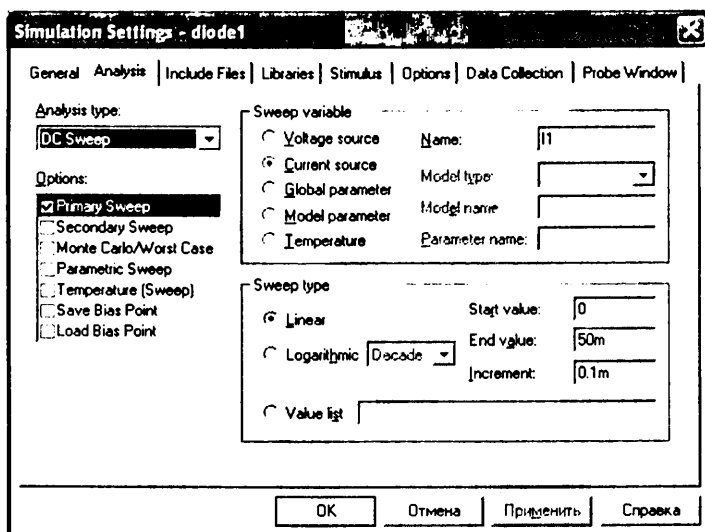


Рис. 4.5. Установка параметров источника тока I1

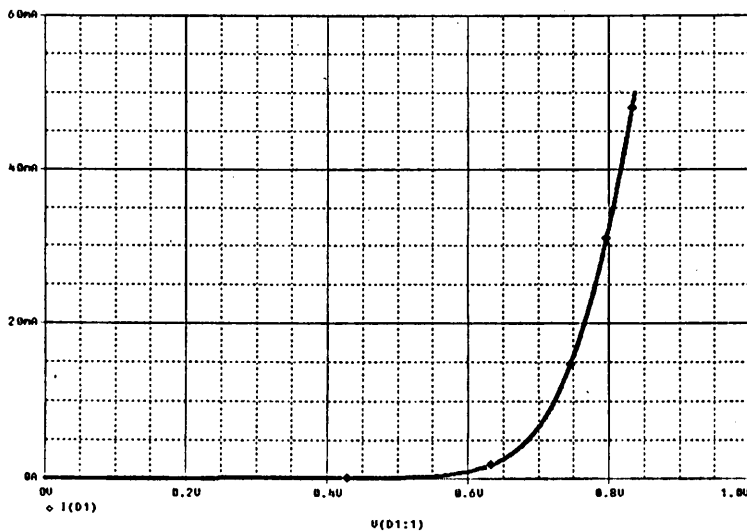


Рис. 4.6. Прямая ветвь ВАХ диода 1N4148

шанных устройств *PSpice A/D* в качестве аргумента по оси *ox* указывается напряжение на диоде (меню *Plot – Axis Setting – закладка X axis – клавиша Axis variable*). В качестве переменной по оси *oy* устанавливается ток диода (меню *Trace – Add Trace*).

Результаты моделирования приведены на рис. 4.6. Полученный график соответствует прямой ветви ВАХ выпрямительного диода 1N4148.

4.2.1.2. Методика исследования обратной ветви ВАХ выпрямительного диода

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation Setting* (см. параграф 4.1) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемой переменной (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения (*Voltage source*) V1 и задаются соответствующие пределы его перестройки. В поле *Start Value* (рис. 4.7) устанавливается начальное значение V1, в поле *End Value* – конечное значение, V1, в поле *Increment* – значение приращения; способ изменения (*Sweep Type*) – *Linear* (линейный).

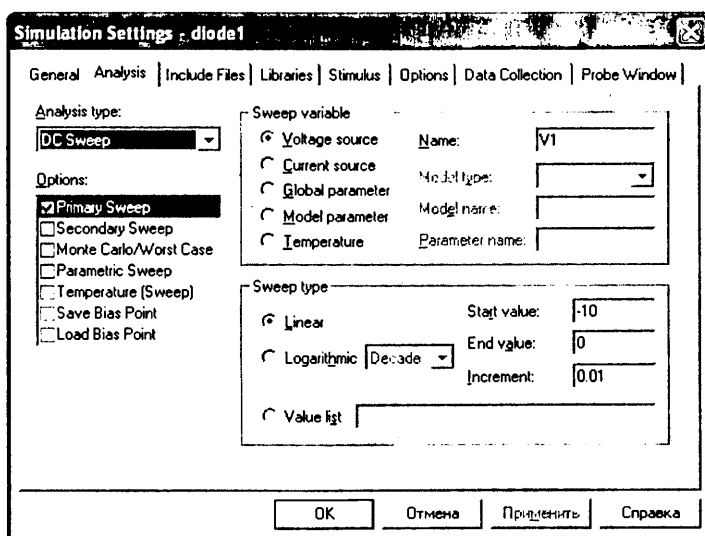


Рис. 4.7. Установка параметров источника напряжения V1

2. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Ps spice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run Ps spice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture* (см. параграф 4.1).

Результаты моделирования приведены на рис. 4.8. Полученный график соответствует обратной ветви ВАХ выпрямительного диода 1N4148.

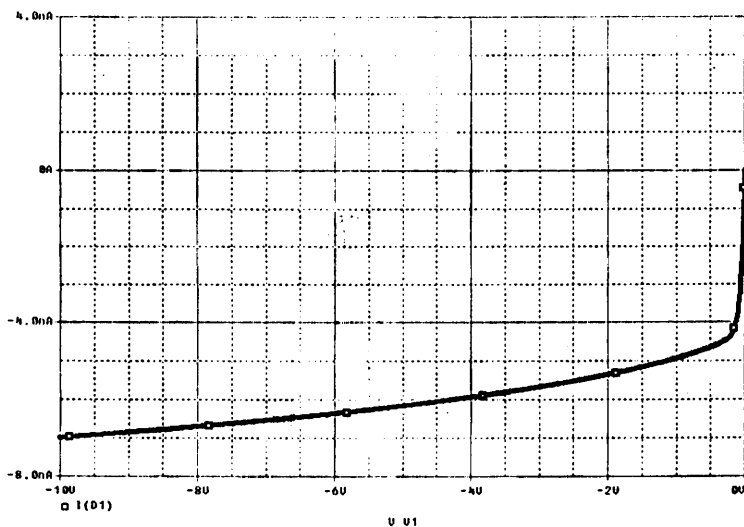


Рис. 4.8. Обратная ветвь ВАХ диода 1N4148

4.2.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов

Для проведения исследования технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительного диода необходимо запустить соответствующий файл проекта:

- *Diode2-1.opj* – при исследовании математической модели кремниевого диода КД521В (каталог *Diode2-1*, рис. 4.1);
- *Diode2-2.opj* – при исследовании математической модели германиевого диода ГД507А (каталог *Diode2-2*, рис. 4.1).

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительного диода проводится на основе эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 4.9.

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току *DC Sweep* и статистического анализа по методу Монте-Карло (*Monte-Carlo*). Параметром технологического разброса является объемное сопротивление *RS* математической модели диода (см. приложение 2).

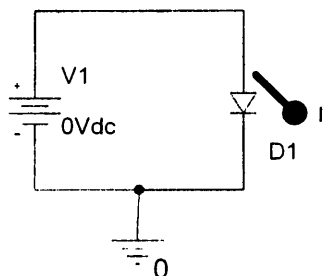


Рис. 4.9. Эквивалентная схема замещения для исследования технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительного диода:

D1 – исследуемый диод; V1 – источник напряжения

4.2.2.1. Методика исследования технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительного диода

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.10) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемой переменной (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения (*Voltage source*) V1 (рис. 4.10) и задаются соответствующие пределы его перестройки. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение V1, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения V1; способ изменения (*Sweep Type*) – *Linear* (линейный). Конечное значение V1 задается в соответствии с результатами моделирования (см. параграф 4.2.1.1).

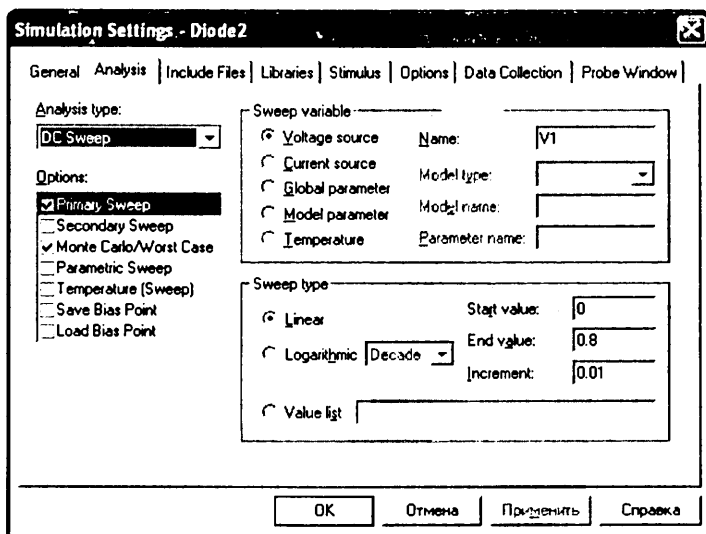


Рис. 4.10. Установка параметров источника напряжения V1

2. Активируется меню *Monte-Carlo/Worst Case* (рис. 4.11). В поле *Output variable* (выходная переменная) указывается *I(D1)*, в поле *Numbers of runs* (число статистических испытаний) – 5, в меню *Use distribution* (закон распределения) – *Gaussian*, в меню *Save data from* (сохранить данные) – *All* (создаются и выводятся все выходные данные, включая статистические расчеты при номинальных данных параметров).
3. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схмотехнического редактора *Capture*.

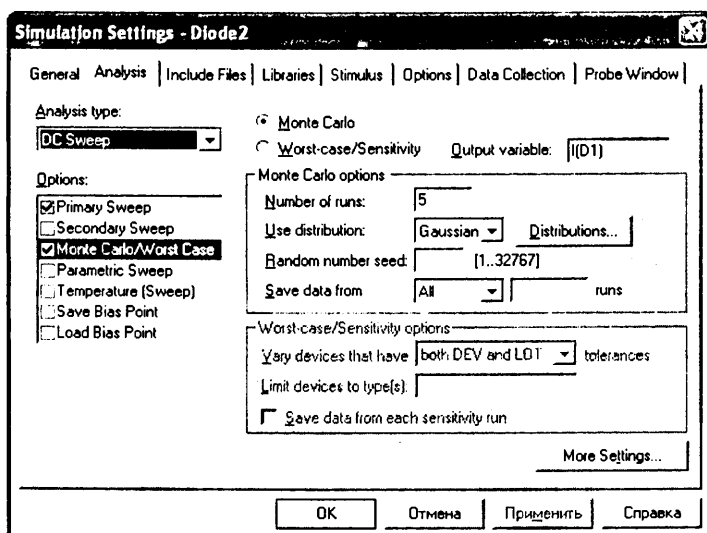


Рис. 4.11. Установка параметров анализа по методу Монте-Карло

На рис. 4.12 приведена прямая ветвь ВАХ выпрямительного диода 1N4148 с учетом технологического разброса.

Для изменения масштаба отображения в программе моделирования аналоговых и смешанных устройств *OrCAD PSpice A/D* необходимо установить требуемые значения напряжения по оси *ox* в меню *Plot – Axis Setting – X axis*.

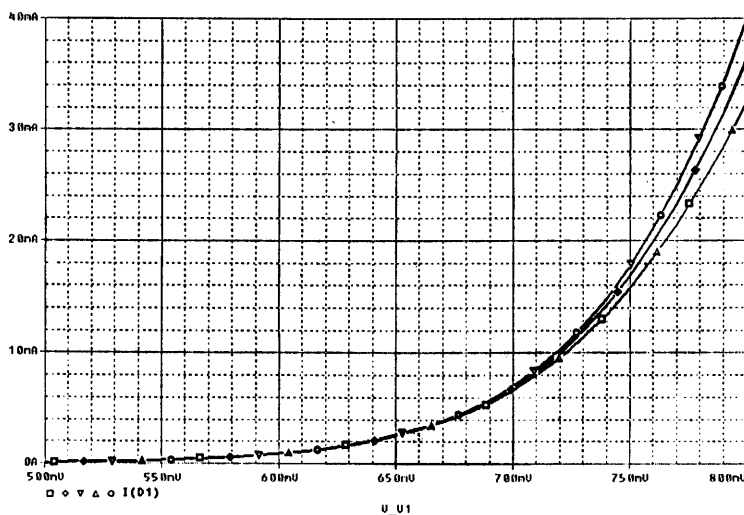


Рис. 4.12. Прямая ветвь ВАХ выпрямительного диода с учетом технологического разброса

4.2.3. Исследование работы выпрямительного диода на переменном токе

Для проведения исследования работы выпрямительного диода на переменном токе необходимо запустить соответствующий файл проекта:

- *Diode2-1.opj* – при исследовании на основе математической модели кремниевых диодов КД521В (каталог *Diode2-1*, рис. 4.1);
- *Diode2-2.opj* – при исследовании на основе математической модели германиевых диодов ГД507А (каталог *Diode2-2*, рис. 4.1).

Исследование работы выпрямительного диода на переменном токе проводится на основе эквивалентной схемы замещения однополупериодного выпрямителя (рис. 4.13).

Исследование осуществляется при помощи процедуры анализа во временной области *Transient*.

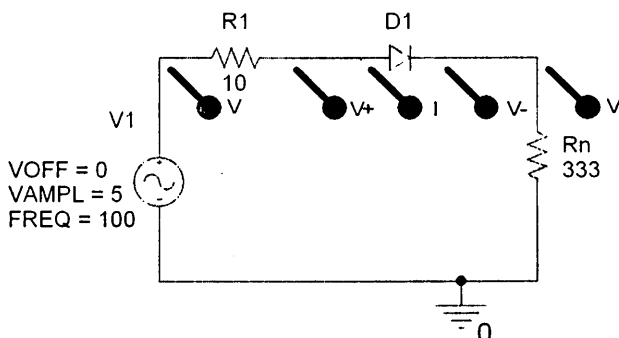


Рис. 4.13. Эквивалентная схема замещения для исследования работы выпрямительного диода на переменном токе: D1 – исследуемый диод; V1 – источник напряжения; R1 – внутреннее сопротивление источника V1; Rn – сопротивление нагрузки

4.2.3.1. Методика исследования работы выпрямительного диода в схеме однополупериодного выпрямителя

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V1 (*VOFF* – смещение, *VAMPL* – амплитуда переменной составляющей).
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.14) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается процедура анализа *Transient*. В поле *Run to time* задается конечное время анализа, в поле *Start saving data after* – начальный момент вывода результатов моделирования, в поле *Maximum step size* – максимальное значение шага интегрирования из расчета не менее 50 точек на период.

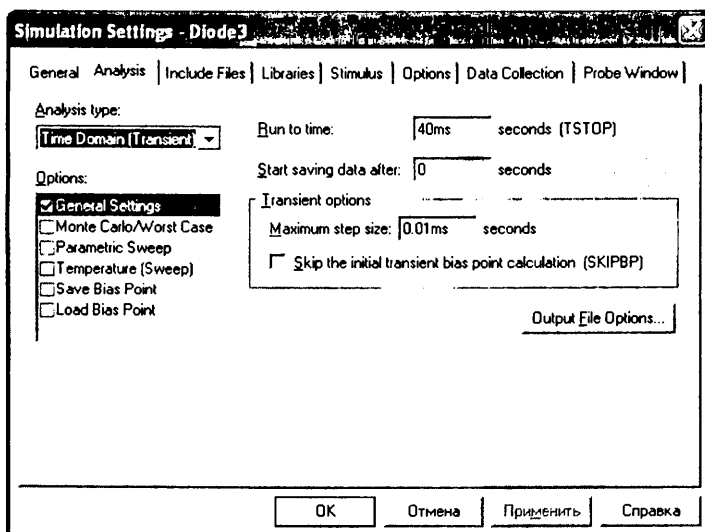


Рис. 4.14. Установка параметров моделирования

3. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.
4. Для исследования работы выпрямителя на активно-емкостную нагрузку необходимо включить в схему конденсатор C_n , вызвав его из библиотеки *Analog.OLB* и поместив на рабочее поле схемотехнического редактора *Capture* (см. параграф 4.1). В результате схема должна принять вид согласно рис. 4.15.

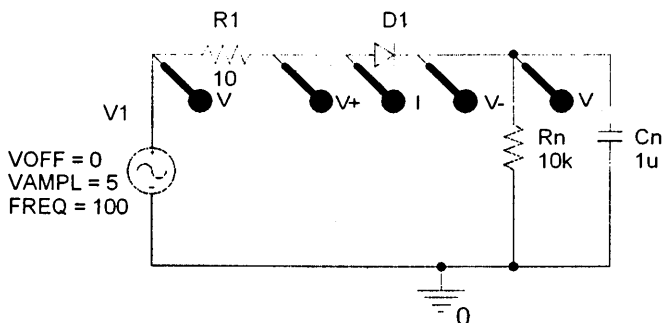
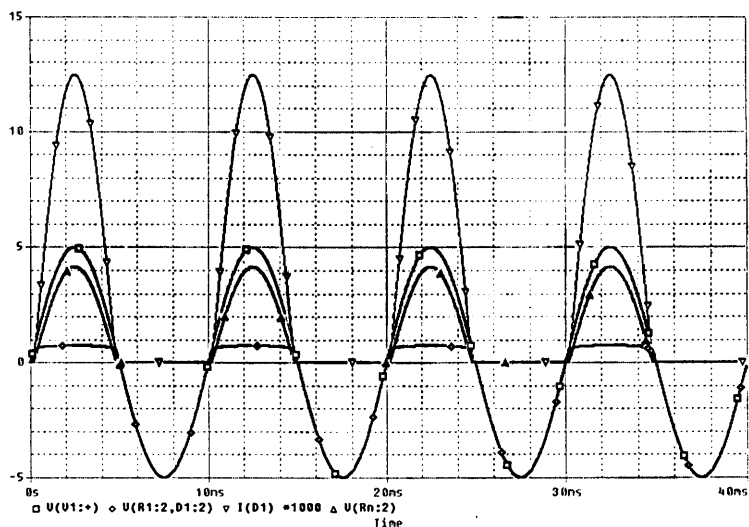
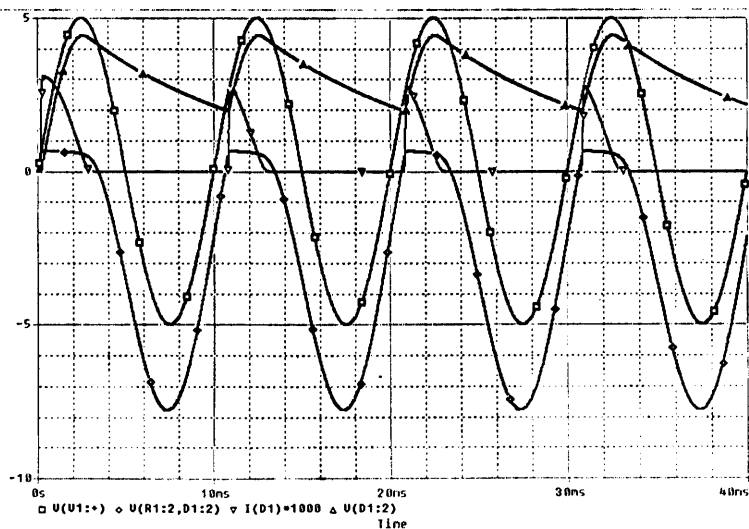


Рис. 4.15. Эквивалентная схема замещения для исследования работы выпрямительного диода на переменном токе на активно-емкостную нагрузку:
 D1 – исследуемый диод; V1 – источник напряжения; R1 – внутреннее сопротивление источника V1; Rn, Cn – сопротивление и емкость нагрузки

На рис. 4.16 приведены результаты моделирования. Они представляют осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках исследуемой схемы однополупериодного выпрямителя на полупроводниковом диоде.



а



б

Рис. 4.16. Осциллограммы напряжений и токов в точках схемы однополупериодного выпрямителя: а – работа на активную нагрузку; б – работа на активно-емкостную нагрузку

4.2.3.2. Методика исследования работы выпрямительного диода в схеме двухполупериодного выпрямителя

Исследование работы диода в схеме двухполупериодного выпрямителя осуществляется при помощи процедуры анализа во временной области *Transient*.

Исследование включает следующие этапы.

1. Средствами схемотехнического редактора *Capture* создается эквивалентная схема замещения согласно рис. 4.17.

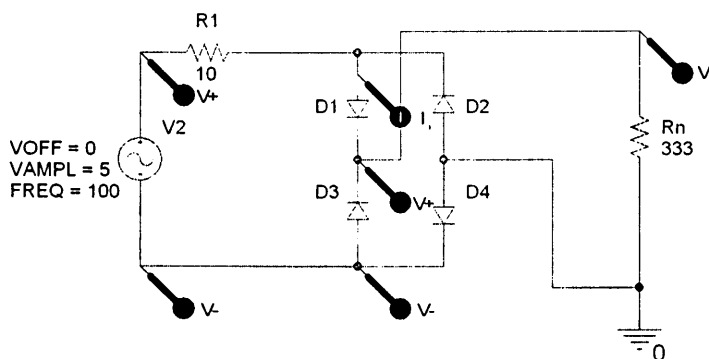


Рис. 4.17. Эквивалентная схема замещения для исследования работы выпрямительного диода в схеме двухполупериодного выпрямителя для случая активной нагрузки: D1–D4 – исследуемые диоды; V2 – источник напряжения; R1 – внутреннее сопротивление источника V2; Rn – сопротивление нагрузки

2. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V1 (*VOFF* – смещение, *VAMPL* – амплитуда переменной составляющей).
3. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.18) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается *Transient*. В поле *Run to time* – конечное время анализа, в поле *Start saving data after* – начальный момент вывода результатов моделирования, в поле *Maximum step size* – максимальное значение шага интегрирования из расчета не менее 50 точек на период.
4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.
5. Для исследования работы выпрямителя на активно-емкостную нагрузку необходимо включить в схему конденсатор Cn, вызвав его из библиотеки *Analog.OLB* и поместив его на рабочее поле схемотехнического редактора *Capture* (см. параграф 4.1). В результате схема должна принять вид в соответствии с рис. 4.19.

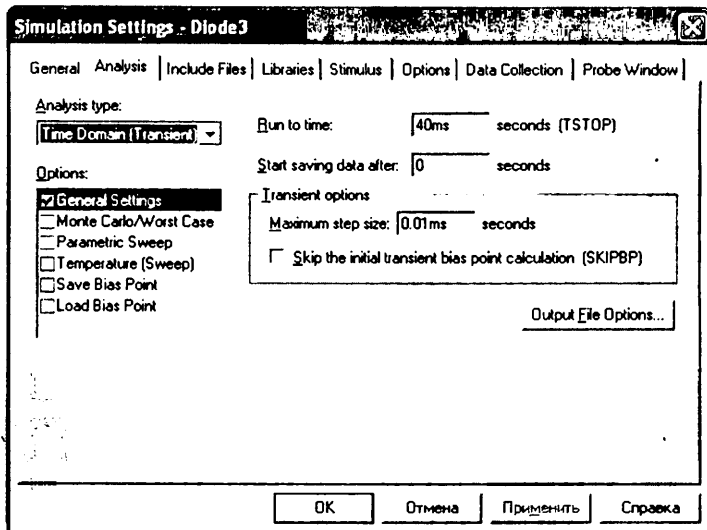


Рис. 4.18. Установка параметров моделирования

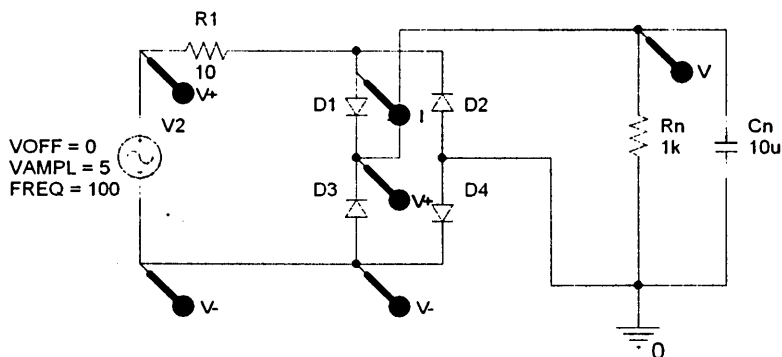
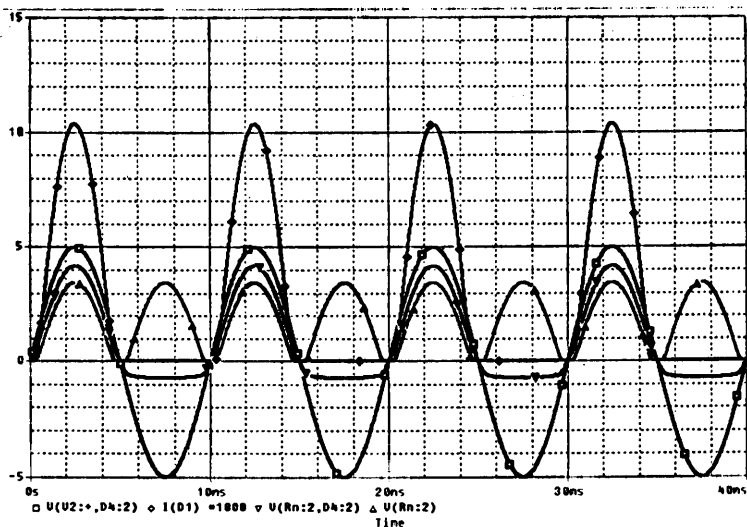
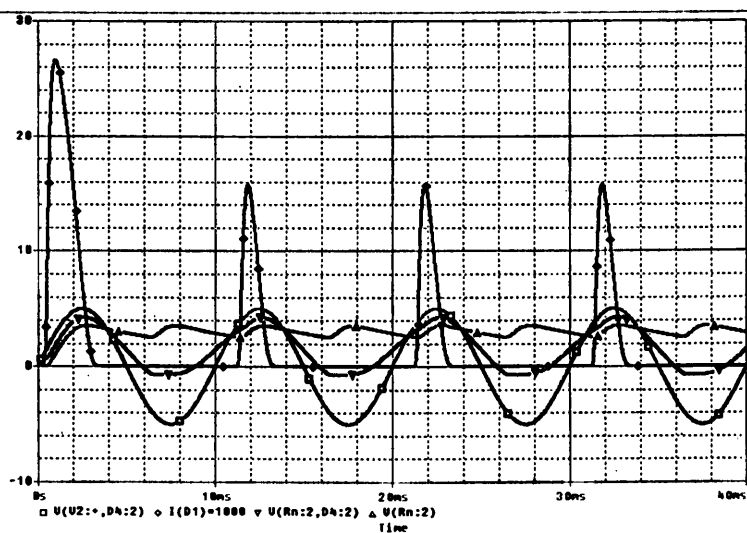


Рис. 4.19. Эквивалентная схема замещения стэнда, используемая для исследования работы выпрямительного диода в схеме двухполупериодного выпрямителя для случая активно-емкостной нагрузки: D1–D4 – исследуемые диоды; V2 – источник напряжения; R1 – внутреннее сопротивление источника V2; Rn, Cn – сопротивление и емкость нагрузки

На рис. 4.20 приведены результаты моделирования. Результаты представляют осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках исследуемой схемы двухполупериодного выпрямителя на полупроводниковых диодах.



а



б

Рис. 4.20. Осциллограммы напряжений и токов в точках схемы:
а – работа на активную нагрузку, б – работа на активно-емкостную нагрузку

4.3. Исследование на ПЭВМ стабилитронов

4.3.1. Исследование ВАХ и параметров стабилитрона

Начальным шагом проводимого исследования является запуск соответствующего файла проекта:

- *Stab1-1.opj* – при исследовании математической модели стабилитрона КС147А (каталог *Stab1-1*, рис. 4.1);
- *Stab1-2.opj* – при исследовании математической модели стабилитрона КС133 (каталог *Stab1-2*, рис. 4.1).

Исследование ВАХ и параметров стабилитрона проводится на основе эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 4.21.

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току *DC Sweep*.

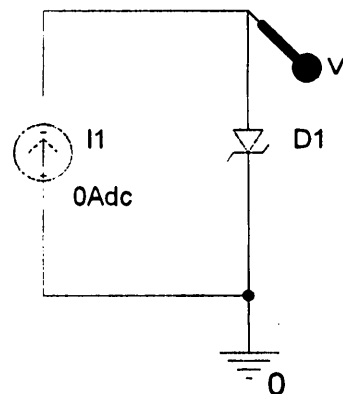


Рис. 4.21. Эквивалентная схема замещения, используемая для исследования ВАХ и параметров стабилитрона:
D1 – исследуемый стабилитрон

4.3.1.1. Методика исследования прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитрона

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.22) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемой переменной (*Sweep Variable*) указывается источник тока (*Current source*) I1 и задаются пределы его перестройки в соответствии с предельно допустимыми параметрами, приведенными в приложении 3. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение тока, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение приращения; способ изменения (*Sweep Type*) – *Linear* (линейный).
2. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture* (см. параграф 4.1).

На рис. 4.23 результаты моделирования представлены в виде графика ВАХ стабилитрона 1N4732.

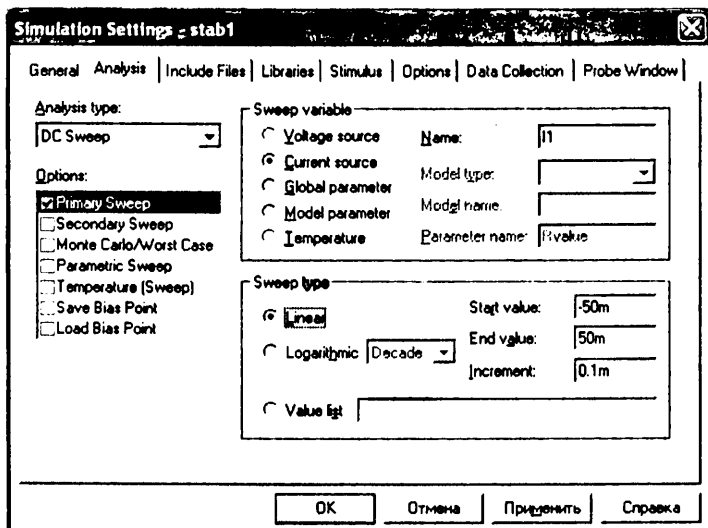


Рис. 4.22. Установка параметров источника тока I1

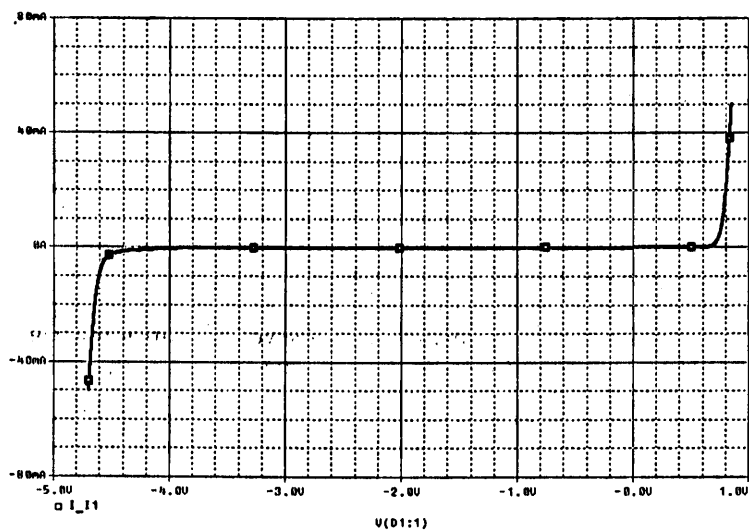


Рис. 4.23. ВАХ стабилитрона 1N4732

4.3.1.2. Методика исследования характеристик стабилизации $U_{ct} = f(E)$ при различных сопротивлениях нагрузки стабилитрона

Исследование характеристик стабилизации осуществляется на основе эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 4.24, при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току *DC Sweep* при различных значениях сопротивления нагрузки R_n .

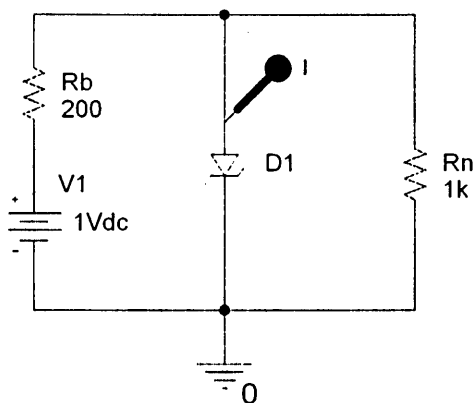


Рис. 4.24. Эквивалентная схема замещения для исследования характеристик стабилизации: D1 – исследуемый стабилитрон; V1 – источник напряжения; Rb – балластное сопротивление; Rn – сопротивление нагрузки

Исследование включает следующие этапы.

1. После запуска файла проекта эквивалентная схема замещения средствами схемотехнического редактора *Capture* (см. параграф 4.1) приводится к виду, представленному на рис. 4.24.
2. Изменяется номинал резистора R_n на значение $\{Rvalue\}$ и определяется как глобальный параметр:
 - помещается элемент *PARAM* из библиотеки *SPECIAL.OLB* на рабочее поле схематического редактора *Capture*;
 - дважды щелкается по элементу *PARAM* для отображения *Property Editor*;
 - создается новый атрибут через подпункт меню *New row* и вводится название *Rvalue* (рис. 4.25).

В результате эквивалентная схема замещения примет вид согласно рис. 4.26.

3. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.27) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемой переменной (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения (*Voltage source*) V1 и задаются соответ-

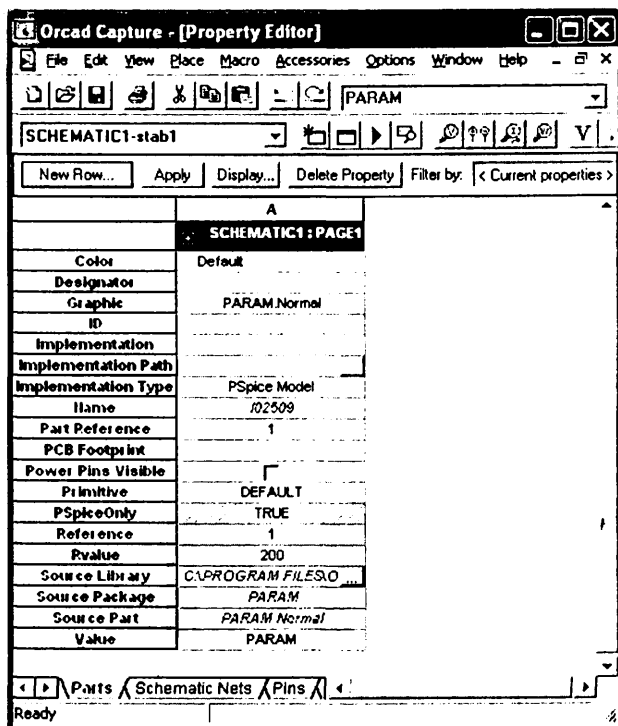


Рис. 4.25. Создание нового атрибута элемента PARAM

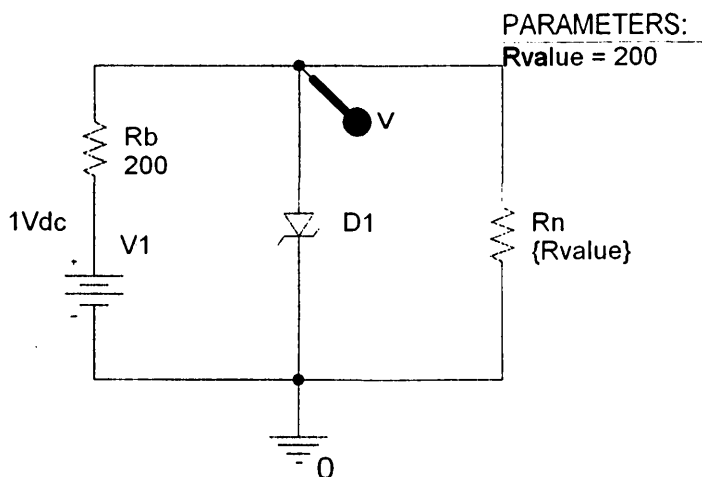


Рис. 4.26. Эквивалентная схема замещения для исследования нагрузочных характеристик стабилитрона (номинал резистора Rn указан в качестве глобального параметра)

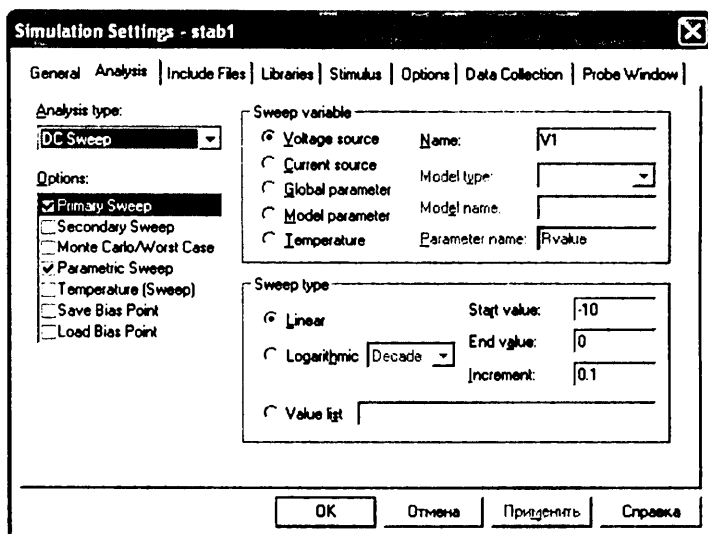


Рис. 4.27. Установка пределов перестройки источника напряжения V1

ствующие пределы его перестройки в соответствии с параграфом 4.3.1.1. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага; способ изменения (*Sweep Type*) – *Linear* (линейный).

4. На вкладке *Parametric Sweep* задаются значения Rn (рис. 4.28).

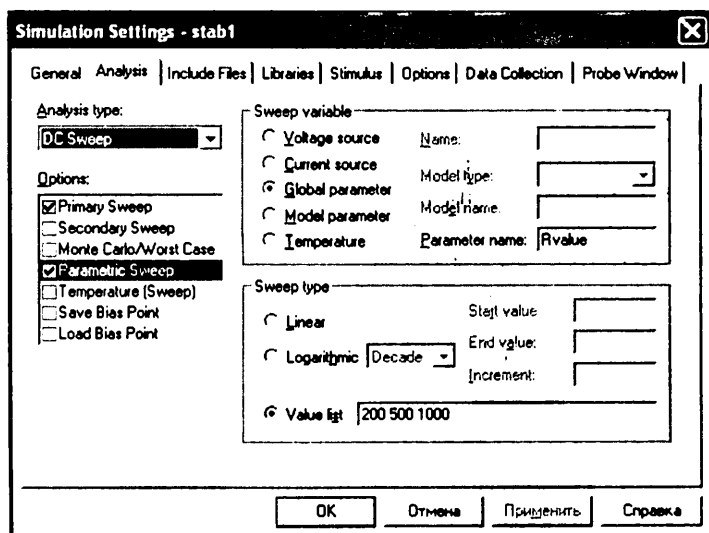


Рис. 4.28. Установка значений Rn

5. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования показаны на рис. 4.29. Это семейство исследуемых характеристик стабилизации для исследуемого стабилизатора.

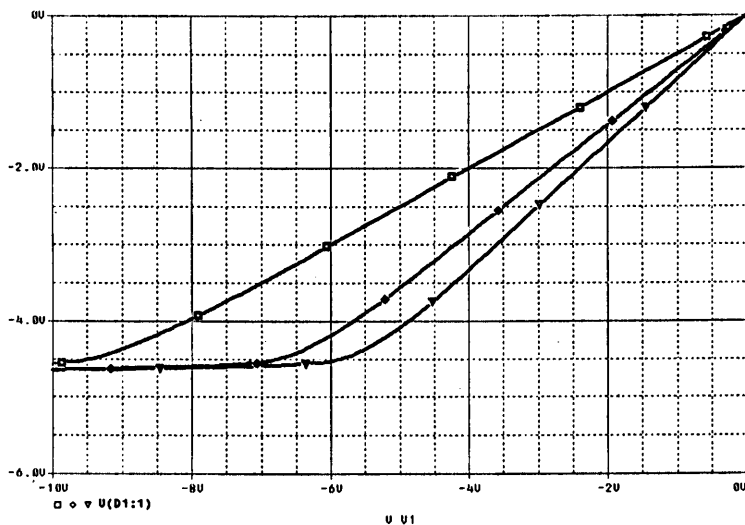


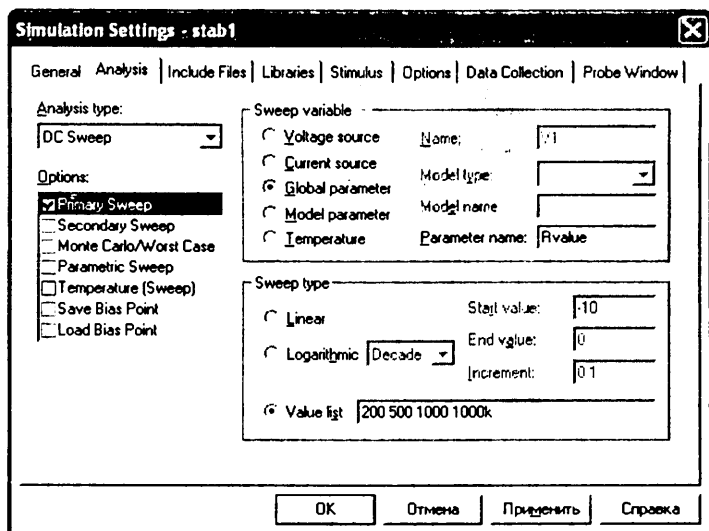
Рис. 4.29. Семейство характеристик стабилизации для стабилизатора 1N4732

4.3.1.3. Методика исследования нагрузочных характеристик стабилизатора $U_{cm} = f(I_n)$

Исследование нагрузочных характеристик $U_{cm} = f(I_n)$ осуществляется на основе эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 4.20, при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току *DC Sweep* для следующих значений сопротивления нагрузки: $R_n = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$, 1 МОм (значение 1 МОм эквивалентно $R_n = \infty$) при фиксированном значении источника напряжения $V_1 = -10 \text{ В}$.

Исследование включает следующие этапы.

1. По аналогии с параграфом 4.3.1.2 номинал резистора R_n изменяется на значение $\{Rvalue\}$ и определяется как глобальный параметр.
2. В меню *Edit Simulation setting* на вкладке *Parametric Sweep* задаются необходимые значения сопротивления R_n (рис. 4.30).
3. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

Рис. 4.30. Установка значений R_n

На рис. 4.31 приведены результаты моделирования. Они представляют зависимость напряжения стабилизации от тока нагрузки для исследуемого стабилизатора.

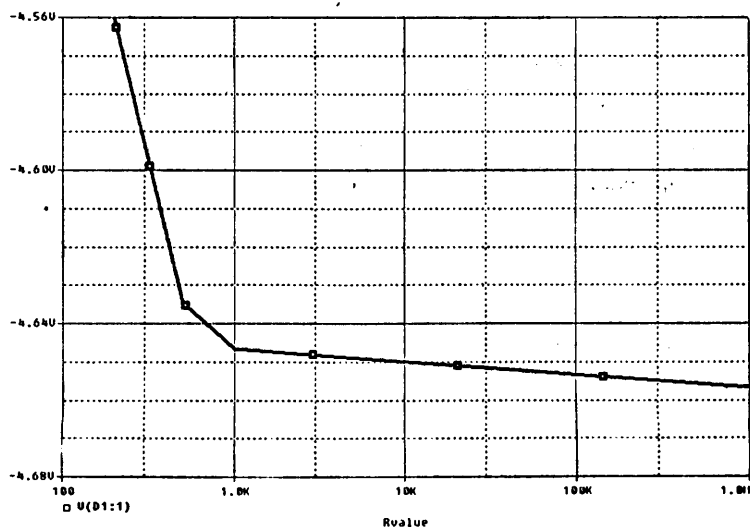


Рис. 4.31. Нагрузочная характеристика для стабилизатора 1N4732

4.3.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона

Для проведения исследования технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона необходимо запустить соответствующий файл проекта:

- *Stab2-1.opj* – при исследовании математической модели стабилитрона KC147A (каталог *Stab2-1*, рис. 4.1);
- *Stab2-2.opj* – при исследовании математической модели стабилитрона KC133 (каталог *Stab2-2*, рис. 4.1).

Исследование проводится на основе эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 4.32.

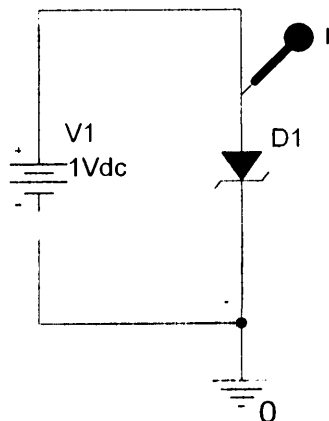


Рис. 4.32. Эквивалентная схема замещения для исследования технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона: D1 – исследуемый стабилитрон; V1 – источник напряжения

4.3.2.1. Методика исследования технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров стабилитрона осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) и статистического анализа по методу Монте-Карло (*Monte-Carlo*).

Полагается, что технологический разброс вызывается статистическим отклонением обратного напряжения пробоя стабилитрона, которое задается параметром его математической модели *BV* (см. приложение 2).

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.33) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемой переменной (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения (*Voltage source*) V1 и задаются пределы его перестройки в соответствии с результатами моделирования, приведенными в параграфе 4.3.1.1. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага; способ изменения (*Sweep Type*) – *Linear* (линейный).
2. Активируется меню *Monte-Carlo/Worst Case* (рис. 4.34). В поле *Output variable* (выходная переменная) указывается ток стабилитрона *I(D1)*, в поле *Numbers of runs* (число статистических испытаний) – 5, в меню *Use distribution* (закон распределения) – *Gaussian*, в меню *Save data from* (сохранить данные) – *All* (создаются и выводятся все выходные данные, включая статистические расчеты при номинальных данных параметров).

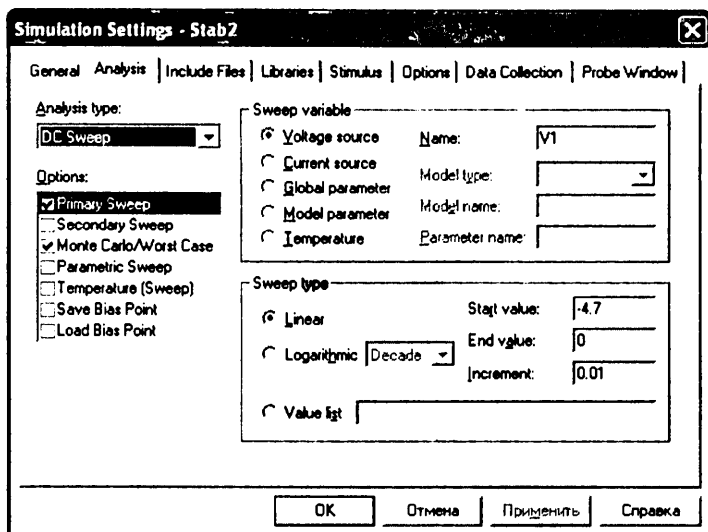


Рис. 4.33. Установка параметров источника напряжения V1

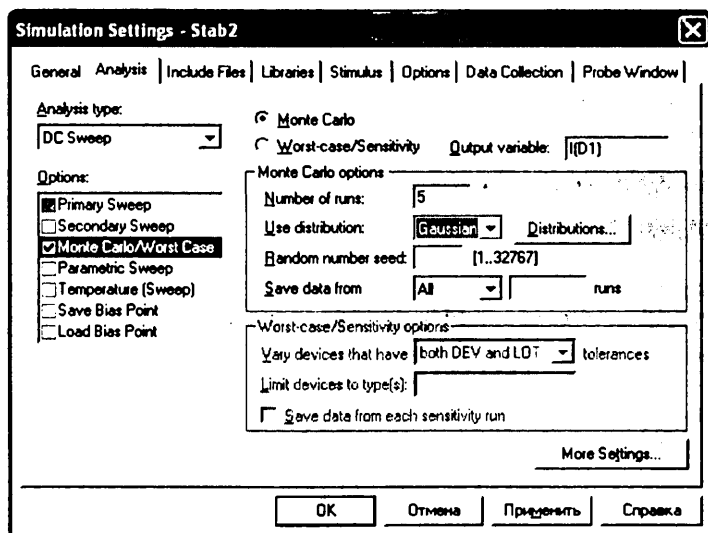


Рис. 4.34. Установка параметров анализа по методу Монте-Карло

3. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования показаны на рис. 4.35. Они представляют семейство ВАХ стабилитрона 1N4732, отличающихся значениями обратного напряжения пробоя.

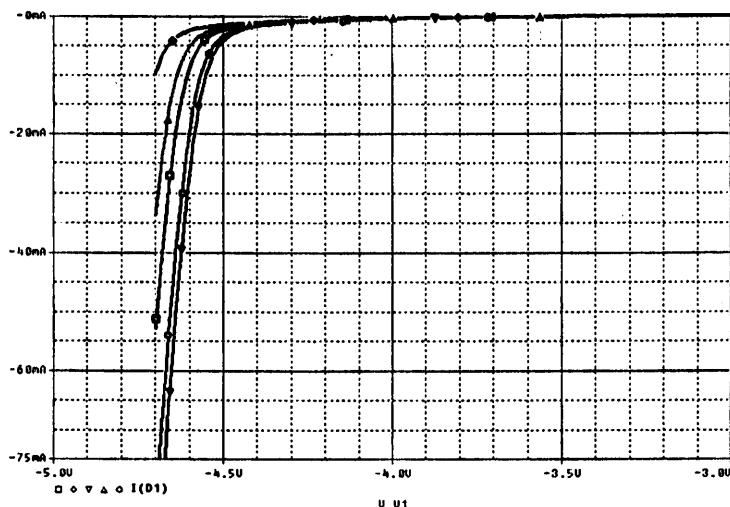


Рис. 4.35. ВАХ стабилитрона 1N4732 с учетом технологического разброса

4.3.3. Исследования работы стабилитрона на переменном токе

Для проведения исследования работы стабилитрона на переменном токе необходимо запустить соответствующий файл проекта:

- *Stab3-1.opj* – при исследовании на основе математической модели стабилитрона КС147А (каталог *Stab3-1*, рис. 4.1);
- *Stab3-2.opj* – при исследовании на основе математической модели стабилитрона КС133 (каталог *Stab3-2*, рис. 4.1).

Исследование проводится на основе эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 4.36.

4.3.3.1. Методика исследования работы стабилитрона на переменном токе

Исследование работы стабилитрона на переменном токе осуществляется при помощи процедуры анализа во временной области *Transient*.

Исследование включает следующие этапы.

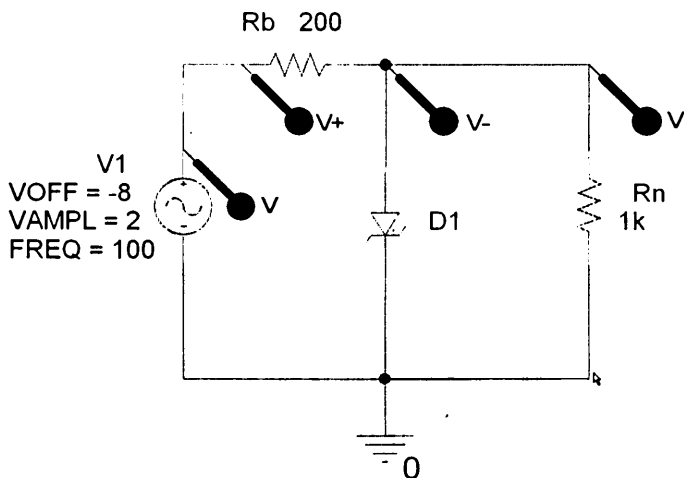


Рис. 4.36. Эквивалентная схема замещения для исследования работы стабилитрона на переменном токе: D1 – исследуемый стабилитрон; V1 – источник напряжения; Rb – балластное сопротивление; Rn – сопротивление нагрузки

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V1 (*VOFF* – смещение, *VAMPL* – амплитуда переменной составляющей).
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.37) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается процедура анализа *Transient* и устанавливаются параметры

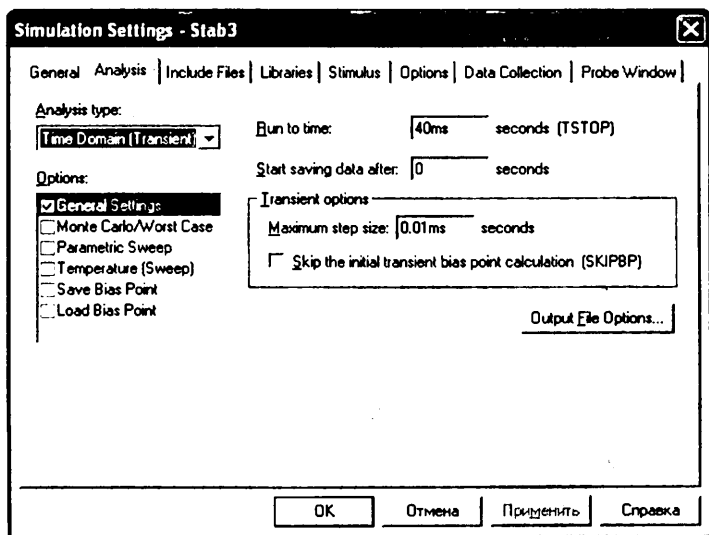


Рис. 4.37. Установка параметров моделирования

моделирования: в поле *Run to time* – конечное время анализа, в поле *Start saving data after* – начальный момент вывода результатов моделирования, в поле *Maximum step size* – максимальное значение шага интегрирования из расчета не менее 50 точек на период.

3. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

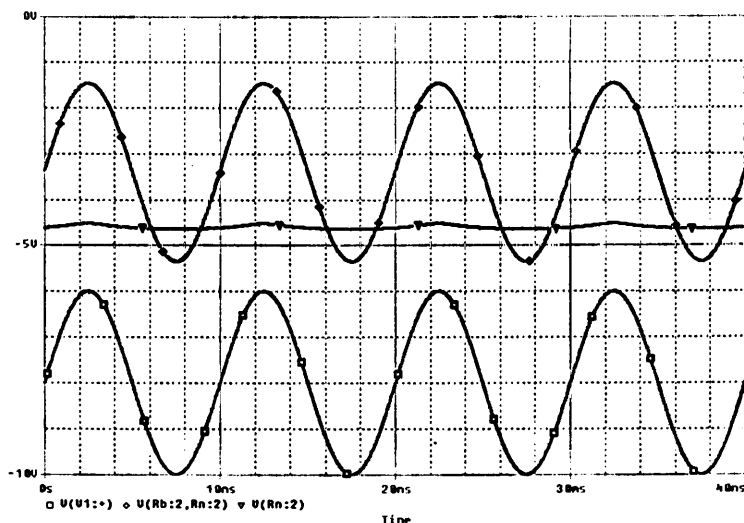


Рис. 4.38. Осциллограммы напряжений в точках исследуемой схемы стабилизатора напряжения

На рис. 4.38 показаны результаты моделирования, которые представляют осциллограммы напряжений в контрольных точках исследуемой схемы стабилизатора напряжения на основе стабилизатора.

4.4. Исследование на ПЭВМ полевых транзисторов

4.4.1. Исследование ВАХ и параметров полевого транзистора

Начальным шагом исследования является запуск файла проекта:

- *PTR1-1.orj* – при исследовании математической модели полевого транзистора КП103М с управляющим переходом и каналом *p*-типа (каталог *PTR1-1*, рис. 4.1);

- *PTR1-2.opj* – при исследовании математической модели полевого транзистора КП305Д с изолированным затвором и каналом *n*-типа (каталог *PTR1-2*, рис. 4.1).

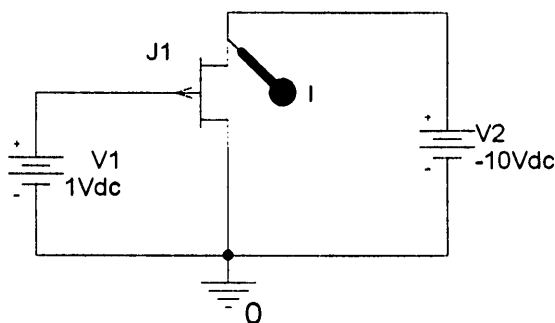


Рис. 4.39. Эквивалентная схема замещения для исследования ВАХ ПТ:
 J1 – исследуемый полевой транзистор; V1 – источник напряжения в цепи затвора;
 V2 – источник напряжения в цепи стока

Исследование ВАХ и параметров полевых транзисторов проводится в соответствии с эквивалентной схемой замещения, приведенной на рис. 4.39.

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*).

4.4.1.1. Методика исследования статических передаточных ВАХ полевого транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.40) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве основного варьируемого параметра (*Primary Sweep – Sweep Variable*) указывается источник напряжения V1, в качестве дополнительного (*Secondary Sweep – Sweep Variable*) – источник напряжения V2, в поле *Start Value* устанавливается начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*). На рис. 4.40, 4.41 приведены параметры перестройки источников напряжения V1 и V2 на примере исследования транзистора 2N3331.

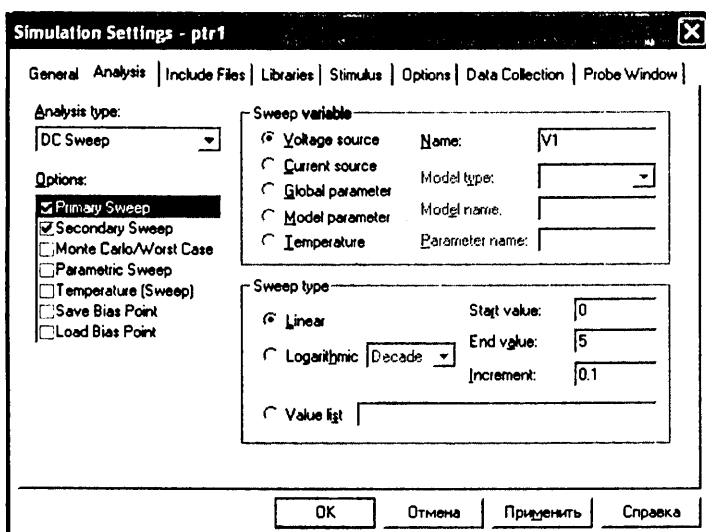


Рис. 4.40. Установка параметров перестройки источника напряжения V1

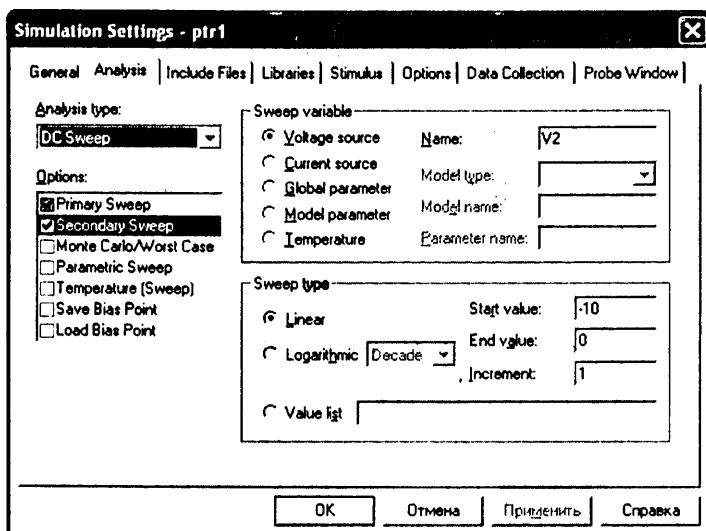


Рис. 4.41. Установка параметров перестройки источника напряжения V2

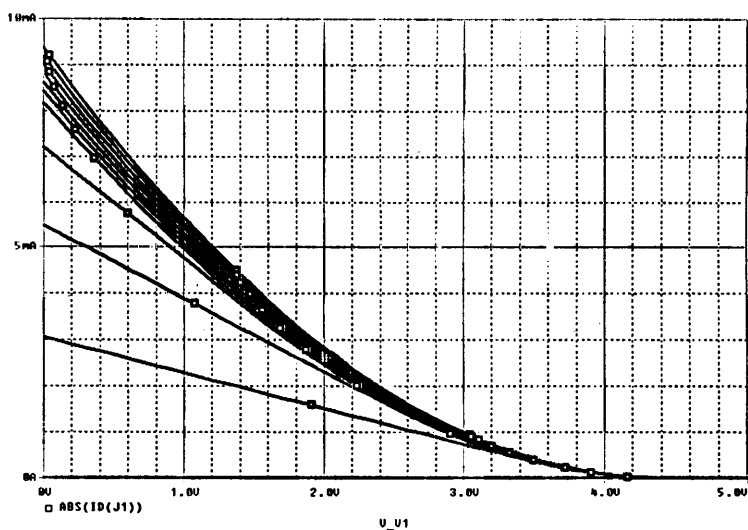


Рис. 4.42. Семейство статических передаточных ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом *p*-типа

Результаты моделирования приведены на рис. 4.42 и представляют семейство статических передаточных ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом *p*-типа.

2. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

4.4.1.2. Методика исследования статических выходных ВАХ полевого транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.43) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве основного варьируемого параметра (*Primary Sweep – Sweep Variable*) указывается источник напряжения V2, в качестве дополнительного (*Secondary Sweep – Sweep Variable*) – источник напряжения V1, в поле *Start Value* устанавливается начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*). На рис. 4.43, 4.44 приведены параметры перестройки источников напряжения V1 и V2 на примере исследования транзистора 2N3331.
2. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

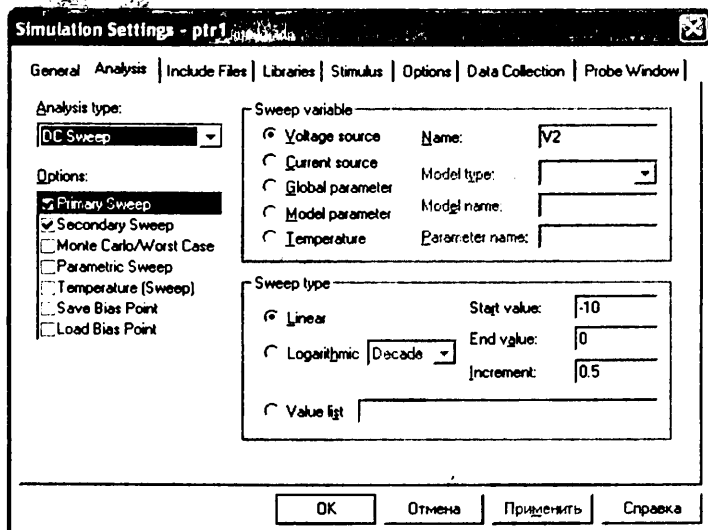


Рис. 4.43. Установка параметров перестройки источника напряжения V1

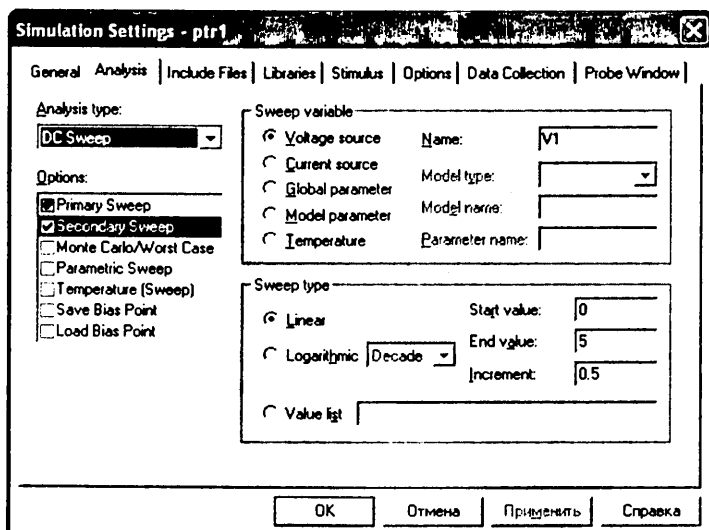


Рис. 4.44. Установка параметров перестройки источника напряжения V2

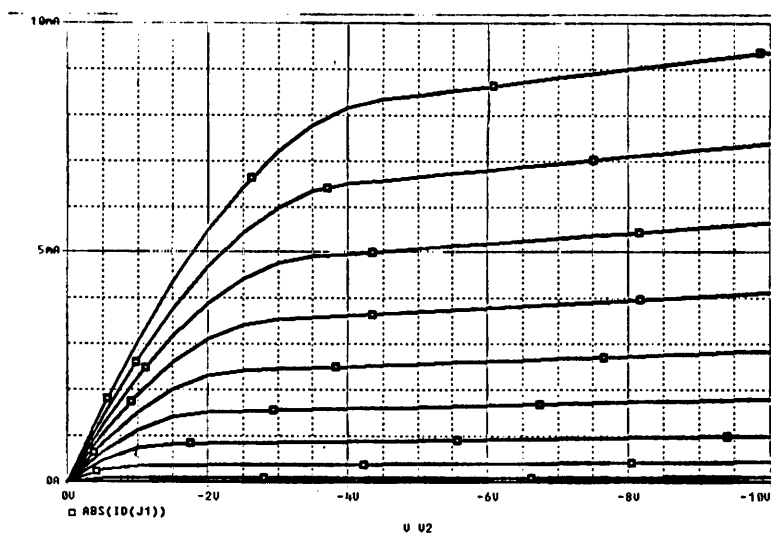


Рис. 4.45. Семейство статических выходных ВАХ полевого транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом p -типа

Результаты моделирования приведены на рис. 4.45. Они представляют семейство статических выходных ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом p -типа.

4.4.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов

Начальным шагом исследования является запуск файла проекта:

- **PTR2-1.opj** – при исследовании математической модели полевого транзистора КП103М с управляющим переходом и каналом p -типа (каталог PTR2-1, рис. 4.1);
- **PTR2-2.opj** – при исследовании математической модели полевого транзистора КП305Д с изолированным затвором и каналом n -типа (каталог PTR2-2, рис. 4.1).

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов проводится в соответствии с эквивалентной схемой замещения, представленной на рис. 4.46.

Параметром математической модели полевого транзистора, подверженным технологическому разбросу, является коэффициент пропорциональности $BETA$, соответствующий крутизне транзистора (см. приложение 2).

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) и статистического анализа по методу Монте-Карло (*Monte-Carlo*).

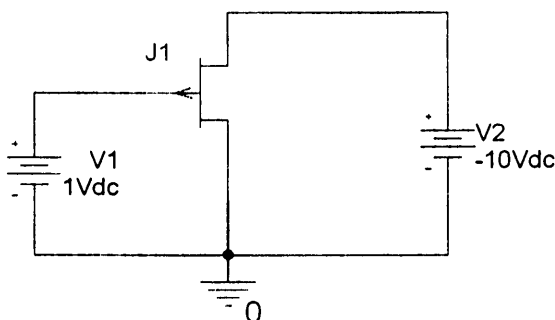


Рис. 4.46. Эквивалентная схема замещения для исследования технологического разброса ВАХ полевого транзистора: J1 – полевой транзистор с управляющим переходом; V1 – источник напряжения в цепи затвора; V2 – источник напряжения в цепи стока

4.4.2.1. Методика исследования технологического разброса статических передаточных ВАХ полевого транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V2.
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.47) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима

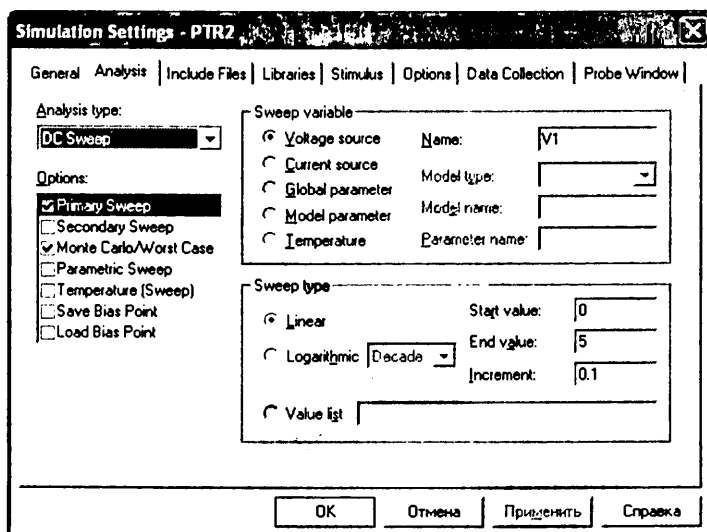


Рис. 4.47. Установка параметров перестройки источника напряжения V1 на примере исследования транзистора 2N3331

по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения V1. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

3. Активизируется меню *Monte-Carlo/Worst Case* (рис. 4.48). В поле *Output variable* (выходная переменная) указывается ток стока (*ID(J1)*), в поле *Numbers of runs* (число статистических испытаний) – 5, в меню *Use distribution* (закон распределения) – *Gaussian*, в меню *Save data from* (сохранить данные) – *All* (создаются и выводятся все выходные данные, включая статистические расчеты при номинальных данных параметров).

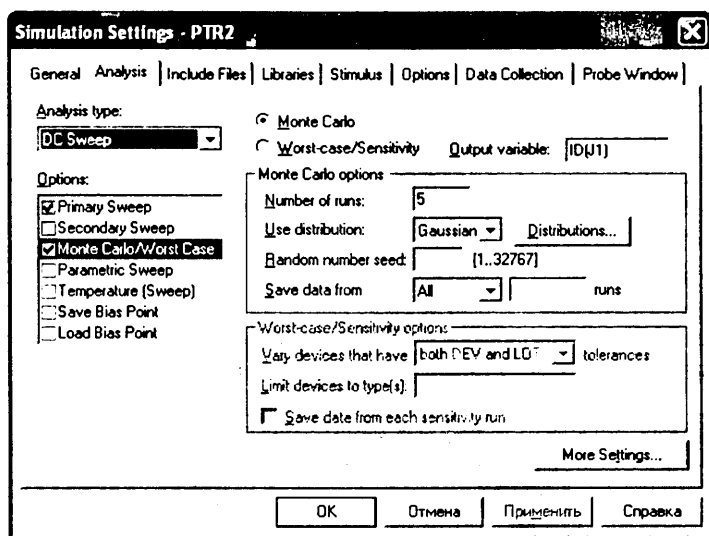


Рис. 4.48. Установка параметров анализа по методу Монте-Карло

4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схмотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования приведены на рис. 4.49 и представляют семейство графиков статических передаточных ВАХ транзистора 2N3331 с учетом технологического разброса их параметров.

4.4.2.2. Методика исследования технологического разброса статических выходных ВАХ полевого транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схмотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V1.

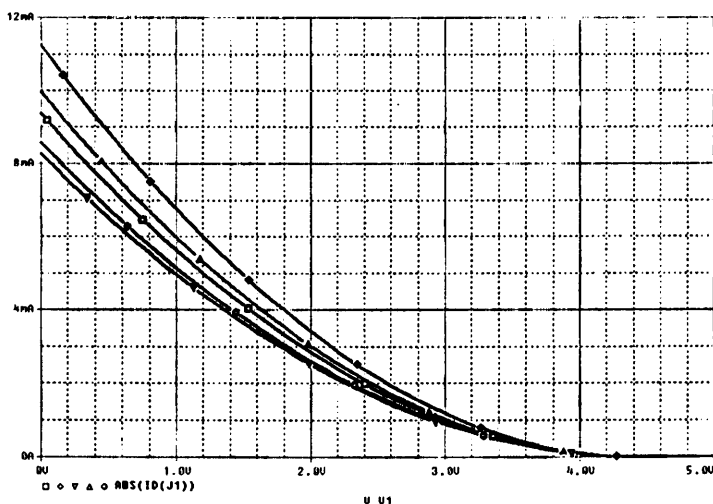


Рис. 4.49. Статические передаточные ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом р-типа с учетом технологического разброса при $V_1 = -10$ В

- В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.50) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*)

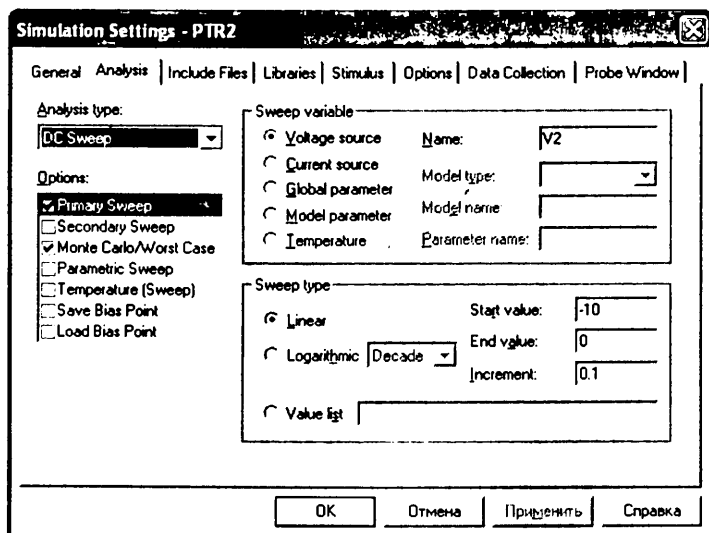


Рис. 4.50. Установка параметров перестройки источника напряжения V2 на примере исследования транзистора 2N3331

указывается источник напряжения V2, в поле *Start Value* устанавливается его начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения V2, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

3. Активизируется меню *Monte-Carlo/Worst Case* (рис. 4.51). В поле *Output variable* (выходная переменная) указывается ток стока (*ID(J1)*), в поле *Numbers of runs* (число статистических испытаний) – 5, в меню *Use distribution* (закон распределения) – *Gaussian*, в меню *Save data from* (сохранить данные) – *All* (создаются и выводятся все выходные данные, включая статистические расчеты при номинальных данных параметров).

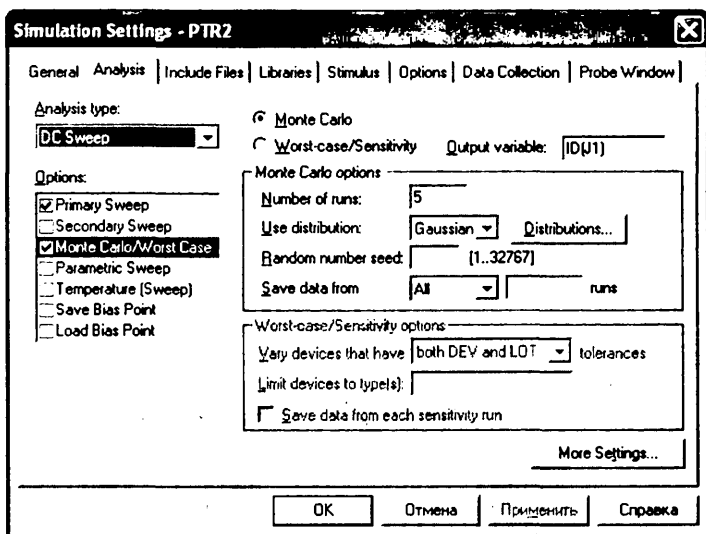


Рис. 4.51. Установка параметров анализа по методу Монте-Карло

4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования показаны на рис. 4.52. Результаты представляют собой семейство графиков статических выходных ВАХ транзистора 2N331 с учетом технологического разброса параметров.

4.4.3. Исследование работы полевого транзистора на переменном токе

Для проведения исследования работы полевого транзистора на переменном токе необходимо запустить файл проекта:

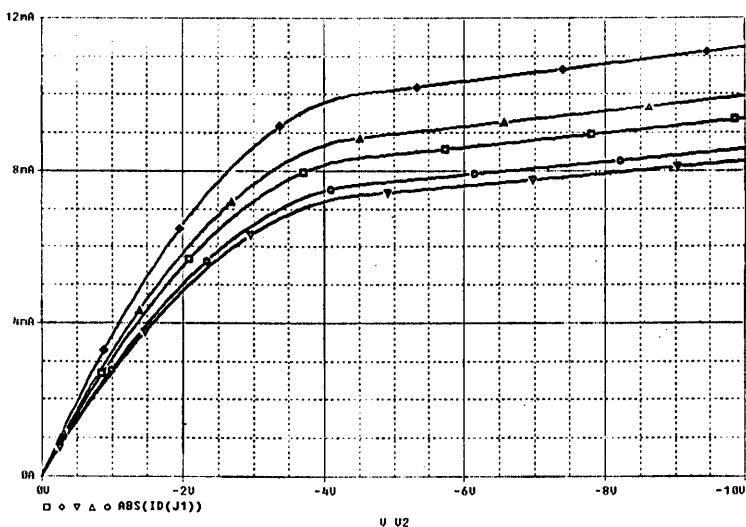


Рис. 4.52. Статические выходные ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом p -типа с учетом технологического разброса при $V_1 = 0$ В

- **PTR3-1.opj** – при исследовании на основе математической модели полевого транзистора КП103М с управляющим переходом и каналом p -типа (каталог PTR3-1, рис. 4.1);
- **PTR3-2.opj** – при исследовании на основе математической модели полевого транзистора КП305Д с изолированным затвором и каналом n -типа (каталог PTR3-2, рис. 4.1).

Исследование работы полевого транзистора в простейшей схеме усилительно-го каскада проводится в соответствии с эквивалентной схемой замещения, представленной на рис. 4.53.

Исследование осуществляется при помощи процедуры анализа во временной области *Transient*.

4.4.3.1. Методика исследования работы полевого транзистора на переменном токе

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V_1 (V_{OFF} – смещение, V_{AMPL} – амплитуда переменной составляющей).
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.54) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается процедура анализа *Transient* и устанавливаются параметры моделирования. В поле *Run to time* – конечное время анализа, в поле *Start saving data after* – начальный момент вывода результатов моделирования,

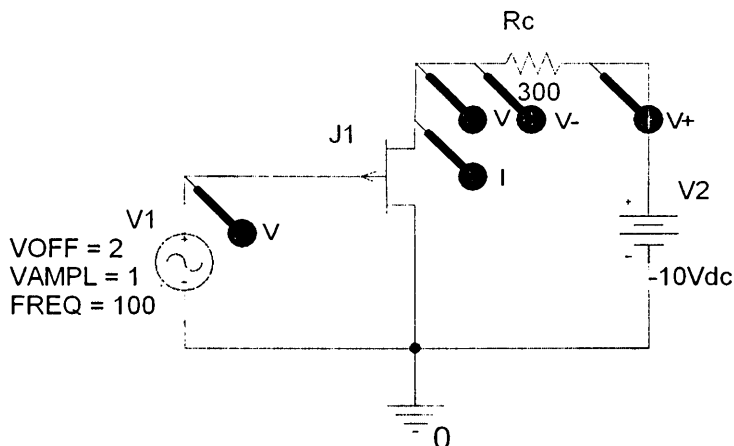


Рис. 4.53. Эквивалентная схема замещения для исследования работы ПТ на переменном токе: J1 – ПТ с управляющим переходом; V1 – источник напряжения в цепи затвора; V2 – источник напряжения в цепи стока; Rc – сопротивление нагрузки

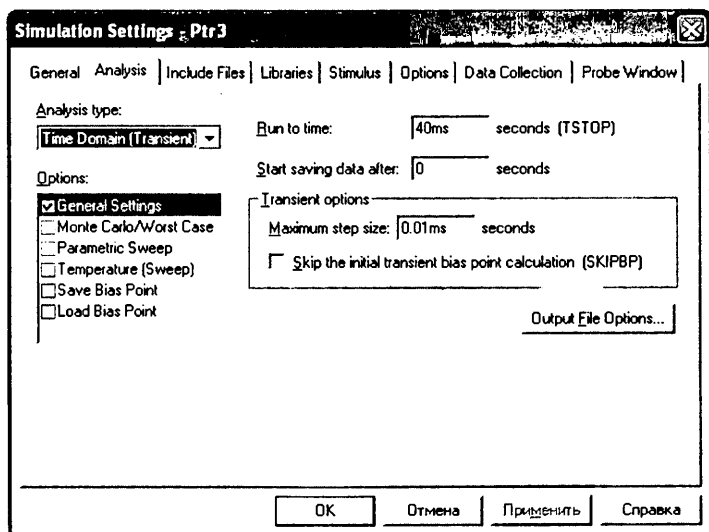


Рис. 4.54. Установка параметров моделирования

в поле *Maximum step size* – максимальное значение шага интегрирования из расчета не менее 50 точек на период.

3. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

На рис. 4.55 показаны результаты моделирования. Результаты представляют осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках исследуемой схемы усилительного каскада на полевом транзисторе.

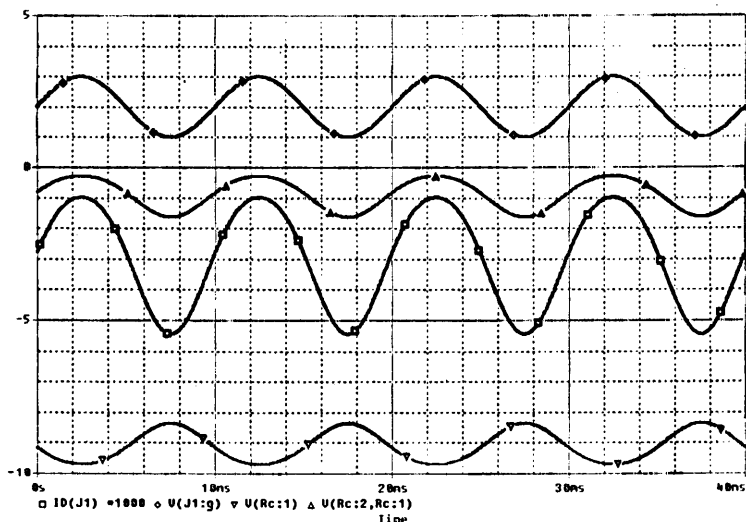


Рис. 4.55. Осциллограммы напряжений и токов в точках исследуемой схемы каскада на полевом транзисторе 2N3331 с управляющим переходом и каналом p -типа

4.4.4. Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров полевого транзистора

Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров полевого транзистора проводится на основе файлов просктов:

- **PTR1-1.opj** – при исследовании математической модели полевого транзистора КП103М с управляющим переходом и каналом p -типа (каталог PTR1-1, рис. 4.1);
- **PTR1-2.opj** – при исследовании математической модели полевого транзистора КП305Д с изолированным затвором и каналом n -типа (каталог PTR1-2, рис. 4.1).

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) и процедуры вариации температуры *Temperature (Sweep)*.

4.4.4.1. Методика исследования температурной зависимости статических передаточных ВАХ полевого транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V2.
2. В меню *Edit Simulation setting* (см. рис. 4.56) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения V1 и задаются пределы его перестройки, в поле *Start Value* устанавливается его начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения V1, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

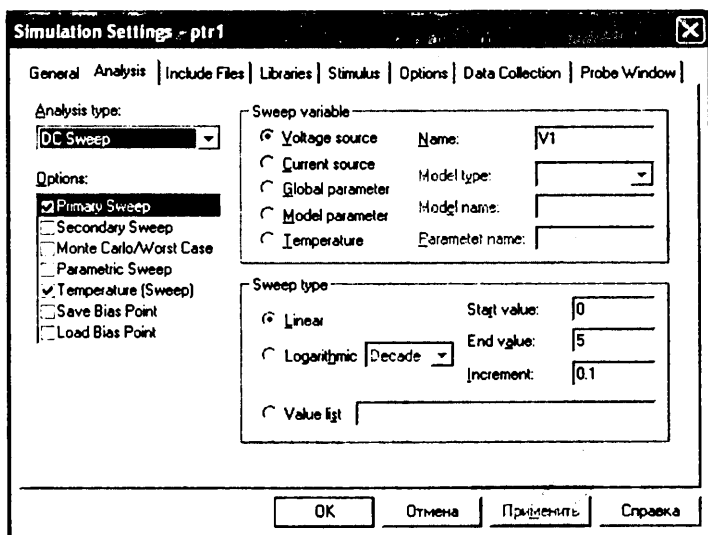


Рис. 4.56. Установка параметров перестройки источника напряжения V1 на примере транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом p-типа

3. Активизируется меню *Temperature (Sweep)* (рис. 4.57). В поле *Repeat the simulation for each of the temperatures* через пробел указываются температуры, для которых необходимо произвести анализ.
4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

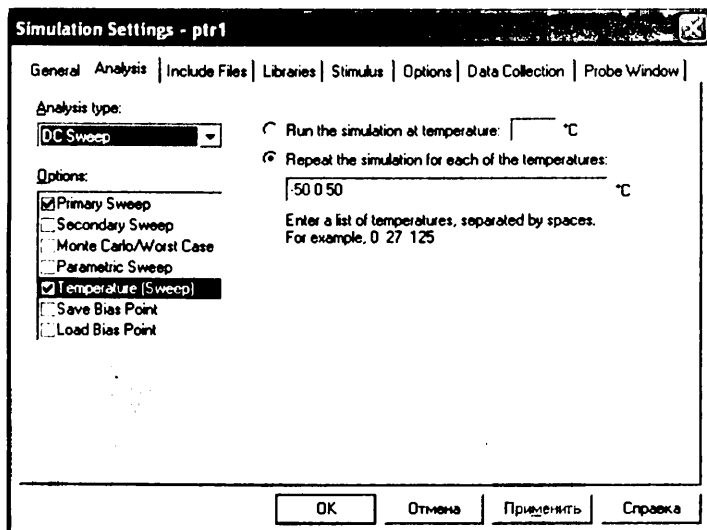


Рис. 4.57. Установка температур анализа

Результаты моделирования показаны на рис. 4.58. Результаты представляют семейство статических передаточных ВАХ транзистора 2N3331 для трех значений температуры.

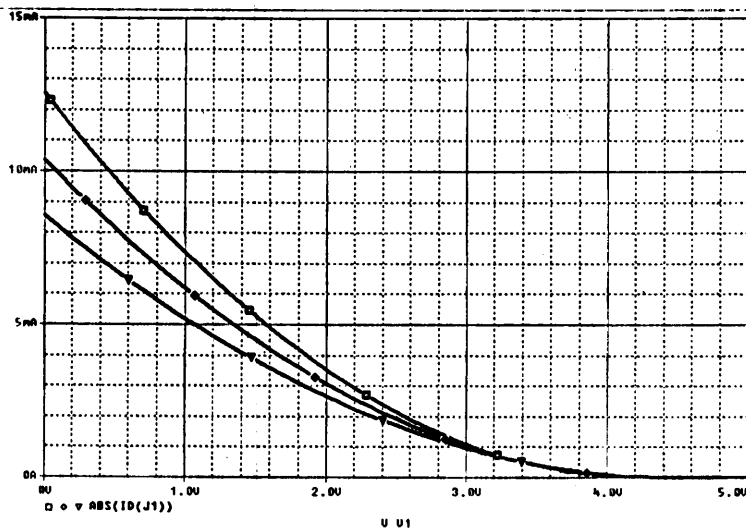


Рис. 4.58. Семейство статических передаточных ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом р-типа при различных температурах:
 □ — $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\diamond$ — $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; ∇ — $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.4.2. Методика исследования температурной зависимости статических выходных ВАХ полевого транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V1.
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.59) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения V2 и задаются пределы его перестройки, в поле *Start Value* устанавливается его начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения V2, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

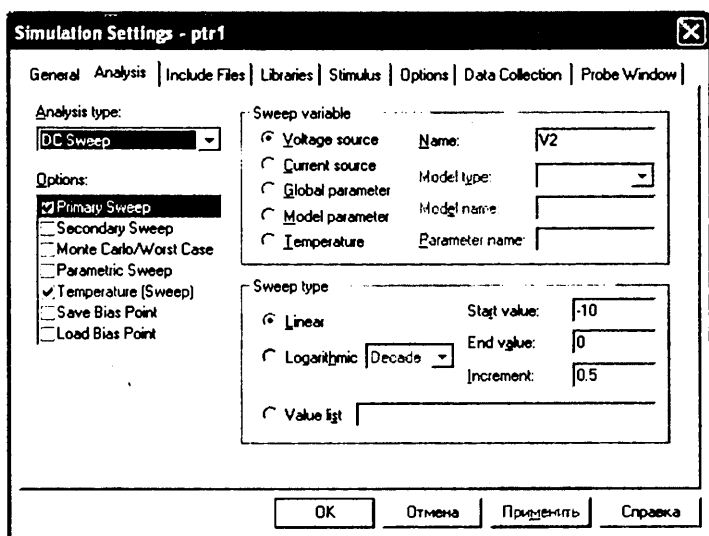


Рис. 4.59. Установка параметров перестройки источника напряжения V2 на примере транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом р-типа

3. Активируется меню *Temperature (Sweep)* (см. рис. 4.60). В поле *Repeat the simulation for each of the temperatures* через пробел указываются температуры, для которых необходимо произвести анализ.
4. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

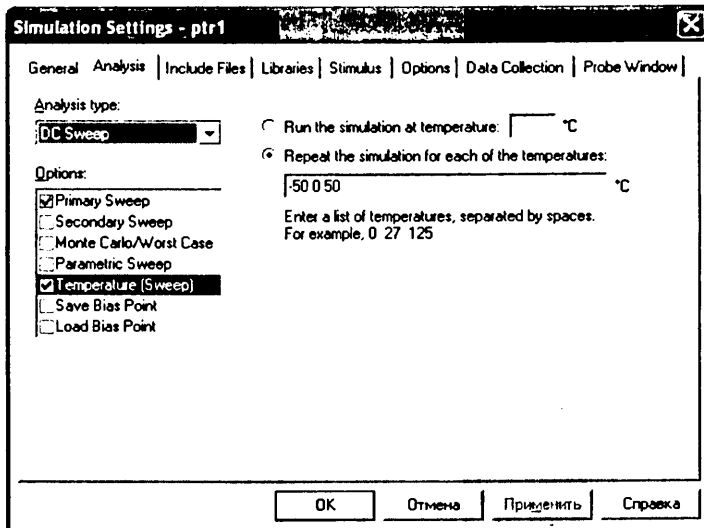


Рис. 4.60. Установка температур анализа

Результаты моделирования приведены на рис. 4.61 и представляют семейство статических выходных ВАХ транзистора 2N3331 для трех значений температуры.

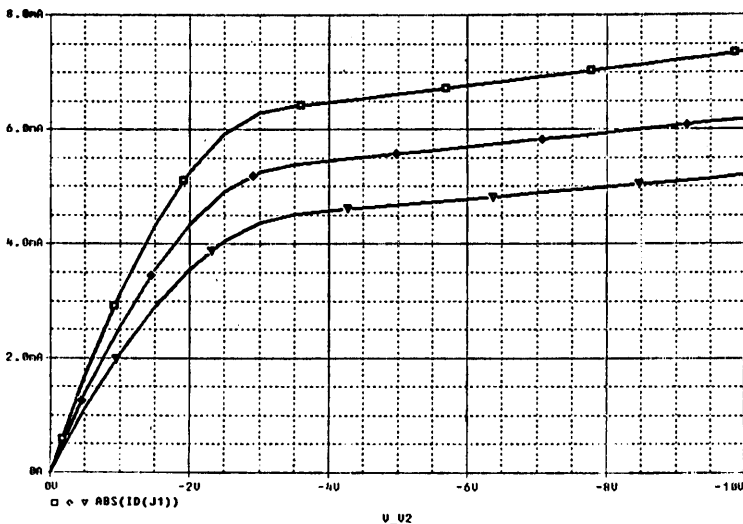


Рис. 4.61. Семейство статических выходных ВАХ транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом р-типа при различных температурах:
 □ — -50°C ; $\diamond$ — 0°C ; ∇ — $+50^{\circ}\text{C}$

4.4.4.3. Методика исследования температурной зависимости крутизны полевого транзистора

Исследование температурной зависимости крутизны полевого транзистора осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) при заданных значениях источников напряжения V1 и V2.

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливаются необходимые значения напряжения источников V1 и V2.
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.62) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьлируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается температура (*Temperature*), задаются пределы ее перестройки, в поле *Start Value* устанавливается начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения температуры, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

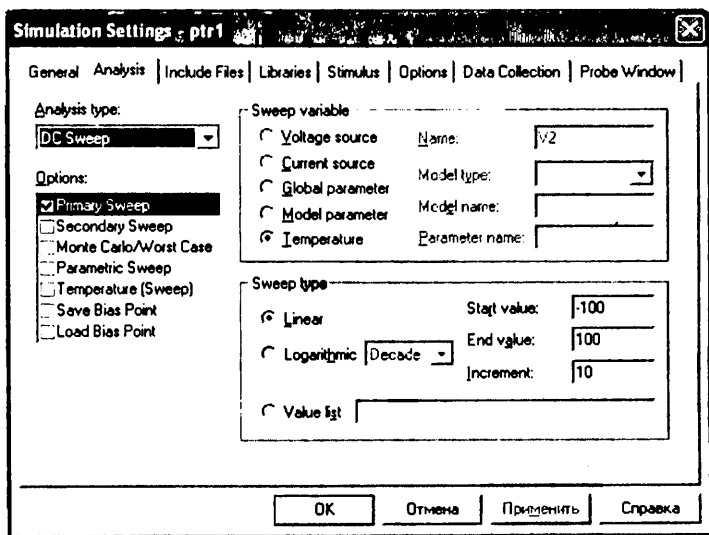


Рис. 4.62. Установка параметров вариации температуры

3. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Ps spice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run Ps spice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.
4. Для отображения результатов моделирования в виде зависимости крутизны полевого транзистора от температуры в программе моделирования аналоговых и смешанных устройств *Ps spice A/D* в качестве функции по оси *ou*

указывается отношение тока стока к напряжению затвор–исток (меню *Trace – Add Trace*).

Результаты моделирования показаны на рис. 4.63. Они представляют зависимость крутизны транзистора 2N3331 от температуры в диапазоне $\pm 100^\circ\text{C}$.

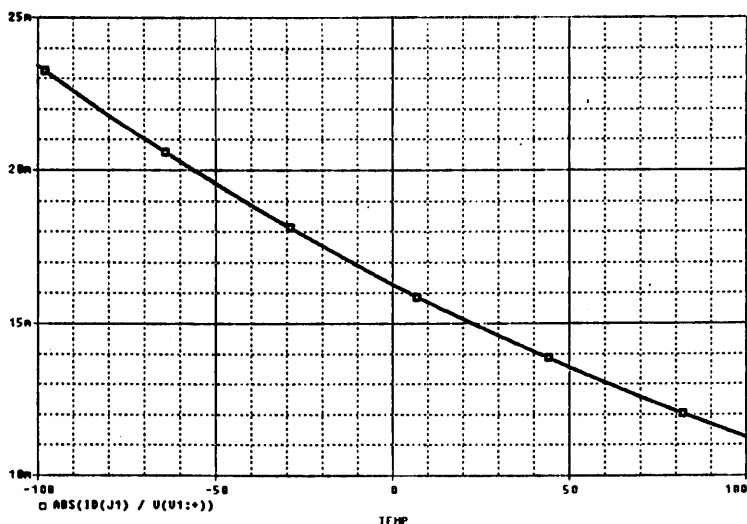


Рис. 4.63. Зависимость крутизны транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом *p*-типа от температуры при $V_1 = 0,5\text{ В}$, $V_2 = -10\text{ В}$

4.4.5. Исследование частотных свойств полевого транзистора

Для исследования зависимости тока стока полевого транзистора от частоты, обусловленной влиянием его входной емкости, используются файлы проектов:

- **PTR1-1.opj** – при исследовании математической модели полевого транзистора КП103М с управляющим переходом и каналом *p*-типа (каталог PTR1-1, рис. 4.1);
- **PTR1-2.opj** – при исследовании математической модели полевого транзистора КП305Д с изолированным затвором и каналом *n*-типа (каталог PTR1-2, рис. 4.1).

Исследование осуществляется при помощи процедуры расчета частотных характеристик (*AC Sweep*) при задании режима работы транзистора по постоянному току с помощью источников напряжения V_1 и V_2 .

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схмотехнического редактора *Capture* устанавливаются необходимые значения напряжения источников V1 и V2, задающие режим работы полевого транзистора.
2. Из библиотеки *Source.olb* на рабочем поле размещается источник напряжения VAC, из библиотеки *Analog.olb* размещается резистор Ri, имитирующий внутреннее сопротивление источника напряжения. В результате эквивалентная схема замещения приводится к виду согласно рис. 4.64.

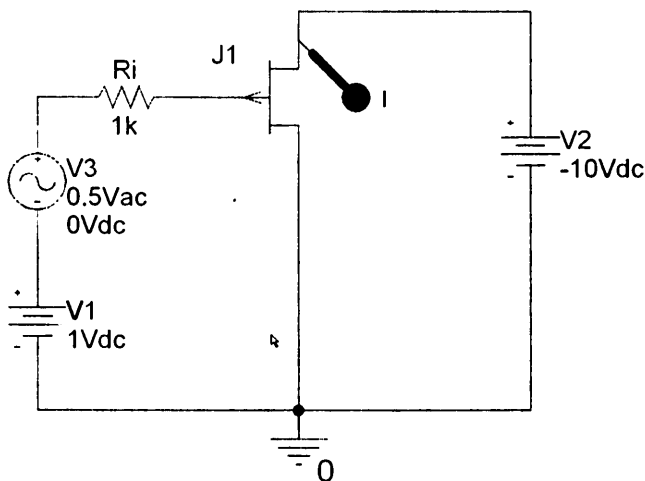


Рис. 4.64. Эквивалентная схема замещения для исследования частотных свойств полевого транзистора: J1 – полевой транзистор с управляющим переходом; V1, V2, V3 – источники напряжения; Ri – внутреннее сопротивление источника V3

3. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.65) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *AC Sweep/Noise* (расчет частотных характеристик) и устанавливаются параметры перестройки частоты. В поле *Start Frequency* устанавливается начальная частота анализа, в поле *End Frequency* – конечная частота анализа, в поле *Points/Decade* – число точек на декаду, способ изменения частоты (*AC Sweep Type*) – логарифмический (*logarithmic*).
4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схмотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования показаны на рис. 4.66. Они представляют зависимость тока стока полевого транзистора от частоты, по которой может быть определено значение его входной емкости.

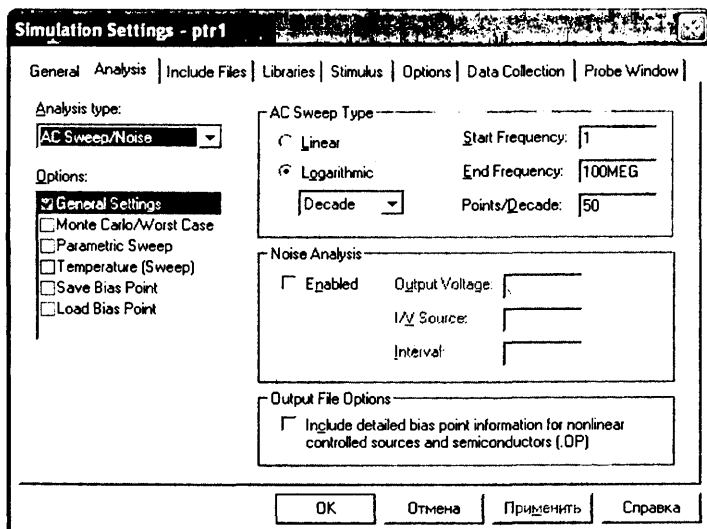


Рис. 4.65. Установка параметров перестройки частоты

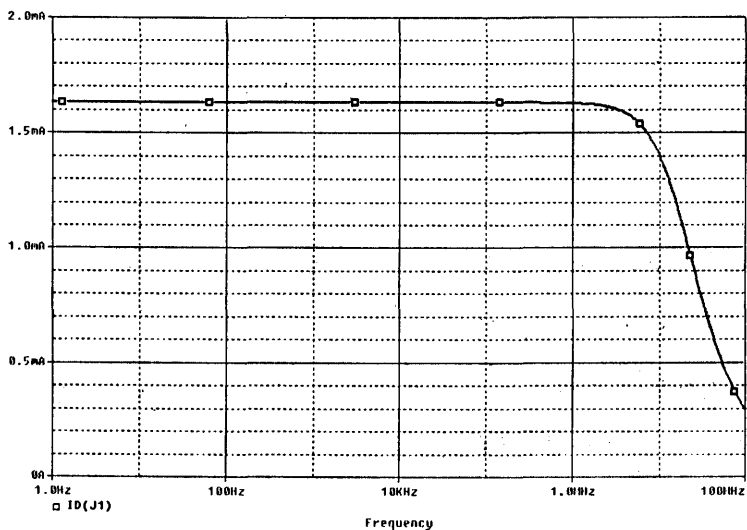


Рис. 4.66. Зависимость тока стока транзистора 2N3331 с управляющим переходом и каналом р-типа от частоты при $V_1 = 1 \text{ В}$, $V_2 = -10 \text{ В}$

4.5. Исследование на ПЭВМ

биполярных транзисторов

4.5.1. Исследование ВАХ и параметров биполярного транзистора

Исследование ВАХ и параметров биполярных транзисторов начинается с запуска соответствующего файла проекта:

- *BTR1-1.orj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора $n-p-n$ -типа 2ТЗ12А (каталог *BTR1-1*, рис. 4.1);
- *BTR1-2.orj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора $p-n-p$ -типа ГТ308В (каталог *BTR1-2*, рис. 4.1).

Исследование проводится в соответствии с эквивалентной схемой замещения рис. 4.67.

Исследование осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току *DC Sweep*.

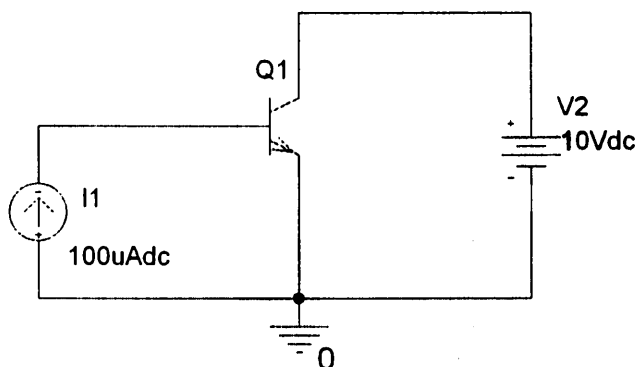


Рис. 4.67. Эквивалентная схема замещения, используемая для исследования ВАХ БТ: Q1 – БТ $n-p-n$ -типа; I1 – источник тока; V2 – источники напряжения

4.5.1.1. Методика исследования статических входных ВАХ биполярного транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.68) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве основного варьируемого параметра (*Primary Sweep – Sweep Variable*) указывается источник тока I1, в качестве

дополнительного (*Secondary Sweep – Sweep Variable*) – источник напряжения V2. В поле *Start Value* устанавливается его начальное значение, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения V2, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*). На рис. 4.68, 4.69

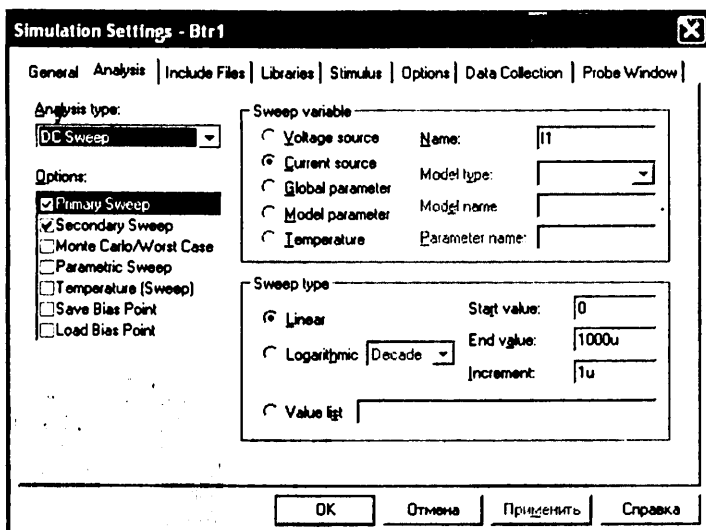


Рис. 4.68. Установка параметров перестройки источника тока I1

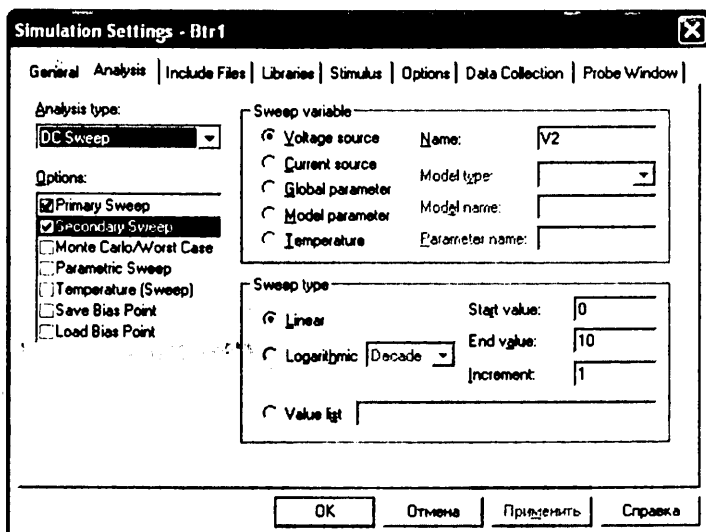


Рис. 4.69. Установка параметров перестройки источника напряжения V2

приведены параметры перестройки источников напряжения I1 и V2 на примере исследования транзистора BC547.

2. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.
4. Для отображения результатов моделирования в виде зависимости тока базы от напряжения база–эмиттер в программе моделирования аналоговых и смешанных устройств *PSpice A/D* указывается в качестве аргумента по оси *ox* напряжение база–эмиттер (меню *Plot – Axis Setting – закладка X axis – клавиша Axis variable*). В качестве функции по оси *oy* устанавливается значения тока базы (меню *Trace – Add Trace*).

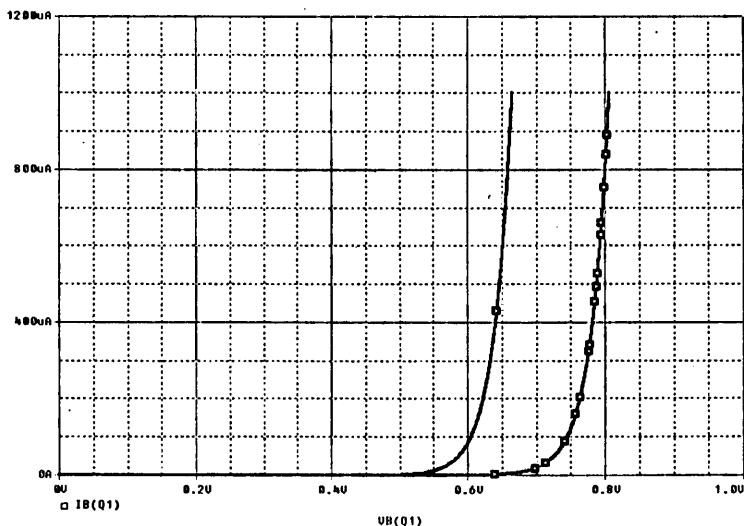


Рис. 4.70. Семейство статических входных ВАХ транзистора BC547

Результаты моделирования, приведенные на рис. 4.70, представляют семейство статических входных ВАХ транзистора BC547.

4.5.1.2. Методика исследования статических выходных ВАХ биполярного транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.71) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве основного варьируемого параметра (*Primary Sweep – Sweep Variable*) указывается источник напряжения V2, в качестве дополнительного (*Secondary Sweep – Sweep Variable*) – источник

тока I_1 , в поле *Start Value* устанавливается начальное значение I_1 , в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения I_1 , способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*). На рис. 4.71, 4.72 при-

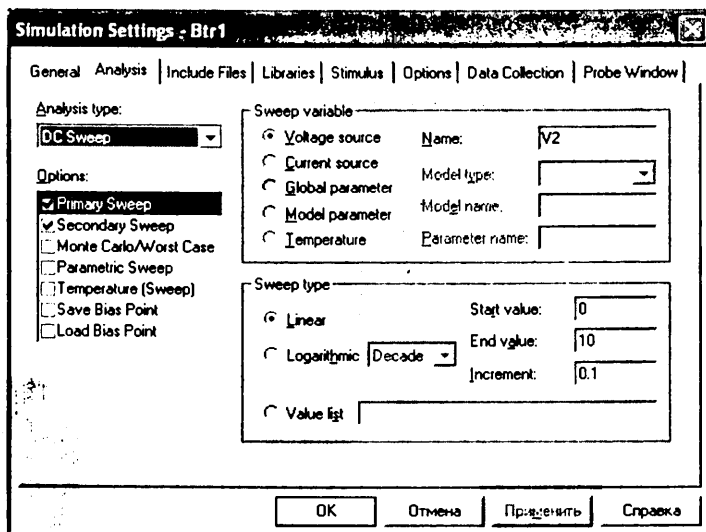


Рис. 4.71. Установка параметров перестройки источника напряжения V_2

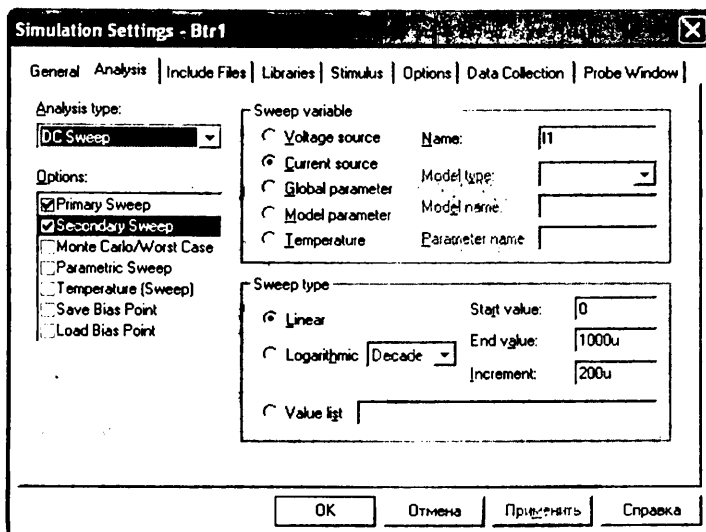


Рис. 4.72. Установка параметров перестройки источника тока I_1

ведены параметры перестройки источников I1 и V2 на примере исследования транзистора BC547.

2. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

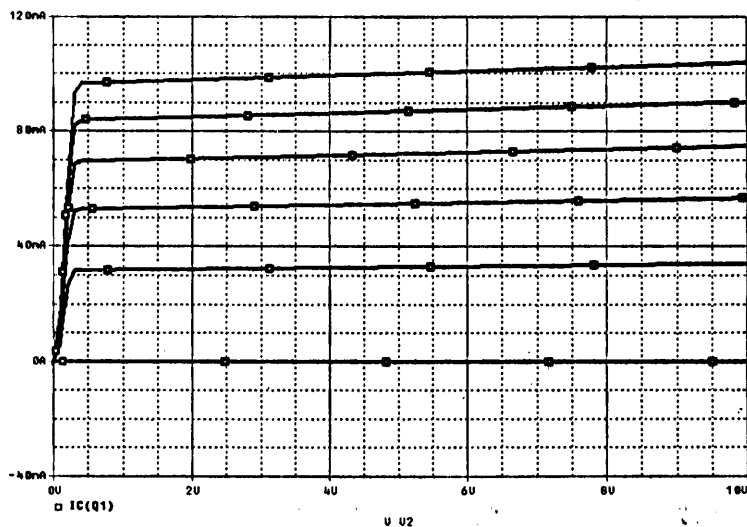


Рис. 4.73. Семейство статических выходных ВАХ биполярного транзистора BC547

Результаты моделирования приведены на рис. 4.73. Они представляют семейство статических выходных ВАХ транзистора BC547.

4.5.2. Исследование технологического разброса ВАХ и параметров биполярного транзистора

Начальным шагом исследования является запуск соответствующего файла проекта:

- *BTR2-1.opj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора $n-p-n$ -типа 2Т312А (каталог *BTR2-1*, рис. 4.1);
- *BTR2-2.opj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора $p-n-p$ -типа ГТ308В (каталог *BTR2-2*, рис. 4.1).

Исследование технологического разброса проводится на основе эквивалентной схемы замещения, представленной на рис. 4.74.

Статистически изменяемым параметром математической модели биполярного транзистора при моделировании является максимальный коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером *BF* (приложение 2).

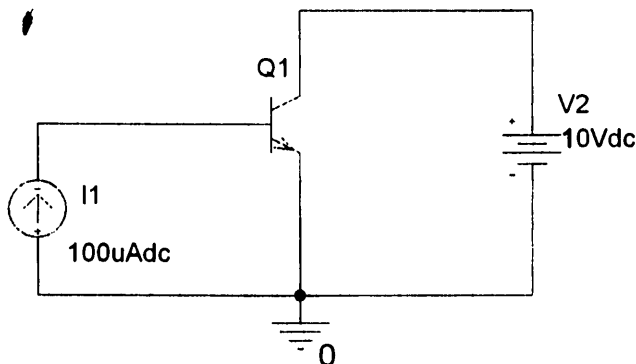


Рис. 4.74. Эквивалентная схема замещения для исследования технологического разброса ВАХ БТ: Q1 – БТ *n-p-n*-типа; I1 – источник тока; V2 – источник напряжения

Исследование технологического разброса статических ВАХ биполярного транзистора осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) и статистического анализа по методу Монте-Карло (*Monte-Carlo*).

4.5.2.1. Методика исследования технологического разброса статических входных ВАХ биполярного транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V2.
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.75) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается источник тока I1. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение I1, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения I1, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).
3. Активизируется меню *Monte-Carlo/Worst Case* (рис. 4.76). В поле *Output variable* (выходная переменная) указывается напряжение база–эмиттер (*V(Q1:b)*), в поле *Numbers of runs* (число статистических испытаний) – 5, в меню *Use distribution* (закон распределения) – *Gaussian*, в меню *Save data from* (сохранить данные) – *All* (создаются и выводятся все выходные данные, включая статистические расчеты при номинальных данных параметрах).
4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

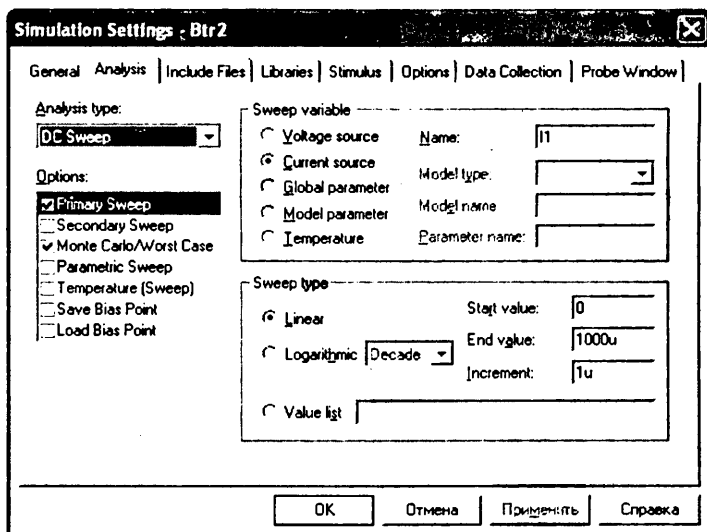


Рис. 4.75. Установка параметров перестройки источника тока I1 на примере исследования транзистора BC547

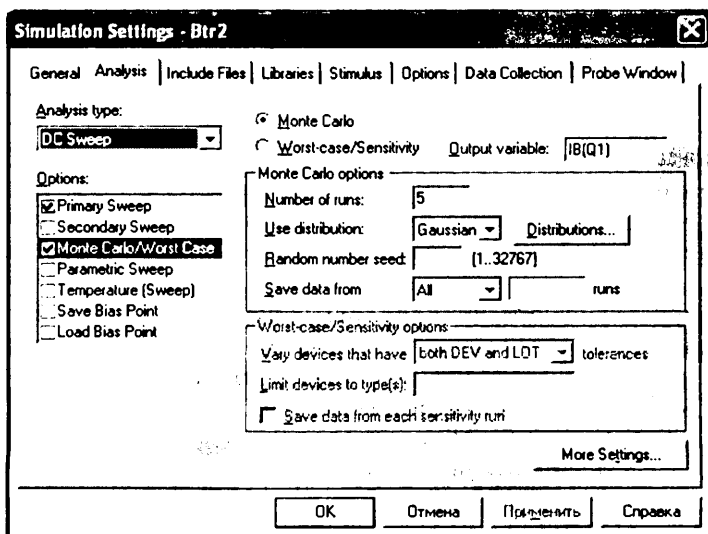


Рис. 4.76. Установка параметров анализа по методу Монте-Карло

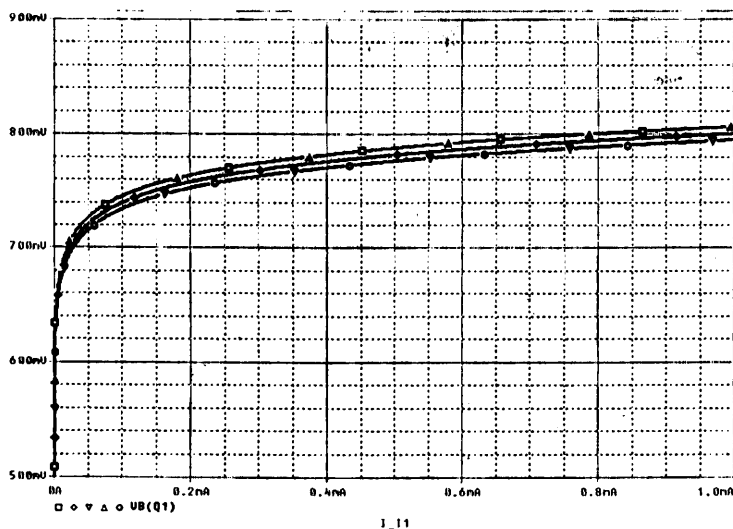


Рис. 4.77. Статические входные ВАХ транзистора BC547 с учетом технологического разброса при $V_2 = 10 \text{ В}$

Результаты моделирования, изображенные на рис. 4.77, представляют семейство входных ВАХ транзистора BC547, различие которых обусловлено технологическим разбросом.

4.5.2.2. Методика исследования технологического разброса статических выходных ВАХ биполярного транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается значение источника тока I_1 .
2. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.78) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается источник напряжения V_2 . В поле *Start Value* устанавливается начальное значение V_2 , в поле *End Value* — конечное значение, в поле *Increment* — значение шага изменения V_2 , способ изменения (*Sweep Type*) — линейный (*Linear*).
3. Активизируется меню *Monte-Carlo/Worst Case* (рис. 4.79). В поле *Output variable* (выходная переменная) указывается ток коллектора ($IC(Q1)$), в поле *Numbers of runs* (число статистических испытаний) — 5, в меню *Use distribution* (закон распределения) — *Gaussian*, в меню *Save data from* (сохранить данные) — *All* (создаются и выводятся все выходные данные, включая статистические расчеты при номинальных данных параметров).

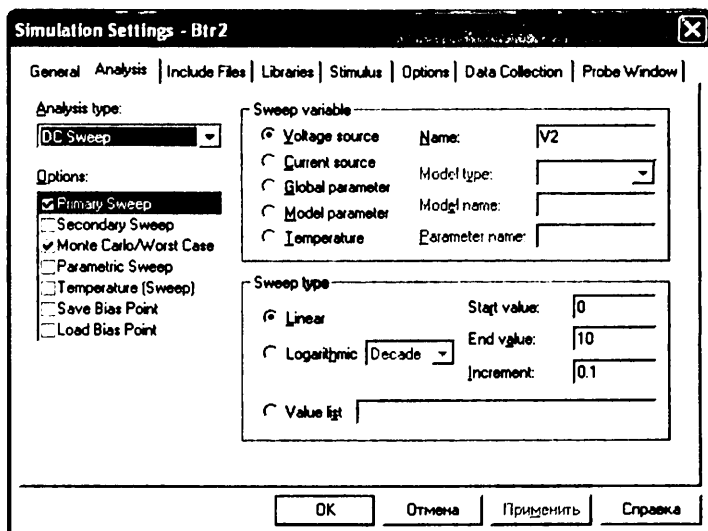


Рис. 4.78. Установка параметров перестройки источника напряжения V2 на примере исследования транзистора BC547

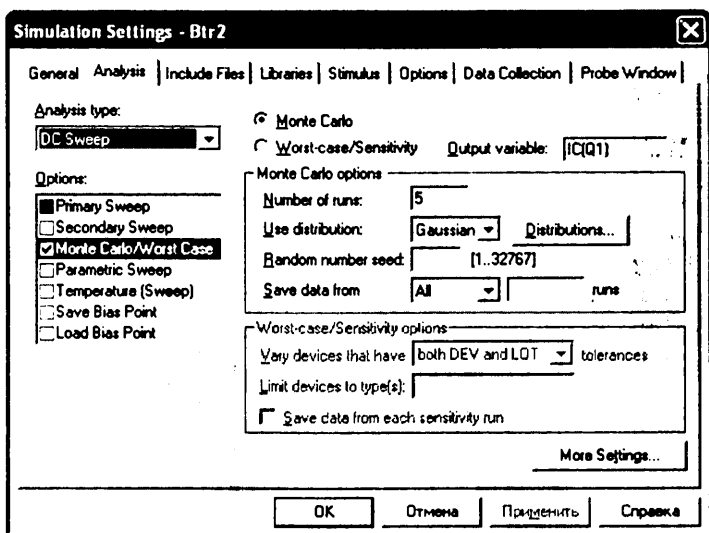


Рис. 4.79. Установка параметров анализа по методу Монте-Карло

4. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схмотехнического редактора *Capture*.

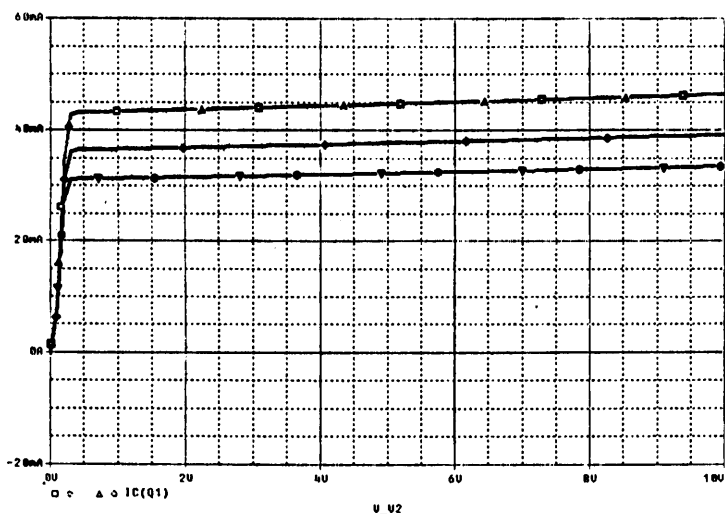


Рис. 4.80. Статические выходные ВАХ транзистора BC547 с учетом технологического разброса при $I_b = 300 \text{ мкА}$

Результаты моделирования, изображенные на рис. 4.80, представляют семейство выходных ВАХ транзистора BC547, различие которых обусловлено технологическим разбросом.

4.5.3. Исследование работы биполярного транзистора на переменном токе

Для исследования работы биполярного транзистора на переменном токе необходимо запустить файл проекта:

- **BTR3-1.opj** – при исследовании на основе математической модели биполярного транзистора $n-p-n$ -типа 2Т312А (каталог BTR3-1, рис. 4.1);
- **BTR3-2.opj** – при исследовании на основе математической модели биполярного транзистора $p-n-p$ -типа ГТ308В (каталог BTR3-2, рис. 4.1).

Исследование проводится в соответствии с эквивалентной схемой замещения, приведенной на рис. 4.81.

Для исследования работы биполярного транзистора на переменном токе используется процедура анализа во временной области *Transient*.

4.5.3.1. Методика исследования работы биполярного транзистора на переменном токе

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V1 (*VOFF* – смещение, *VAMPL* – амплитуда переменной составляющей).

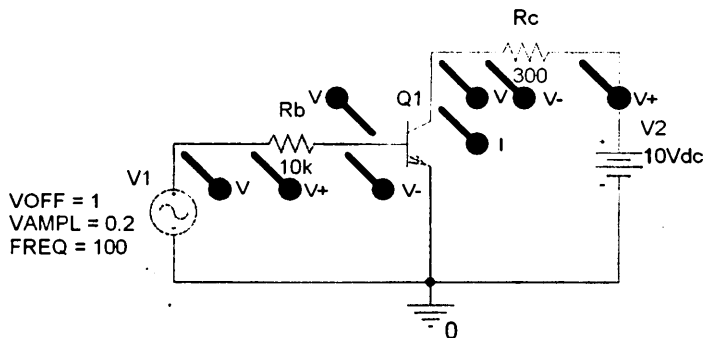


Рис. 4.81. Эквивалентная схема замещения для исследования работы БТ на переменном токе: Q1 – БТ *n-p-n*-типа; V1 – источник напряжения смещения и сигнала; V2 – источник напряжения; Rb, Rc – сопротивления в цепи базы и коллектора

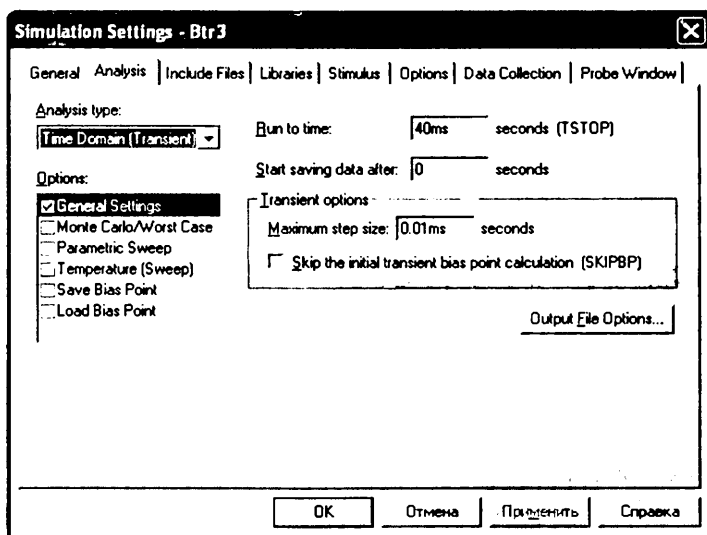


Рис. 4.82. Установка параметров моделирования

- В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.82) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается процедура *Transient* и устанавливаются параметры моделирования: в поле *Run to time* – конечное время анализа, в поле *Start saving data after* – начальный момент вывода результатов моделирования, в поле *Maximum step size* – максимальное значение шага интегрирования из расчета не менее 50 точек на период.
- Активируется процесс моделирования посредством выбора меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.

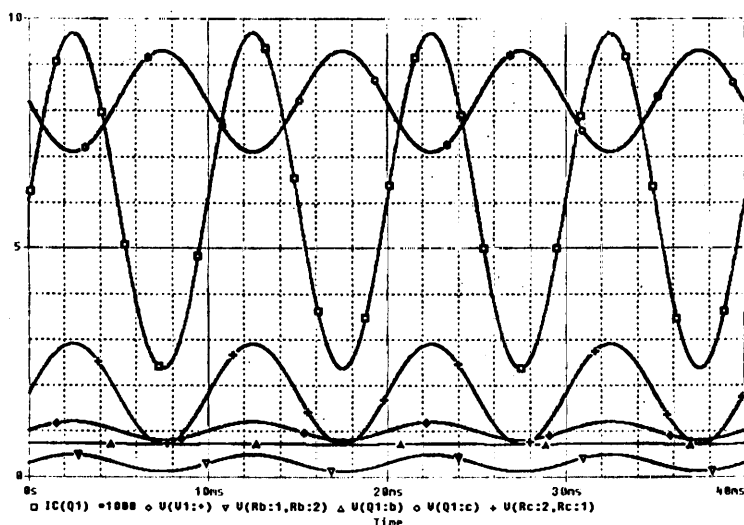


Рис. 4.83. Осциллограммы напряжений и токов в точках исследуемой схемы на примере транзистора BC547

На рис. 4.83 показаны результаты моделирования, которые представляют собой осциллограммы напряжений и токов в точках схемы для исследования работы биполярного транзистора на переменном токе.

4.5.4. Исследование температурных зависимостей ВАХ и параметров биполярного транзистора

Исследования температурных зависимостей ВАХ и параметров биполярного транзистора осуществляются на основе файлов проектов:

- *BTR1-1.proj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора *n-p-n*-типа 2Т312А (каталог *BTR1-1*, рис. 4.1);
- *BTR1-2.proj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора *p-n-p*-типа ГТ308В (каталог *BTR1-2*, рис. 4.1).

Исследование температурной зависимости статических входных и выходных ВАХ проводится с помощью процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) и процедуры вариации температуры *Temperature (Sweep)*.

4.5.4.1. Методика исследования температурной зависимости статических входных ВАХ биполярного транзистора

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое напряжение источника V2.

- В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.84) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*) указывается источник тока I1 и задаются пределы его перестройки, в поле *Start Value* устанавливается начальное значение I1, в поле *End Value* – конечное значение изменения I1, в поле *Increment* – значение шага, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

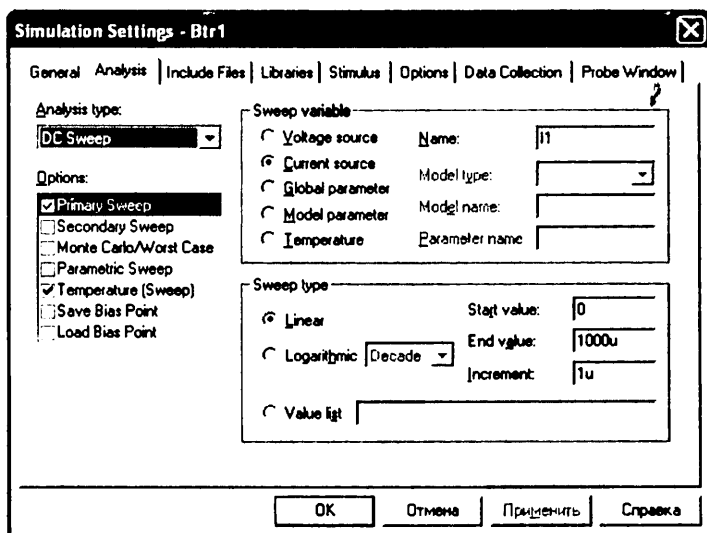


Рис. 4.84. Установка параметров перестройки источника тока I1 на примере транзистора BC547

- Активируется меню *Temperature (Sweep)* (рис. 4.85). В поле *Repeat the simulation for each of the temperatures* через пробел указываются температуры, для которых необходимо произвести анализ.
- Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схмотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 4.86, представляют семейство входных ВАХ биполярного транзистора BC547 для трех значений температур.

4.5.4.2. Методика исследования температурной зависимости статических выходных ВАХ биполярного транзистора

Исследование включает следующие этапы.

- На рабочем поле схмотехнического редактора *Capture* устанавливается необходимое значение источника тока I1.

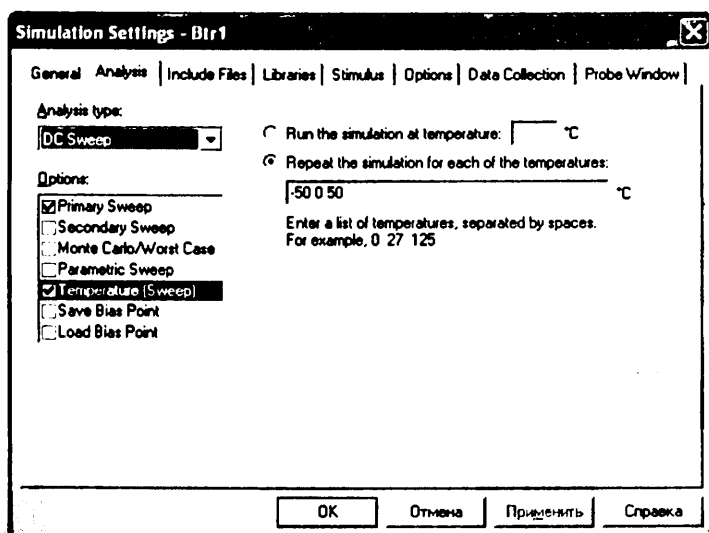
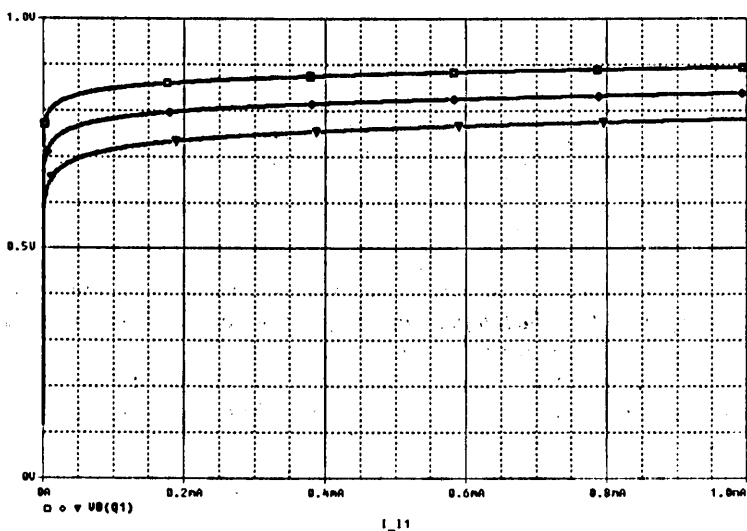


Рис. 4.85. Установка значений температур

Рис. 4.86. Семейство статических входных ВАХ транзистора BC547 при различных значениях температуры: □ — -50°C ; ◇ — 0°C ; ▽ — $+50^{\circ}\text{C}$

- В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.87) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*)

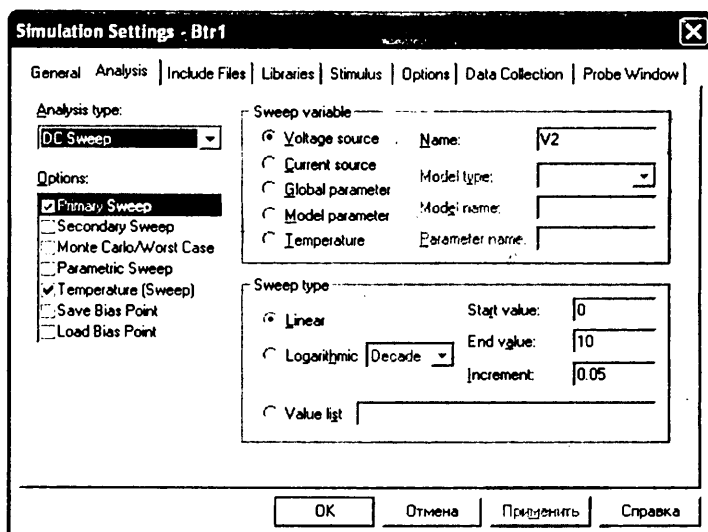


Рис. 4.87. Установка параметров перестройки источника напряжения V2 на примере транзистора BC547

указывается источник напряжения V2 и задаются пределы его перестройки. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение V2, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения V2, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

3. Активируется меню *Temperature (Sweep)* (рис. 4.88). В поле *Repeat the simulation for each of the temperatures* через пробел указываются температуры, для которых необходимо произвести анализ.
4. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *Pspice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схмотехнического редактора *Capture*.

Результаты моделирования приведены на рис. 4.89 и представляют семейство выходных ВАХ БТ BC547 для трех значений температуры.

4.5.4.3. Методика исследования температурной зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора

Исследование температурной зависимости параметра h_{21} (коэффициента усиления по току) БТ осуществляется при помощи процедуры многовариантного расчета режима по постоянному току (*DC Sweep*) при заданных значениях источника тока I1 и источника напряжения V2.

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схмотехнического редактора *Capture* устанавливаются необходимые значения источников I1 и V2, задающие режим работы БТ.

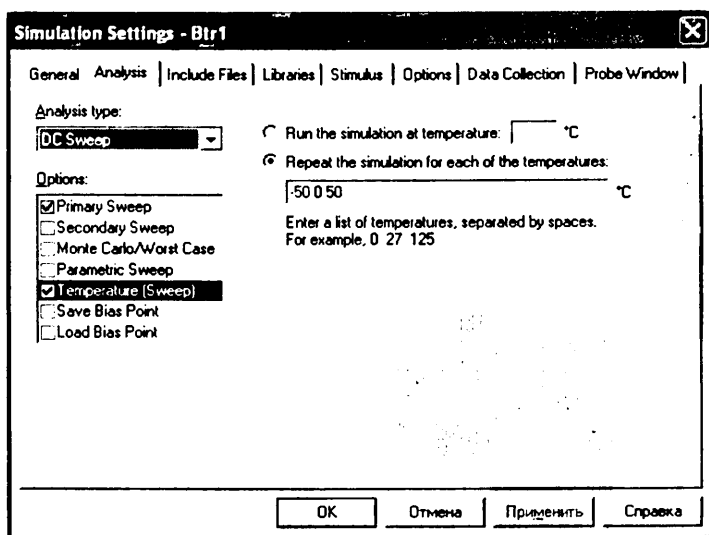
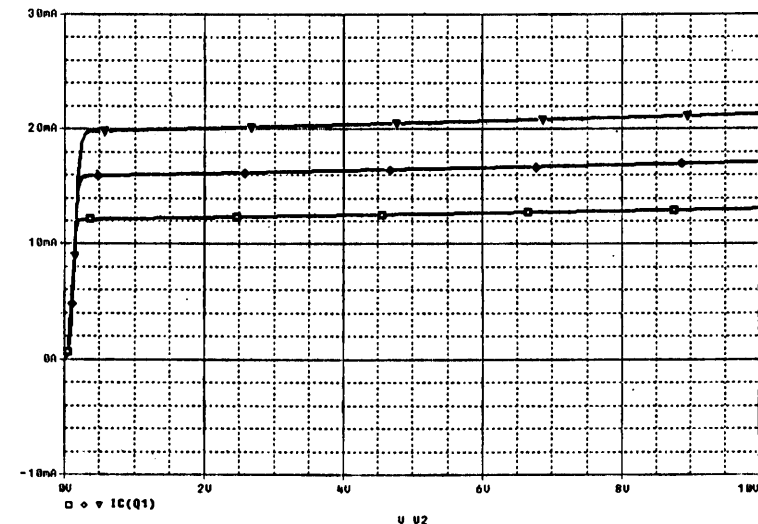


Рис. 4.88. Установка значений температур

Рис. 4.89. Семейство статических выходных ВАХ транзистора BC547 при различных значениях температуры: □ — -50°C ; ◇ — 0°C ; ▽ — $+50^{\circ}\text{C}$

- В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.90) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *DC Sweep* (многовариантный расчет режима по постоянному току). В качестве варьируемого параметра (*Sweep Variable*)

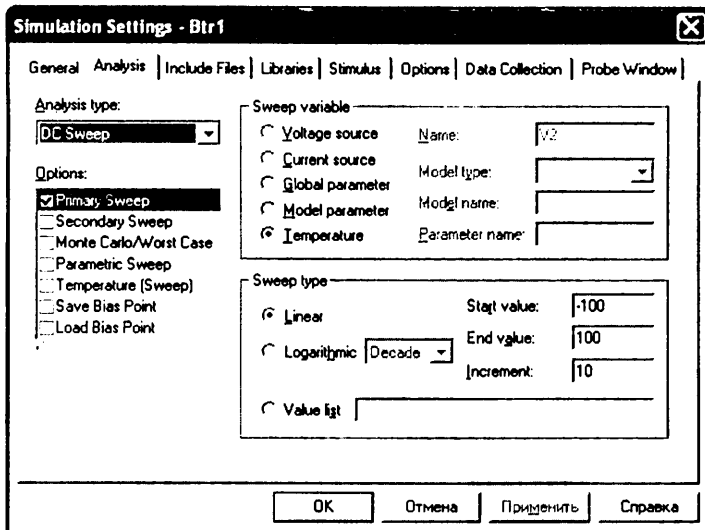


Рис. 4.90. Установка параметров вариации температуры

указывается температура (*Temperature*), и задаются пределы ее перестройки. В поле *Start Value* устанавливается начальное значение температуры, в поле *End Value* – конечное значение, в поле *Increment* – значение шага изменения температуры, способ изменения (*Sweep Type*) – линейный (*Linear*).

3. Активизируется процесс моделирования посредством выбора в меню *PSpice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.
4. Для отображения результатов моделирования в виде коэффициента передачи по току от температуры в программе моделирования аналоговых и смешанных устройств *PSpice A/D* в качестве функции по оси *ou* устанавливается отношение тока коллектора к току базы (меню *Trace – Add Trace*).

Результаты моделирования приведены на рис. 4.91. Результаты представляют график зависимости коэффициента передачи по току от температуры для биполярного транзистора *BC547*.

4.5.5. Исследование частотных свойств биполярного транзистора

Исследование зависимости параметра h_{21} (коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером) биполярного транзистора от частоты осуществляется на основе файлов проектов:

- *BTR1-1.opj* – при исследовании математической модели биполярного транзистора *n-p-n*-типа 2Т312А (каталог *BTR1-1*, рис. 4.1);

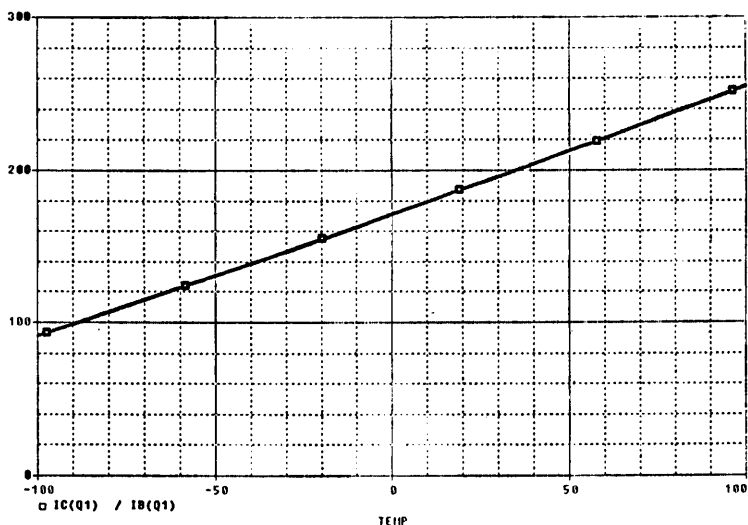


Рис. 4.91. График зависимости коэффициента передачи по току транзистора BC547 от температуры при $I_1 = 100$ мкА, $V_2 = 10$ В

- **BTR1-2.opj** – при исследовании математической модели биполярного транзистора $p-n-p$ -типа ГТ308В (каталог BTR1-2, рис. 4.1).

Для исследования зависимости параметра h_{21} биполярного транзистора от частоты используется процедура расчета частотных характеристик (*AC Sweep*), при этом режим работы транзистора задается с помощью источника тока I_1 и источника напряжения V_2 .

Исследование включает следующие этапы.

1. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* устанавливаются необходимые значения источников I_1 и V_2 , задающие режим работы БТ.
2. На рабочем поле схемотехнического редактора *Capture* размещается источник тока *IAC* (библиотека *Source.lib*). Амплитуда переменной составляющей (A_{ac}) устанавливается не более 10% от значения источника I_1 . В результате схема замещения принимает вид, представленный на рис. 4.92.
3. В меню *Edit Simulation setting* (рис. 4.93) на вкладке *Analysis* в окне *Analysis type* выбирается вид анализа *AC Sweep/Noise* (расчет частотных характеристик) и устанавливаются параметры перестройки частоты. В поле *Start Frequency* устанавливается начальная частота анализа, в поле *End Frequency* – конечная частота анализа, в поле *Points/Decade* – число точек на декаду, способ изменения (*AC Sweep Type*) – логарифмический (*logarithmic*).
4. Активируется процесс моделирования посредством выбора в меню *PSpice* пункта *Run* или через активацию клавиши *Run PSpice* на панели инструментов схемотехнического редактора *Capture*.
5. Для отображения результатов моделирования в виде коэффициента передачи по току от частоты в программе моделирования аналоговых и смешанных

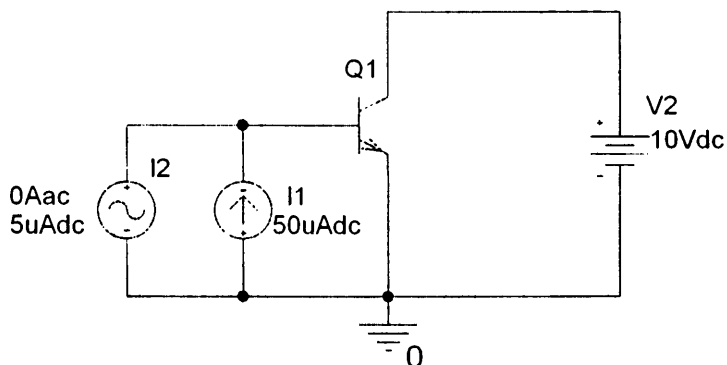


Рис. 4.92. Эквивалентная схема замещения для исследования частотных свойств БТ: Q1 – БТ $n-p-n$ -типа; I1 – источник постоянного тока; I2 – источник переменного тока; V2 – источник напряжения

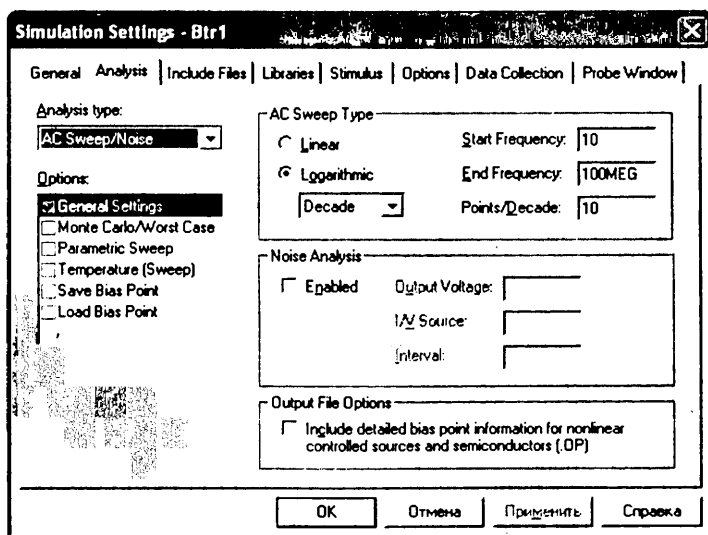


Рис. 4.93. Установка параметров перестройки частоты

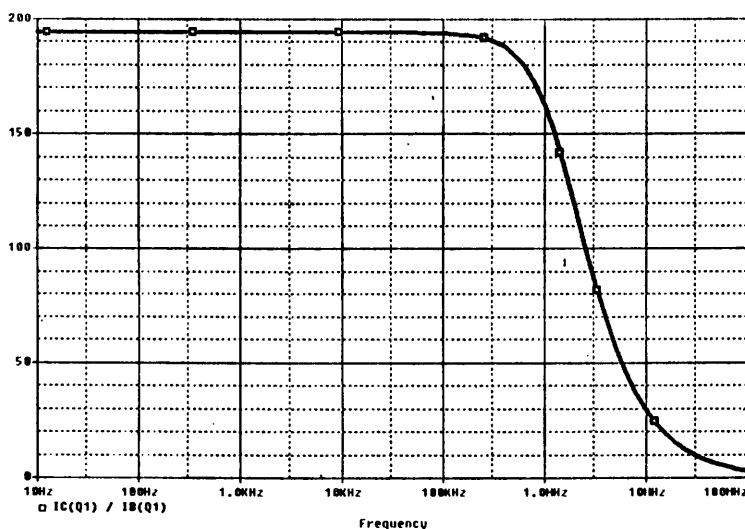


Рис. 4.94. График зависимости коэффициента передачи по току от частоты

устройств *PSpice A/D* в качестве функции по оси *ou* устанавливается отношение тока коллектора к току базы (меню *Trace – Add Trace*).

Результаты моделирования (рис. 4.94) представляют график зависимости коэффициента усиления по току от частоты, характеризующий частотные свойства биполярного транзистора.

Описание лабораторных работ по исследованию полупроводниковых приборов



Лабораторная работа № 1 Измерение и исследование ВАХ и параметров выпрямительных диодов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах выпрямительных полупроводниковых диодов путем экспериментального исследования их с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относятся:

- освоение методов экспериментального автоматического и ручного измерения вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных полупроводниковых диодов и методов их исследования с помощью моделирования на ПЭВМ;
- измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ характеристик и параметров выпрямительных диодов разного типа, их сопоставление, физическое обоснование, анализ соответствия теоретически определяемым характеристикам и параметрам.

3. Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый прибор, который имеет два электрода и один выпрямляющий $p-n$ -переход, называется диодом. Существуют разные виды полупроводни-

ковых диодов – выпрямительные, импульсные, обращенные, туннельные, лавинно-пролетные, опорные или зенеровские (стабилитроны), с регулируемой емкостью (варикапы) и т. д. Физические принципы работы основных видов полупроводниковых диодов, их характеристики, параметры, устройство и назначение изложены в [1, 2].

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. Выпрямительные полупроводниковые диоды изготавливаются, как правило, из кремния или германия. В зависимости от частоты выпрямляемого тока они делятся на низкочастотные и высокочастотные. В зависимости от мощности – на диоды малой, средней и большой мощности, что соответствует предельным значениям выпрямленного тока до 300 мА, от 300 мА до 10 А и выше 10 А. По конструкции выпрямительные диоды подразделяются на точечные и плоскостные, а в зависимости от технологии изготовления – на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

Точечные диоды имеют малую барьерную емкость, обусловленную малой площадью p - n -перехода, и применяются, как правило, на высоких и сверхвысоких частотах.

Мощные плоскостные диоды имеют большую площадь p - n -перехода, являются низкочастотными и используются, как правило, в выпрямительных устройствах для питания различной аппаратуры, такие диоды называются силовыми. Они изготавливаются преимущественно из кремния, поскольку германий характеризуется сильной зависимостью обратного тока через p - n -переход от температуры. Мощные кремниевые диоды рассчитаны на выпрямленный ток от 10 А до 500 А и обратное напряжение до 1000 В.

Для выпрямления высоких напряжений служат выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно включенных полупроводниковых диодов, выпрямленный ток которых может составлять несколько сот миллиампер, а напряжение – до 15 000 В.

Сплавные диоды чаще всего применяются для выпрямления переменного тока с частотой до 5 кГц и изготавливаются из кремния. Кремниевые диффузионные диоды могут работать на частотах до 100 кГц, а эпитаксиальные диоды с барьером Шоттки – на частотах до 500 кГц.

Зависимость тока через диод от напряжения на диоде называется вольт-амперной характеристикой диода. Теоретическое описание вольт-амперной характеристики (ВАХ) идеального p - n -перехода, полученное Уильямом Шокли и известное как уравнение Эберса – Молла, имеет вид

$$I = I_s(e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (5.1)$$

где U – напряжение на p - n -переходе диода, I_s – ток насыщения, $\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал. При $T = 300$ К $\varphi_T = 25$ мВ. ВАХ идеального p - n -перехода приведена на рис. 5.1а.

При положительных и отрицательных напряжениях U , больших по модулю 0,1 В, ВАХ описывается упрощенным выражением

$$I = I_s e^{U/\varphi_T}. \quad (5.2)$$

При протекании большого прямого тока через диод падение напряжения возникает не только на $p-n$ -переходе, но и на объемном сопротивлении полупроводника R . В результате реальная ВАХ диода (рис. 5.1б) отличается от ВАХ идеального $p-n$ -перехода (рис. 5.1а) и описывается выражением

$$I = I_s e^{(U-IR)/\varphi_T}. \quad (5.3)$$

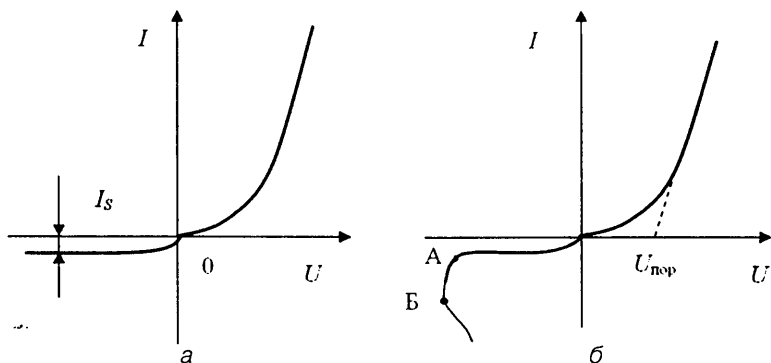


Рис. 5.1. Статические вольт-амперные характеристики идеального $p-n$ -перехода (а) и реального диода (б)

Различают прямую (при $U > 0$) и обратную (при $U < 0$) ветви ВАХ. Прямой ветви ВАХ соответствуют большие значения прямого тока диода и малые падения напряжения на диоде, обратной ветви – малые значения обратного тока диода при достаточно больших (по модулю) обратных напряжениях на диоде. Свойством проводить ток практически в одном направлении (свойство односторонней проводимости) и определяется использование диода для целей выпрямления переменного тока.

На прямой ветви ВАХ выпрямительного диода выделяют условную точку ее резкого излома и соответствующее ей напряжение, называемое пороговым. Пороговое напряжение приближенно составляет 0,3 В для германиевых диодов, 0,6 В – для кремниевых и 1,2 В – для арсенид-галлиевых.

Важным параметром диода является коэффициент выпрямления K_v , который определяется как отношение прямого тока к обратному при одинаковой (по модулю) величине прямого и обратного напряжений (например: $\pm 0,01$ В; $\pm 0,1$ В; ± 1 В) [3]. Для идеального диода $K_v = 1$ при $U = \pm 0,01$ В. При $U = \pm 1$ В $K_v = 2,8 \cdot 10^{20}$.

Для реального диода существует максимально допустимый прямой ток $I_{пр\max}$, превышение которого приводит к его недопустимому разогреву и тепловому пробое. Значение $I_{пр\max}$ относится к справочным предельным параметрам диодов. Для диодов малой мощности предельный прямой ток составляет десятки миллиампер.

При приложении определенного обратного напряжения, называемого напряжением пробоя, начинается процесс лавинообразного нарастания тока, что соот-

ветствует электрическому пробую $p-n$ -перехода (отрезок А–Б на рис. 5.1б). Если в этот момент ток не ограничить, то электрический пробой переходит в тепловой (участок ВАХ после точки Б).

Максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\ max}$ также является важным предельным параметром выпрямительных диодов и составляет для диодов малой мощности десятки-сотни вольт.

Полупроводниковый диод характеризуется статическим и дифференциальным (динамическое) сопротивлениями, которые определяются по его ВАХ.

Дифференциальное сопротивление диода представляет отношение приращения напряжения на диоде к приращению тока через диод:

$$r_d = dU/dI. \quad (5.4)$$

Оно имеет большое значение на обратной ветви ВАХ и малое значение, обратно пропорциональное току диода, – на прямой ветви ВАХ диода (рис. 5.2).

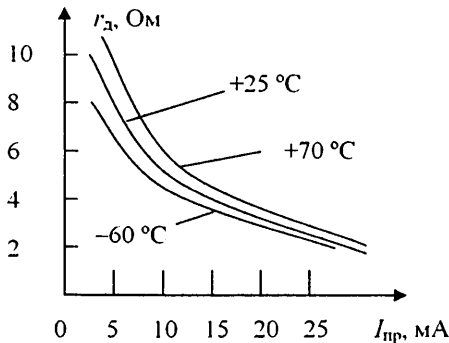


Рис. 5.2. Зависимость дифференциального сопротивления диода ГД402 от величины прямого тока

Для диодов малой мощности дифференциальное сопротивление составляет единицы-десятки ом, для более мощных диодов – десятые доли ома.

Статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току) определяется отношением напряжения на диоде к протекающему через него току:

$$R_{дст} = U/I. \quad (5.5)$$

Свойства полупроводниковых диодов сильно зависят от температуры. При повышении температуры прямой и обратный токи диода возрастают. У германиевых диодов обратный ток увеличивается в 2 раза на каждые 10 °C повышения температуры. Прямой ток диода растет при нагреве не так сильно, как обратный, поскольку он возникает за счет примесной проводимости. При возрастании температуры ВАХ диода сдвигается влево.

На рис. 5.3а приведено условное графическое обозначение полупроводникового диода на электрических схемах, а на рис. 5.3б – структура полупроводникового диода.

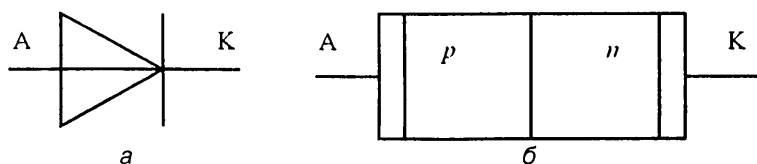


Рис. 5.3. Условное обозначение (а) и структура (б) полупроводникового диода

Электрод диода, подключенный к области p , называют анодом (А), а электрод, подключенный к области n , – катодом (К).

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомьтесь с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучите теоретические сведения к работе.

Ознакомьтесь с описанием и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом (АПК УД) «Электроника» при измерении вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройдите входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получите вариант задания выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов

Необходимо с помощью средств АПК УД «Электроника» измерить в ручном и автоматическом режимах прямую и обратную ветви вольт-амперных характеристик выпрямительного диода заданного типа. Определить статические и дифференциальные сопротивления диода в заданных точках ВАХ с помощью расчетов и автоматических курсорных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана АПК УД «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Диод», лабораторную работу – «Измерение и исследование ВАХ» и тип диода (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.9) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с нижеприводимыми частными заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. Выполните измерение прямой ветви ВАХ диода в ручном режиме при включенном токоизмерительном резисторе $R_t = 300$ Ом для значений ЭДС источника, задаваемых от нуля до значения $E = E_{\text{кон}}$, ограниченного верхним пределом измерения по току измерителя ВАХ или предельным током исследуемого диода.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.3.1. Выберите режим измерения «Ручной». Подключите на схеме измерения токоизмерительный резистор $R_t = 300$ Ом. Установите с помощью движка значение ЭДС источника $E = 0$. Проведите измерение, нажав на клавишу «Измерение». Убедитесь в появлении измеренной точки ВАХ в окне графики. Полученные значения тока и напряжения зафиксируйте в памяти цифрового индикатора и в окне графики путем нажатия кнопки «Запись».

5.3.2. Выберите шаг ΔE изменения ЭДС источника E , равный (0,2–0,3) В для германиевого диода и (0,3–0,5) В – для кремниевых.

Установите с помощью движка или с клавиатуры значение $E = \Delta E$ и проведите измерение. Убедитесь в появлении второй точки ВАХ в окне графики и второй строки данных на цифровом индикаторе.

Результаты измерения зафиксируйте в памяти цифрового индикатора и в окне графики нажатием кнопки «Запись».

5.3.3. Продолжите измерения, увеличивая ЭДС источника E с выбранным шагом ΔE и фиксируя результаты каждого измерения на цифровом и графическом индикаторах.

Контролируйте измеренные значения тока диода. Измерения завершите при максимальном значении тока диода $I_{\text{д, max}}$, удовлетворяющем условию: $I_{\text{д, max}} \leq I_{\text{пр}}$, $I_{\text{д, max}} \leq I_{\text{изм, max}}$, где $I_{\text{изм, max}} = 30$ мА – верхний предел измерения по току измерителя ВАХ.

Отметьте соответствующее току $I_{\text{д, max}}$ конечное значение ЭДС источника $E = E_{\text{кон}}$ и конечное максимальное значение напряжения на диоде $U_{\text{д, кон}}$.

По графику ВАХ определите напряжение ее резкого изгиба, называемое пороговым напряжением $U_{\text{д, пор}}$, которое запишите в рабочую тетрадь для отчета (или в формируемый в процессе выполнения работы электронный отчет).

Возможно также проведение дополнительных измерений в отдельных, представляющих интерес точках ВАХ, как и измерение ВАХ с неравномерным шагом изменения ЭДС E на различных участках характеристики.

Значение $E_{\text{кон}}$ может быть определено также расчетным путем (при подготовке или выполнении лабораторной работы) по известным значениям $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{изм, max}} = 30$ мА и $R_t = 300$ Ом в соответствии с соотношениями: $E_{\text{кон}} = 10$ В при $I_{\text{пр}} > 30$ мА и $E_{\text{кон}} = -I_{\text{пр}} R_t + U_{\text{д, max}}$ при $I_{\text{пр}} \leq 30$ мА, где $U_{\text{д, max}} \approx 0,6$ В для германиевых диодов и $U_{\text{д, max}} \approx 1$ В для кремниевых.

Сохраните для отчета копию лицевой панели виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора ручных измерений и график измеренной ВАХ с помощью клавиши «Сохранение».

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.3

По результатам измерения ВАХ в ручном режиме определите значения статического $R_{дст}$ и дифференциального r_d сопротивлений диода в трех точках: вблизи точки изгиба (порогового напряжения), при ЭДС $E = E_{кон}/2$, при ЭДС $E = E_{кон}$.

По значениям тока диода в указанных точках ВАХ рассчитайте теоретические значения статического $R_{дст}$ и дифференциального r_d сопротивлений диода.

5.4. Выполните измерение обратной ветви ВАХ диода в ручном режиме при включенном токоизмерительном резисторе $R_t = 100$ кОм для значений ЭДС источника E , изменяемых от $E_{нач}$, ограниченного допустимым обратным напряжением диода $U_{обр}$, до $E = 0$.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Измерение обратной ветви ВАХ диода выполните путем задания значений ЭДС E , проведения измерения, записи результатов измерения в память цифрового индикатора и фиксации их в окне графики. Значение $E_{нач}$ для исследуемых диодов равно -10 В. Шаг изменения ЭДС может быть принят равным 1 В в диапазоне $-10 \leq E < -1$ В и $0,25$ В в диапазоне $0 \leq E \leq -1$ В.

Дополнительно в индивидуальном порядке можно измерить начальный участок прямой ветви ВАХ при значениях $0 \leq E \leq 10$ В с подключенным токоизмерительным резистором $R_t = 100$ кОм.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора ручных измерений и график измеренной обратной ветви ВАХ.

5.5. Выполните измерение прямой ветви ВАХ диода в автоматическом режиме при включенном токоизмерительном резисторе $R_t = 300$ Ом и значениях пределов $E_{нач}$, $E_{кон}$ и шага изменения dE ЭДС источника E , которые найдены или рекомендованы в пункте 5.3 при ручном измерении прямой ветви ВАХ.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.5.1. Подключите на схеме измерения лицевой панели виртуального лабораторного стенда токоизмерительный резистор $R_t = 300$ Ом и перейдите в режим измерения «Автоматический».

При отжатом положении клавиши «Принять» введите значение $E_{нач} = 0$ и значения $E_{кон}$ и dE (шаг изменения ΔE), которые найдены или рекомендованы при ручном измерении прямой ветви ВАХ в пункте 5.3. Шаг dE при автоматическом измерении для большей точности можно задать меньшим (например, вдвое), чем при ручном измерении; его введенное значение при этом автоматически округляется до ближайшего дискретного значения, кратного $0,05$ В. Предел измерения по току $I_{изм\ max}$ установите равным значению $I_{д\ max}$, найденному в пункте 5.3.3.

Нажатием клавиши «Принять» подтвердите введенные параметры измерения. Если будет выдано сообщение об ошибке ввода, выявите и устраните эту ошибку.

Нажмите клавишу «Измерение».

5.5.2. После успешного завершения измерения по выведенному графику зависимости $U_d = f(E)$ определите пределы параметров вывода ВАХ $U_{д.нач}$, $U_{д.кон}$ и сравните их со значениями, автоматически выводимыми на индикаторы панели «Па-

параметры вывода ВАХ». При $E = E_{\text{нач}} = 0$ $U_{\text{д.нач}}$ также должно быть равно нулю, а при $E = E_{\text{кон}}$ близко к значению $U_{\text{д.кон}}$, найденному в пункте 5.3.3.

При необходимости значение $U_{\text{д.кон}}$ может быть скорректировано в желаемом направлении.

5.5.3. Последовательно просмотрите графики выводимых зависимостей: $I_{\text{д}} = f(E)$, $I_{\text{д}} = f(U_{\text{д}})$ (ВАХ), $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$. По графику $I_{\text{д}} = f(U_{\text{д}})$ или $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ определите приближенное значение порогового напряжения (напряжение изгиба) ВАХ $U_{\text{д.пор}}$.

Сохраните для отчета графики $I_{\text{д}} = f(E)$, $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$.

Выведите поочередно графики зависимостей статического и дифференциального сопротивлений диода $R_{\text{д.ст}} = f(I_{\text{д}})$, $r_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ от тока диода $I_{\text{д}}$. Для более информативного представления зависимостей графики можно вывести раздельно для двух пределов параметров вывода, например: $U_{\text{д.нач}} = 0,2U_{\text{д.пор}}$, $U_{\text{д.кон}} = U_{\text{д.пор}}$ и $U_{\text{д.нач}} = U_{\text{д.пор}}$, $U_{\text{д.кон}} = U_{\text{д.кон макс.}}$.

Сохраните для отчета графики $R_{\text{д.ст}} = f(I_{\text{д}})$, $r_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$.

5.5.4. Выведите график прямой ветви ВАХ $I_{\text{д}} = f(U_{\text{д}})$.

Проведите курсорные измерения в трех точках ВАХ: в точке порогового напряжения (изгиба), которой соответствует некоторое значение ЭДС $E_{\text{пор}}$, в точке, соответствующей $E_{\text{кон}}$, и в точке, соответствующей $(E_{\text{пор}} + E_{\text{кон}})/2$. Измеренные значения E , $I_{\text{д}}$, $U_{\text{д}}$, $R_{\text{д.ст}}$, $r_{\text{д}}$ запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и график выводимой прямой ветви ВАХ диода.

5.6. Выполните измерение обратной ветви ВАХ диода в автоматическом режиме при включенном токоизмерительном резисторе $R_{\text{т}} = 100$ кОм для значений ЭДС источника E от нуля до $E_{\text{кон}} = -10$ В с шагом $dE = 0,5$ В.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.6.1. Подключите на схеме измерения токоизмерительный резистор $R_{\text{т}} = 100$ кОм. Установите режим измерения «Автоматический». Задайте параметры автоматического измерения ВАХ: $E_{\text{нач}} = -10$ В, $E_{\text{кон}} = 0$, $dE = 0,5$ В. Подтвердите заданные параметры измерения нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение ВАХ, нажав клавишу «Измерение».

5.6.2. При автоматически установленных параметрах вывода $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$ выведите на экран график обратной ветви ВАХ $I_{\text{д}} = f(U_{\text{д}})$. С помощью курсорных измерений найдите и запишите в память цифрового индикатора значения E , $I_{\text{д}}$, $U_{\text{д}}$, $R_{\text{д.ст}}$, $r_{\text{д}}$ для двух точек обратной ветви ВАХ, соответствующих $E_{\text{нач}}$ и $E_{\text{нач}}/2$.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора курсорных измерений и график обратной ветви ВАХ.

Ввиду малости измеряемых обратных токов, соизмеримых со случайной погрешностью измерения, рекомендуется для повышения точности повторить измерения по пунктам 5.6.1, 5.6.2 и усреднить их результаты.

5.6.3. При желании, установив $E_{\text{нач}} = 0$, $E_{\text{кон}} = 10$ В, $dE = 0,1$ В, в автоматическом режиме дополнительно снимите начальный участок прямой ветви ВАХ при токоизмерительном сопротивлении $R_{\text{т}} = 100$ кОм.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.6

По результатам автоматического измерения обратной ветви ВАХ и начального участка прямой ветви ВАХ диода сравните значения статических сопротивлений диода для нескольких точек обеих ВАХ, соответствующих одинаковым по модулю значениям напряжения на диоде, и по значениям токов диода в этих точках рассчитайте значения коэффициентов выпрямления.

5.7. По индивидуальному заданию преподавателя проведите измерение ВАХ диода другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип диода. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.8. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов.

6. Задание для исследования вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы *OrCAD* по математической модели выпрямительного диода заданного типа (см. приложение 2) рассчитайте его вольт-амперную характеристику в диапазоне, ограниченном предельными значениями прямого тока $I_{пр}$ и обратного напряжения $U_{обр}$ диода. Расчеты проведите для номинальной ($t_{ном}^0$) и предельных (t_{min}^0, t_{max}^0) рабочих температур диода.

Сопоставьте результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов, приведенными в параграфе 4.2.1.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования графики прямой и обратной ветвей ВАХ диода.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения прямого и обратного токов диода, обусловленные изменением температуры диода.

Сравните ВАХ диода, полученные путем измерения и моделирования при номинальном значении температуры.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых диодов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;
- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и обработки по пункту 5, включающие:
 - показания цифрового индикатора ручных измерений и графики прямой ветви ВАХ, измеренной в ручном режиме (пункт 5.3.3);
 - значения пороговых напряжений диодов $U_{д.пор}$, определенные по прямой ветви ВАХ, измеренной в ручном режиме (пункт 5.3.3);
 - найденные значения $R_{д.ст}$, r_d в трех точках прямой ветви ВАХ, измеренной в ручном режиме в соответствии с заданием на обработку результатов измерения по пункту 5.3;
 - показания цифрового индикатора ручных измерений и графики измеренной в ручном режиме обратной ветви ВАХ (пункт 5.4);
 - графики зависимостей $I_d = f(E)$, $U_d = f(I_d)$, $R_{д.ст} = f(I_d)$, $r_d = f(I_d)$ по результатам измерения прямой ветви ВАХ в автоматическом режиме с соответствующей им строкой состояния (пункт 5.5.3);
 - значения пороговых напряжений диодов $U_{д.пор}$, определенные по прямой ветви ВАХ, измеренной в автоматическом режиме (пункт 5.5.3);
 - график прямой ветви ВАХ диода $I_d = f(U_d)$, измеренной в автоматическом режиме, и результаты курсорных измерений в заданных ее точках (пункт 5.5.4);
 - график измеренной в автоматическом режиме обратной ветви ВАХ и результаты курсорных измерений в ее заданных точках (пункт 5.6.2);
 - график измеренного в автоматическом режиме начального участка обратной ветви ВАХ (пункт 5.6.3);
 - вычисленные значения коэффициентов выпрямления и статических сопротивлений диода в соответствии с заданием на обработку результатов измерения по пункту 5.6;
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
 - графики прямой и обратной ветвей ВАХ диода для трех значений рабочей температуры;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения прямого и обратного токов диода, обусловленные изменением температуры диода;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов ручных, автоматических измерений и моделирования и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Что называется электронно-дырочным переходом?
2. Какой электронный прибор называется полупроводниковым диодом?
3. Каковы отличительные признаки выпрямительных полупроводниковых диодов?
4. В чем отличие точечных выпрямительных диодов от плоскостных?
5. Какие материалы и технологии используются для изготовления выпрямительных диодов?
6. Чем отличаются свойства германиевых и кремниевых диодов?
7. Какой вид имеет зависимость тока через диод при прямом и обратном смещениях и как она называется?
8. Какой порядок имеют прямой и обратный токи выпрямительных диодов? Объясните различие их значений.
9. Что такое ток насыщения диода, от чего он зависит?
10. Какое напряжение вольт-амперной характеристики называется пороговым и почему?
11. Как и почему различаются вольт-амперные характеристики выпрямительных диодов разного типа?
12. Какие параметры диода и как определяются по его вольт-амперной характеристике?
13. Зависит ли значение дифференциального сопротивления диода от значения протекающего через него тока?
14. Какие модели и параметры используются для математического описания вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов?
15. Каковы причины возможного отклонения измеренных ВАХ и параметров выпрямительных диодов от теоретически предсказуемых?
16. Как зависит ток через диод от температуры, чем обусловлена эта зависимость?
17. Для чего необходимо знать вольт-амперные характеристики и параметры выпрямительных диодов, как они используются на практике?

Лабораторная работа № 2

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах выпрямительных полупроводниковых диодов путем их экспериментального ис-

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать результаты выполнения лабораторной работы, приводимые в отчете.

следования с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

Задачами лабораторной работы являются физическое измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов разного типа и разных экземпляров диодов одного типа с целью их сопоставления и анализа причин расхождения, обусловленного несовершенством технологии.

3. Краткие теоретические сведения

Характеристики и параметры реальных полупроводниковых приборов, в том числе выпрямительных диодов, имеют, как правило, существенный разброс относительно среднестатистических характеристик и параметров, приводимых в справочных данных. Различие в свойствах приборов одного типа обусловлено многими факторами, но в первую очередь связано с технологией выращивания, очистки и обработки полупроводниковых кристаллов, а также последующими операциями их изготовления [1].

Численное значение параметра, установленное техническими условиями или государственным стандартом, называется *номинальным значением* параметра. Номинальные значения параметров устанавливают, исходя из технологических возможностей производства и потребностей применения, на основе статистической обработки результатов испытаний опытных партий приборов [2].

Статистический разброс параметров, обусловленный несовершенством технологии, оценивают по их максимально допустимым отклонениям от номинальных значений. Эти отклонения называют *допусками* и выражают либо в относительных единицах (процентах), либо в крайних значениях параметра. Для выпрямительных диодов статистический разброс учитывается в приводимом максимально допустимом обратном напряжении $U_{обр\ max}$ и максимально допустимом прямом постоянном токе $I_{пр\ max}$ (например, для диода КД522А они равны 20 В и 100 мА).

Отклонение характеристик и параметров диодов от номинальных значений может быть обусловлено также сильной зависимостью их от температуры. Например, обратный ток диодов может увеличиваться примерно в 2 раза при увеличении температуры на каждые 10 °С. Это следует учитывать при исследовании технологического разброса характеристик и параметров полупроводниковых диодов.

Наличие технологического разброса характеристик и параметров выпрямительных диодов приводит к снижению качества использующих их электронных устройств и должно учитываться при их разработке и сервисном обслуживании.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомьтесь с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучите теоретические сведения к работе.

Ознакомьтесь с описанием и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» при исследовании

технологического разброса ВАХ выпрямительных диодов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройдите входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получите вариант задания выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов

С помощью средств АПК УД «Электроника» в автоматическом режиме измерьте прямые и обратные ветви ВАХ четырех однотипных диодов и с помощью курсорных измерений определите параметры, характеризующие их различие (разброс) в заданных точках ВАХ. Оцените долю статистического разброса ВАХ, обусловленную технологией изготовления диодов и погрешностями измерения путем проведения многократных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Диод», лабораторную работу – «Исследование технологического разброса» и заданный тип диода (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.13) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с приводимыми ниже заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. Выполните автоматическое измерение прямых ветвей ВАХ четырех однотипных диодов при подключенном токоизмерительном резисторе $R_t = 300$ Ом. С помощью курсорных измерений в трех точках усредненной ВАХ определите средние значения и максимальные абсолютные и относительные отклонения от средних значений токов диодов и напряжений на диодах $U_{д.ср}$, $I_{д.ср}$, dU_d , dI_d , dU_d , %, dI_d , %, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению их результатов

Ознакомьтесь с выведенными на лицевую панель по умолчанию параметрами автоматического измерения ВАХ – начальным, конечным значениями и шагом изменения ЭДС $E_{нач}$, $E_{кон}$, dE и предельным измеряемым током $I_{изм\ max}$. Установите значение ЭДС $E_{нач} = 0$, соответствующее измерению прямой ветви ВАХ. Подтвердите заданные параметры нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение. После успешного завершения измерения на графическом индикаторе должны появиться отличающиеся цветом и типом линии графики измеренных прямых ветвей ВАХ четырех диодов $I_d = f(U_d)$ и ВАХ, полученной их усреднением $I_{д.ср} = f(U_{д.ср})$.

По измеренным характеристикам и строке состояния проверьте, отличается ли фактическое значение параметра измерения $E_{\text{кон}}$ от заданного, объясните возможные причины отличия.

Выберите с помощью параметров вывода $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$ и просмотрите локальные участки ВАХ диодов в области малых и области больших токов, качественно оцените различия статических и дифференциальных сопротивлений отдельных диодов на этих участках.

Вернитесь к исходным автоматически выводимым значениям параметров вывода ВАХ $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения относительно усредненной ВАХ в трех ее точках – вблизи порогового напряжения $u_{\text{пор}}$ (напряжение изгиба ВАХ), при $U_{\text{д}} = U_{\text{д.кон}}$ (верхний автоматически выводимый предел параметра вывода ВАХ) и в промежуточной точке между ними. Измеренные значения параметров статистического разброса прямых ветвей ВАХ $U_{\text{д.ср}}$, $I_{\text{д.ср}}$, $dU_{\text{д}}$, $dI_{\text{д}}$, $dU_{\text{д}}$, %, $dI_{\text{д}}$, %, запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и графики измеренных прямых ветвей и локальных участков ВАХ диодов.

5.4. Выполните автоматическое измерение обратных ветвей ВАХ четырех однотипных диодов при подключенном токоизмерительном резисторе $R_{\text{т}} = 100 \text{ кОм}$. С помощью курсорных измерений в трех точках усредненной ВАХ определите средние значения и максимальные абсолютные и относительные отклонения от средних значений токов диодов и напряжений на диодах $U_{\text{д.ср}}$, $I_{\text{д.ср}}$, $dU_{\text{д}}$, $dI_{\text{д}}$, $dU_{\text{д}}$, %, $dI_{\text{д}}$, %, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Установите значения параметров автоматического измерения ВАХ $E_{\text{нач}} = -10 \text{ В}$, $E_{\text{кон}} = 0$, $dE = 0,5 \text{ В}$, $I_{\text{изм. max}} = 0,1 \text{ мА}$, соответствующие измерению обратных ветвей ВАХ. Подтвердите заданные параметры нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение. После успешного завершения измерения на графическом индикаторе должны появиться отличающиеся цветом и типом линии графики измеренных обратных ветвей ВАХ четырех диодов $I_{\text{д}} = f(U_{\text{д}})$ и ВАХ $I_{\text{д.ср}} = f(U_{\text{д.ср}})$, полученной их усреднением.

Проанализируйте визуально различия обратных ветвей ВАХ диодов в области точки $U_{\text{д}} = -5 \text{ В}$, выделив эту область с помощью параметров вывода ВАХ $U_{\text{д.нач}}$, $U_{\text{д.кон}}$.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения относительно усредненной ВАХ при напряжении на диодах $U_{\text{д}} = -5 \text{ В}$. Измеренные значения параметров статистического разброса обратных ветвей ВАХ $U_{\text{д.ср}}$, $I_{\text{д.ср}}$, $dU_{\text{д}}$, $dI_{\text{д}}$, $dU_{\text{д}}$, %, $dI_{\text{д}}$, %, запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и графики измеренных обратных ветвей ВАХ диодов.

5.5. Оцените влияние случайной погрешности при измерении технологического разброса ВАХ.

Задание для измерения. Выполните повторно измерение обратных ветвей ВАХ при тех же параметрах автоматического измерения, что и в пункте 5.4. С помощью курсорных измерений в той же точке усредненной ВАХ определите параметры статистического разброса ВАХ диодов. Сравните их с измеренными в пункте 5.4 данной лабораторной работы.

Указания по проведению измерений

Не изменяя параметров автоматического измерения пункта 5.4, проведите повторное измерение обратных ветвей ВАХ диодов.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения относительно усредненной ВАХ при напряжении на диодах $U_d = -5$ В. Измеренные повторно значения параметров статистического разброса обратных ветвей ВАХ $U_{дср}$, $I_{дср}$, dU_d , dI_d , dU_d , %, dI_d , %, запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Для повышения точности оценок технологического разброса в заданной точке ВАХ можно повторить физические и курсорные измерения многократно и усреднить их результаты.

Сохранение результатов измерения по пункту 5.5

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и графики повторно измеренных обратных ветвей ВАХ диодов.

Задание для обработки результатов измерения

На основе сравнения результатов измерения статистического разброса ВАХ по пунктам 5.4, 5.5 данной лабораторной работы сделайте выводы о доле случайной составляющей погрешности измерения в получаемых оценках технологического разброса ВАХ диодов и о возможности уменьшения ее путем усреднения результатов многократных измерений.

5.6. По индивидуальному заданию проведите измерения для диода другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип диода. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.7. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров выпрямительных диодов.

6. Задание для исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы *OrCAD* рассчитайте вольт-амперные характеристики четырех однотипных выпрямительных диодов по их математической модели (см. приложение 2) при заданном технологическом разбросе *объемного сопротивления* диода, равном 10%, в диапазоне изменения токов и напряжений, ограниченном их предельными значениями $I_{пр}$, $U_{обр}$, и номинальным значением температуры. Сопоставьте результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов, приведенными в параграфе 4.2.2.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования графики прямой и обратной ветвей ВАХ диодов с учетом их технологического разброса.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения прямого и обратного токов диодов одного типа, обусловленные технологическим разбросом их вольт-амперных характеристик.

Сравните результаты измерения и моделирования технологического разброса ВАХ выпрямительных диодов.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы;
- 2) вид лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик германиевых и кремниевых диодов по пункту 5, включающие:
 - измеренные графики прямых ветвей ВАХ диодов и результаты курсорных измерений в заданных точках усредненной ВАХ (пункт 5.3);
 - графики локальных участков прямых ветвей ВАХ диодов и приближенные оценки их дифференциальных сопротивлений (пункт 5.3);

- измеренные графики обратных ветвей ВАХ исследуемых диодов и результаты курсорных измерений в заданной точке усредненной обратной ветви ВАХ (пункт 5.4);
 - повторно измеренные графики обратных ветвей ВАХ диодов и результаты курсорных измерений в заданной точке усредненной ВАХ (пункт 5.5);
 - вывод о доминирующем источнике статистического разброса измеренных обратных ветвей ВАХ по пунктам 5.4, 5.5;
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
- графики прямой и обратной ветвей ВАХ диодов с учетом их технологического разброса;
 - максимальные абсолютные и относительные отклонения прямого и обратного тока диодов, обусловленные технологическим разбросом;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие материалы и технологии используются при изготовлении полупроводниковых диодов?
2. Как взаимосвязаны ВАХ и параметры выпрямительных полупроводниковых диодов с материалами и технологиями, которые используются в их производстве?
3. Что понимается под технологическим разбросом ВАХ и параметров выпрямительных полупроводниковых диодов?
4. Какова физическая природа технологического разброса ВАХ и параметров у полупроводниковых диодов одного типа?
5. Как проявляется технологический разброс на ВАХ исследуемых однотипных диодов?
6. С помощью каких технологических приемов и методов достигается уменьшение технологического разброса ВАХ полупроводниковых диодов?
7. Что понимается под номинальным значением параметра полупроводникового прибора?
8. Как называют максимально допустимые отклонения значений параметров от номинальных?
9. Что можно сказать об уровне технологического разброса диодных сборок, выполненных на одном кристалле?
10. Как разделить составляющие статистического разброса, обусловленные технологией и измерениями?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, используйте относящиеся к ним результаты выполнения лабораторной работы, приводимые в отчете.

11. Как в справочных данных и математических моделях выпрямительных диодов учитывается технологический разброс их параметров? Приведите примеры.
12. Какова отрицательная роль технологического разброса ВАХ и параметров выпрямительных диодов в электронных схемах? Приведите примеры.

Лабораторная работа № 3

Исследование работы выпрямительных диодов на переменном токе

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о характеристиках, параметрах и определяемых ими применениях полупроводниковых выпрямительных диодов путем экспериментального исследования их с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относится изучение работы маломощного выпрямительного диода в простейшей схеме однополупериодного выпрямителя путем физического измерения и исследования с помощью моделирования на ПЭВМ осциллограмм напряжений и токов в различных точках схемы и обоснования их посредством вольт-амперной характеристики диода.

3. Краткие теоретические сведения

Выпрямителями в общем случае называются устройства, предназначенные для преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямители на основе полупроводниковых диодов применяются в источниках питания радиоэлектронной аппаратуры, а также используются в качестве измерительных преобразователей, амплитудных детекторов сигналов, умножителей напряжения и др. Существуют различные виды полупроводниковых выпрямителей, отличающиеся количеством диодов, схемой их включения, типом сглаживающего фильтра. Простейшая схема для выпрямления переменного тока показана на рис. 5.4а. Она включает в себя генератор переменной ЭДС (e), диод VD и нагрузочный резистор R_n . Эта схема называется однополупериодной схемой выпрямления с активной нагрузкой [1].

Для питания радиоэлектронной аппаратуры в качестве источника переменной ЭДС обычно служит силовой трансформатор, включенный в электрическую сеть (рис. 5.4б).

Однофазный однополупериодный выпрямитель пропускает на выход только одну полуволну выпрямляемого напряжения (рис. 5.5). Полезной частью такого

напряжения является его *постоянная составляющая*, или *среднее значение* U_{cp} . Для однополупериодной схемы среднее значение напряжения определяется как

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = U_m / \pi = 0,31 U_m, \quad (5.6)$$

где U_m (или E_m) – амплитуда напряжения источника e (для схемы рис. 5.4б – напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2).

Если напряжение источника составляет величину десятки-сотни вольт, то падением напряжения на диоде можно пренебречь и $U_{cp} \approx 0,3 E_m$. При выпрямлении переменного напряжения небольшой амплитуды (единицы вольт) необходимо

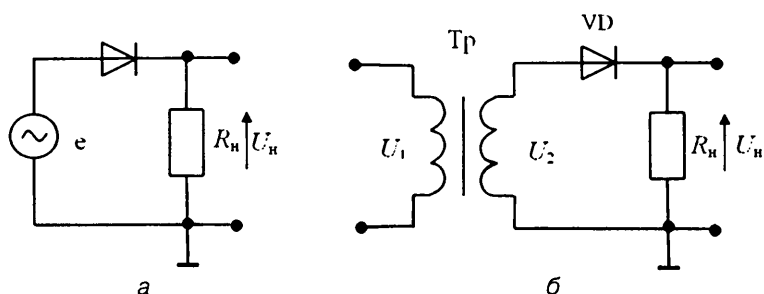


Рис. 5.4. Схема однополупериодного выпрямителя:
 e – источник ЭДС, Tr – трансформатор, U_1 , U_2 – напряжение на первичной и вторичной обмотках трансформатора, VD – выпрямительный диод, R_n – сопротивление нагрузки, U_n – напряжение на нагрузке

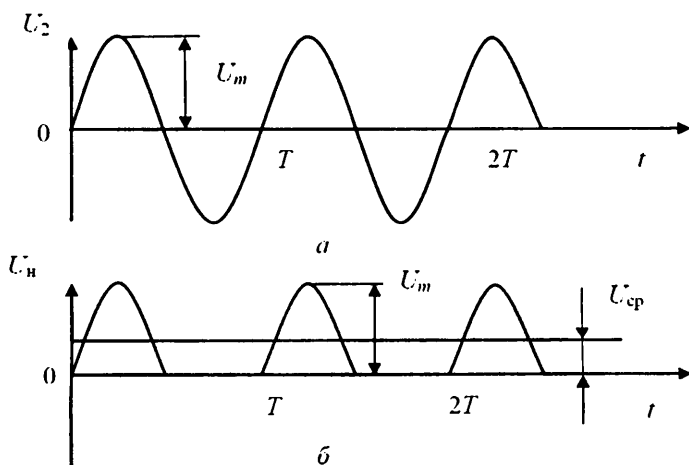


Рис. 5.5. Форма напряжений на входе (а) и выходе (б) однополупериодного выпрямителя

учитывать падение напряжения на диоде, которое может составлять до 0,6 В для маломощных германиевых диодов и более 1 В для кремниевых. Оно приводит к потере мощности на диоде и снижению коэффициента полезного действия выпрямителя.

При отрицательной полуволне все напряжение источника приложено к диоду и является для него обратным. Максимальное значение обратного напряжения $U_{обр}$ равно амплитуде ЭДС источника (напряжение на вторичной обмотке трансформатора).

Важным параметром, характеризующим работу выпрямителя, является коэффициент пульсаций k_n [2]:

$$k_n = U_{m1} / U_{cp} \quad (5.7)$$

Он определяется как отношение амплитуды первой гармоники U_{m1} переменного напряжения на нагрузке, получаемой путем разложения его в ряд Фурье, к среднему значению напряжения на нагрузке. Для однополупериодного выпрямителя

$$U_{m1} = 0,5 \cdot U_m = 1,57 \cdot U_{cp} \quad (5.8)$$

что соответствует значению коэффициента пульсаций $k_n = 1,57$. Выпрямленное напряжение с такими большими пульсациями непригодно для практических целей. Некоторое уменьшение пульсаций дают более сложные двухполупериодные схемы выпрямления.

Для эффективного сглаживания пульсаций в выпрямительных схемах применяются сглаживающие фильтры. Простейший способ сглаживания пульсаций – включение конденсатора большой емкости C_Φ параллельно нагрузке (рис. 5.6). Конденсатор обеспечивает хорошее сглаживание, если его сопротивление на частоте основной

гармоники пульсаций ω_n намного меньше сопротивления нагрузки: $\frac{1}{\omega_n C_\Phi} > R_n$.

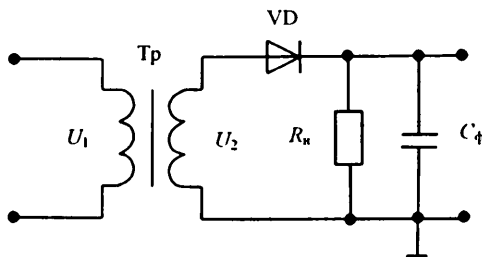


Рис. 5.6. Схема выпрямителя со сглаживающим фильтром

Работу выпрямителя со сглаживающим конденсатором иллюстрирует рис. 5.7, где приведены графики ЭДС источника e , тока через диод i и напряжения на конденсаторе U_c , равного напряжению на нагрузке U_n .

При включении конденсатора большой емкости средневывпрямленное значение напряжения U_{cp} стремится к амплитудному значению U_m и может достигать $(0,80-0,95)U_m$.

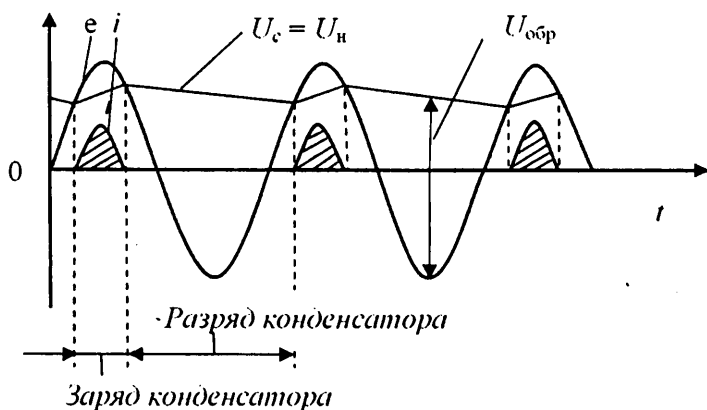


Рис. 5.7. Сглаживание пульсаций с помощью конденсатора

Сведения о более сложных схемах выпрямления с большим числом используемых диодов — двухфазных, двухполупериодных, мостовых, с умножением напряжения, а также о других применениях выпрямительных диодов приводятся в рекомендуемой литературе [1–3].

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомьтесь с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучите теоретические сведения к работе.

Ознакомьтесь с описанием и техническими характеристиками АПК УД «Электроника» при исследовании работы выпрямительных диодов на переменном токе и с технологией их исследования посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройдите входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получите вариант задания выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования работы выпрямительных диодов на переменном токе

Для исследуемой схемы однополупериодного выпрямителя на основе маломощного полупроводникового диода с помощью средств АПК УД «Электроника» измерить осциллограммы напряжений и токов при различных значениях ЭДС смещения, амплитуды и частоты выпрямляемой ЭДС, сопротивления и емкости нагрузки. Оценить по экспериментальным данным среднее значение и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения и коэффициент выпрямления диода. Обосновать результаты исследования посредством вольт-амперной характеристики диода.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Диод», лабораторную работу – «Исследование работы прибора на переменном токе» и тип диода (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение». На открывшейся лицевой панели (рис. 3.17) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь по лицевой панели стенда с исследуемой схемой однополупериодного выпрямителя, лицевой панелью измерителя ВАХ и цифрового осциллографа, схемой подключения каналов осциллографа, с выведенными по умолчанию значениями параметров генераторов ЭДС.

5.3. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме однополупериодного выпрямителя при активной нагрузке $R_n = 333 \text{ Ом}$, нулевом постоянном смещении, максимальной амплитуде и заданной (низкой) частоте переменной (выпрямляемой) ЭДС.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.3.1. Установите параметры настройки осциллографа: входы каналов – открытые, число периодов развертки сигнала – 2. В процессе работы число периодов развертки сигнала можно изменить с учетом удобств визуализации сигналов и проведения курсорных измерений.

Проведите измерение ВАХ диода, нажав кнопку включения автоматического измерителя ВАХ. При успешном завершении измерения ознакомьтесь с выведенным графиком измеренной ВАХ.

Установите ЭДС источника постоянного смещения $E_0 = 0$, частоту колебаний источника переменной ЭДС $F = 100 \text{ Гц}$, сопротивление нагрузки $R_{н1} = 333 \text{ Ом}$.

Задайте найденное при подготовке к лабораторной работе максимально возможное значение амплитуды источника переменной ЭДС $E_m = E_{m \max}$, при котором максимальный ток диода и обратное напряжение на диоде не превысят предельных значений.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.3.2. Проведите *курсорные измерения* по выведенным осциллограммам.

Путем перемещения вертикального курсора на экране осциллографа посмотрите, как изменяется положение мгновенной рабочей точки в окне измерителя ВАХ диода. По индикаторам измерителя ВАХ диода определите максимальные и минимальные значения тока диода и напряжения на диоде и запишите их в рабочую тетрадь.

Определите по осциллограмме максимальное значение напряжения на нагрузке $U_{н \max}$, запишите его в рабочую тетрадь.

Переключите вход канала 3 осциллографа на закрытый и определите по осциллограмме измеренное среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке $U_{\text{ср.изм}}$, запишите его в рабочую тетрадь.

Для удобства анализа и курсорных измерений можно одновременно отображать на экране осциллограммы напряжений одного, двух или трех каналов путем выбора их с помощью кнопок «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3» лицевой панели осциллографа.

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального стенда и осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ.

5.3.3. Повторите исследования по пунктам 5.3.1, 5.3.2 для случая активно-емкостной нагрузки $10\text{ кОм}-1\text{ мкФ}$, $1\text{ кОм}-10\text{ мкФ}$, $10\text{ кОм}-10\text{ мкФ}$.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.3

По результатам измерения при различных нагрузках определите:

- среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{ср,рест}}$;
- среднее значение тока диода;
- выходную мощность (мощность, выделяющуюся на нагрузку);
- максимальное и минимальное значения тока диода и напряжения на диоде;
- мощность, теряемую на диоде;
- частоту и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

5.4. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме однополупериодного выпрямителя при активной нагрузке, нулевом постоянном смещении, максимальной амплитуде и максимальной частоте переменной (выпрямляемой) ЭДС.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

Установите параметры настройки осциллографа по пункту 5.3.1.

Установите ЭДС смещения $E_0 = 0$, амплитуду генератора переменной ЭДС $E_m = E_{m\text{ max}}$, частоту $F = 1000\text{ Гц}$, сопротивление нагрузки $R_n = 333\text{ Ом}$.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

Проанализируйте полученные осциллограммы напряжений и графики ВАХ и отметьте в рабочей тетради наблюдаемые отличия их по сравнению с измерениями на частоте $F = 100\text{ Гц}$.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ.

5.5. Повторите измерения по пункту 5.4 при активно-емкостной нагрузке $10\text{ кОм}-1\text{ мкФ}$.

5.6. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме однополупериодного выпрямителя в режиме выпрямления малых напряжений при различных положениях исходной рабочей точки на ВАХ диода, низкой частоте выпрямляемой ЭДС и активной нагрузке $R_n = 333\text{ Ом}$.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.6.1. Установите параметры настройки осциллографа по пункту 5.3.1.

Установите ЭДС смещения $E_0 = 0$, амплитуду генератора переменной ЭДС $E_m = 1\text{ В}$ для германиевого диода и $E_m = 2\text{ В}$ – для кремниевое, частоту $F = 100\text{ Гц}$, сопротивление нагрузки $R_n = 333\text{ Ом}$.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов.

5.6.2. Повторите измерения по пункту 5.6.1 при значениях ЭДС смещения, равных $E_0 = U_{д.пор}$, $E_0 = -U_{д.пор}$, где $U_{д.пор}$ – пороговое напряжение диода.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов.

5.7. По индивидуальному заданию преподавателя проведите аналогичные измерения для диода другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип диода. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.8. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию работы выпрямительных диодов на переменном токе.

6. Задание для исследования работы выпрямительных диодов на переменном токе с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы OrCAD исследовать осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках моделируемой схемы однополупериодного выпрямителя при значениях параметров моделирования (ЭДС смещения, амплитуда и частота выпрямляемой ЭДС, сопротивление и емкость нагрузки), соответствующих пункту 5.3 задания по экспериментальному исследованию выпрямителя.

По индивидуальному заданию исследуйте осциллограммы напряжений и токов для двухполупериодного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме.

Сопоставьте результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования OrCAD (параграф 4.1) и методиками исследования работы выпрямительных диодов на переменном токе, приведенными в параграфе 4.2.3.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

Сравните осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме однополупериодного выпрямителя, полученные путем измерения и моделирования, и в мостовой схеме, отметьте наблюдаемые качественные и количественные отличия.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе Word.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы;
- 2) вид лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты экспериментального исследования однополупериодного выпрямителя на основе германиевого и кремниевого диодов по пункту 5, включающие:
 - параметры измерения, осциллограммы сигналов и графики ВАХ по пункту 5.3;
 - измеренные максимальные и минимальные значения тока диода и напряжения на диоде, измеренные и расчетные средние значения выпрямленного напряжения, значения полезной мощности на нагрузке, мощности, теряемой на диоде, частоты и коэффициента пульсаций по пункту 5.3;
 - параметры измерения, осциллограммы сигналов и графики ВАХ при частоте выпрямляемой ЭДС $F = 1000$ Гц (пункты 5.4, 5.5); отличия графиков ВАХ по пунктам 5.3, 5.4, объяснение причин отличия;
 - параметры измерения и осциллограммы сигналов при выпрямлении малых сигналов, объяснение особенностей выпрямления малых сигналов (пункт 5.6);
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
 - осциллограммы напряжений и токов в исследуемых схемах выпрямления;
 - наблюдаемые качественные и количественные отличия осциллограмм в однополупериодной схеме выпрямления, полученных путем измерения и моделирования, и в мостовой схеме, их объяснение.
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования работы выпрямительного диода на переменном токе и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Что такое выпрямитель, каково его назначение?
2. Как связаны выпрямительные свойства диода с физическими принципами его работы?
3. Почему исследуемый выпрямитель называется однополупериодным?
4. Как объясняются осциллограммы сигналов в схеме однополупериодного выпрямителя с помощью вольт-амперных характеристик диода?
5. Как определяются максимальный ток диода и максимальное обратное напряжение на диоде в схеме однополупериодного выпрямителя?
6. Что такое коэффициент выпрямления и как он определяется?
7. Отличаются ли значения коэффициента выпрямления у германиевых и кремниевых диодов и почему?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты выполнения лабораторной работы, приводимые в отчете.

8. Как определяются средневывпрямленное значение напряжения и средняя мощность, выделяемая на нагрузке, для однополупериодного выпрямителя?
9. Отличаются ли средняя мощность, потребляемая от источника, и мощность, выделяемая на нагрузке? Можно ли определить их значения по результатам лабораторной работы?
10. Что такое коэффициент полезного действия выпрямителя, от чего он зависит?
11. В чем заключаются особенности выпрямления малых сигналов в однополупериодной схеме выпрямителя?
12. Каковы особенности работы диодов в выпрямительных схемах при повышении частоты сигнала и как они учитываются при моделировании на ПЭВМ?
13. Чем определяются частотные свойства диодов в схемах выпрямления и детектирования сигналов?
14. Что такое коэффициент пульсаций выпрямителя и чему он равен для исследуемой схемы?
15. Каковы особенности работы выпрямителя на активно-емкостную нагрузку, какой вид имеют графики напряжений и токов в такой схеме?
16. Какой вид имеют схема двухфазного двухполупериодного выпрямителя и соответствующие ей временные диаграммы напряжений и токов, каковы ее преимущества по сравнению с однополупериодной схемой?
17. Какой вид имеют мостовая схема двухполупериодного выпрямителя и соответствующие ей временные диаграммы напряжений, каковы ее преимущества по сравнению с двухфазной схемой?
18. Какая схема выпрямления характеризуется наименьшими пульсациями выходного напряжения?
19. Какие требования по технологическому разбросу предъявляются к диодам в мостовой схеме выпрямления?

Лабораторная работа № 4

Измерение и исследование ВАХ и параметров стабилитронов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах полупроводниковых стабилитронов путем их экспериментального исследования с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относятся:

- освоение методов экспериментального автоматического и ручного измерения характеристик и параметров полупроводниковых стабилитронов и методов их исследования с помощью моделирования на ПЭВМ;

- измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ характеристик и параметров полупроводникового стабилитрона, их физическое обоснование, анализ соответствия теоретически их определяемым характеристикам и параметрам.

3. Краткие теоретические сведения

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, работающий в режиме электрического пробоя. Такой режим возникает при смещении p – n -перехода в обратном направлении. На рис. 5.8а, б показаны его схематическое изображение и вольт-амперная характеристика.

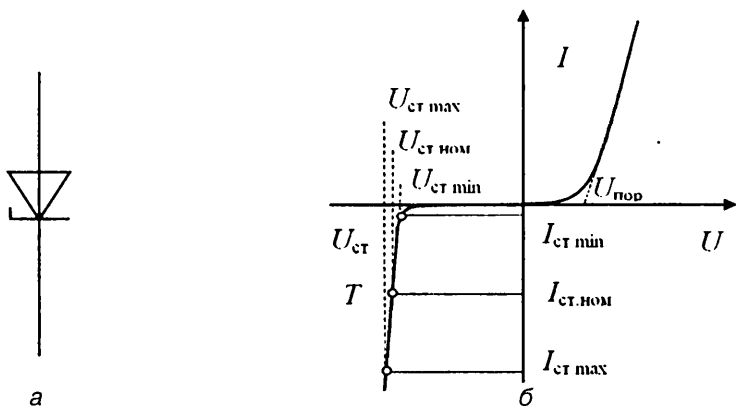


Рис. 5.8. Схематическое изображение (а) и вольт-амперная характеристика (б) стабилитрона: $U_{ст}$ – напряжение стабилизации

При достижении на стабилитроне напряжения, называемого *напряжением стабилизации* $U_{ст}$, ток через стабилитрон резко возрастает и изменяется в широких пределах, а напряжение на стабилитроне остается почти постоянным. Эта особенность полупроводниковых стабилитронов широко используется для стабилизации напряжения.

При подаче на стабилитрон прямого напряжения вольт-амперная характеристика его имеет тот же вид, что и у выпрямительного диода.

В качестве основного материала для полупроводниковых стабилитронов используется кремний, обеспечивающий малую величину обратного тока (ток насыщения). В отличие от выпрямительных диодов, в стабилитроне p - и n -области сильно легированы. Это приводит к тому, что p – n -переход имеет малую ширину, а напряженность электрического поля в нем высокая и при приложении даже небольшого обратного напряжения возникает электрический пробой.

Механизм пробоя в полупроводниковых стабилитронах может быть туннельным, лавинным или смешанным. Считается, что в низковольтных стабилитронах (до 5 В) преобладает механизм туннельного пробоя, а в стабилитронах, работающих при напряжениях выше 8 В, пробой имеет лавинный характер [1].

Туннельный пробой возникает в случае, когда геометрическая ширина потенциального барьера (p – n -переход) сравнима с дебройлевской длиной волны электрона и становятся возможны туннельные переходы электронов с заполненных энергетических состояний в зоне проводимости на свободные состояния в валентной зоне.

Лавинный пробой возникает в сильном электрическом поле, действующем в области p – n -перехода, когда электрон на длине свободного пробега набирает энергию, равную или большую ширины запрещенной зоны, и ионизирует атом собственного полупроводника. В результате рождается пара электрон–дырка и процесс повторяется уже с участием новых носителей.

К параметрам стабилитрона, определяемым по его ВАХ (рис. 5.8б), относятся:
 $U_{\text{ст.ном}}$ – номинальное напряжение стабилизации, измеренное при некотором среднем (номинальном) токе стабилитрона $I_{\text{ст.ном}}$;

$U_{\text{ст min}}$ – минимальное напряжение стабилизации, измеренное в начале прямолинейного участка обратной ветви ВАХ;

$I_{\text{ст min}}$ – минимальный ток, при котором измеряется $U_{\text{ст min}}$;

$U_{\text{ст max}}$ – максимальное напряжение стабилизации при токе $I_{\text{ст max}}$;

$I_{\text{ст max}}$ – максимально допустимый обратный ток стабилитрона, ограниченный предельно допустимой мощностью рассеяния на стабилитроне $P_{\text{ст max}}$.

При токе, не превышающем $I_{\text{ст max}}$, стабилитрон может работать неограниченно долго. Значение предельно допустимой рассеиваемой мощности для полупроводниковых стабилитронов находится в диапазоне от сотен милливатт до единиц ватт.

Один из важнейших параметров стабилитрона – *дифференциальное сопротивление* – характеризует наклон его ВАХ в области пробоя:

$$r_d = dU_{\text{ст}}/dI_{\text{ст}} \text{ при } I_{\text{ст}} = \text{const.} \quad (5.9)$$

Дифференциальное сопротивление идеального стабилитрона на этом участке ВАХ стремится к нулю, в реальных приборах величина r_d имеет значение 2–50 Ом.

По ВАХ стабилитрона находится также его статическое сопротивление: $R_{\text{ст}} = U_{\text{ст}}/I_{\text{ст}}$.

Влияние температуры на характеристики стабилитрона оценивается *температурным коэффициентом напряжения* стабилизации (ТКН) [2], который соответствует изменению напряжения стабилизации $U_{\text{ст}}$ при изменении температуры на 1 градус, то есть

$$\text{ТКН} = \Delta U_{\text{ст}} / (U_{\text{ст}} \cdot \Delta T). \quad (5.10)$$

В стабилитронах с туннельным пробоем ТКН может принимать значения от 10^{-5} до 10^{-3} K^{-1} . Стабилитроны, работающие на основе лавинного пробоя, имеют положительный ТКН.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе.

Ознакомиться с описанием аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» при измерении вольт-амперных характеристик и пара-

метров стабилитронов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к лабораторной работе. Получить у преподавателя *вариант задания* выполнения лабораторной работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования вольт-амперных характеристик и параметров стабилитронов

С помощью средств АПК УД «Электроника» измерьте вольт-амперную характеристику стабилитрона, а также его нагрузочные характеристики и характеристики стабилизации при заданном балластном сопротивлении и различных сопротивлениях нагрузки. По измеренным характеристикам определите статические и дифференциальные сопротивления стабилитрона в заданных точках ВАХ и значения коэффициентов и границ стабилизации, соответствующих разным сопротивлениям нагрузки.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Стабилитрон», лабораторную работу – «Измерение и исследование ВАХ» и заданный тип стабилитрона (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.10) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с нижеприводимыми заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. Выполните измерение прямой ветви ВАХ стабилитрона в автоматическом режиме при отключенных внешних сопротивлениях нагрузки.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Выберите режим измерения «Автоматический». Отключите внешние сопротивления нагрузки. Установите значения параметров автоматического измерения: $E_{\text{нач}} = 0$, $E_{\text{кон}} = 10 \text{ В}$, $dE = 0,25 \text{ В}$, $I_{\text{изм max}} \approx I_{\text{ст max}} / 2$, но не более 45 мА.

Проведите измерение.

После успешного завершения измерения последовательно просмотрите графики выводимых зависимостей: $U_{\text{ст}} = f(E)$, $I_{\text{ст}} = f(E)$, $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ (ВАХ). С помощью курсора определите на прямой ветви ВАХ $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ приближенное значение порогового напряжения (напряжения изгиба) $U_{\text{пор}}$.

Проведите курсорные измерения в трех точках ВАХ: в точке порогового напряжения (изгиба), которой соответствует некоторое значение ЭДС $E_{\text{пор}}$, в точке,

соответствующей $E_{\text{кон}}$, и в точке, соответствующей $(E_{\text{пор}} + E_{\text{кон}})/2$. Измеренные значения E , $I_{\text{ст}}$, $U_{\text{ст}}$, $R_{\text{ст}}$, r_d запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и график измеренной прямой ветви ВАХ стабилизатора.

5.4. Выполните измерение обратной ветви ВАХ стабилизатора в ручном режиме при отключенных внешних сопротивлениях нагрузки. Измерения проведите для значений ЭДС E от $E_{\text{нач}}$ до нуля с шагом $dE = 1$ В. Значение $E_{\text{нач}}$ определите исходя из следующих условий и соотношений: $E_{\text{нач}} = -10$ В, если максимальный ток стабилизатора $I_{\text{ст max}} > 25$ мА, или $E_{\text{нач}} = -I_{\text{ст max}} R_0 - U_{\text{ст max}}$ при $I_{\text{ст max}} < 25$ мА; $R_0 = 200$ Ом. Для исследуемого стабилизатора КС147А $E_{\text{нач}} = -10$ В.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов
Выберите режим измерения «Ручной». Отключите внешние сопротивления нагрузки.

Установите с помощью движка или клавиатуры значение ЭДС источника $E = E_{\text{нач}}$. Проведите измерение, нажав на клавишу «Измерение».

Убедитесь в появлении измеренной точки ВАХ в окне графики. Полученные значения тока и напряжения зафиксируйте в памяти цифрового индикатора и в окне графики путем нажатия кнопки «Запись».

Установите с помощью движка или с клавиатуры значение $E = E_{\text{нач}} + dE$. Проведите измерение.

Убедитесь в появлении второй точки ВАХ в окне графики и второй строки данных на цифровом индикаторе. Результаты измерения зафиксируйте в памяти цифрового индикатора и в окне графики нажатием кнопки «Запись».

Продолжите измерения, уменьшая (по модулю) ЭДС источника E с шагом dE и фиксируя результаты каждого измерения на цифровом и графическом индикаторах.

По графику ВАХ определите минимальное по модулю значение ЭДС $|E|_{\text{min}}$, при котором наблюдаются резкий излом ВАХ и быстрое уменьшение (по модулю) тока стабилизатора до нуля. Запишите в рабочую тетрадь (или в формируемый в процессе выполнения работы электронный отчет) соответствующие этой точке минимальные значения тока стабилизации $I_{\text{ст min}}$ и напряжения стабилизации $U_{\text{ст min}}$ стабилизатора.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и график измеренной в ручном режиме обратной ветви ВАХ.

Выведите в окно графики зависимость $U_{\text{ст}} = f(E)$, соответствующую характеристике стабилизации стабилизатора при $R_{\text{н}} = \infty$. Определите границы области стабилизации $|E|_{\text{min}}$, $|E|_{\text{max}}$, в которых напряжение стабилизатора изменяется в допустимых пределах $U_{\text{ст min}}$, $U_{\text{ст max}}$ относительно номинального значения $U_{\text{ст ном}}$. Запишите их значения в рабочую тетрадь (или в формируемый в процессе выполнения работы электронный отчет).

Сохраните для отчета график $U_{\text{ст}} = f(E)$.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.4

По результатам измерения ВАХ в ручном режиме рассчитайте:

- значения статического $R_{ст}$ и дифференциального r_d сопротивлений стабилизатора в трех точках ВАХ: вблизи точки изгиба, которой соответствует значение ЭДС $E = |E|_{min}$; при ЭДС $E = E_{нач}/2$; при ЭДС $E = E_{нач}$;
- значение коэффициента стабилизации при $R_H = \infty$.

5.5. Выполните измерение обратной ветви ВАХ стабилизатора в автоматическом режиме при отключенных внешних сопротивлениях нагрузки. Измерения проведите для значений ЭДС E от $E_{нач}$, определенного в пункте 5.4, до $E_{кон} = 0$ с шагом $dE = 0,25$ В.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Выберите режим измерения «Автоматический». Отключите внешние сопротивления нагрузки. Установите значения параметров автоматического измерения: $E_{кон} = 0$, $E_{нач}$, определенное в пункте 5.4 (для стабилизатора КС147А $E_{нач} = -10$ В), $dE = 0,25$ В, $I_{изм\ max} \approx I_{ст\ max} / 2$, но не более 45 мА.

Проведите измерение.

После успешного завершения измерения последовательно просмотрите графики выводимых зависимостей: $U_{ст} = f(E)$, $I_{ст} = f(E)$, $I_{ст} = f(U_{ст})$ (ВАХ). С помощью курсора определите нижнюю границу стабилизации $|E|_{min}$, соответствующую резкому излому обратной ветви ВАХ.

Проведите курсорные измерения в трех точках ВАХ, соответствующих значениям $E = |E|_{min}$; $E = E_{нач}/2$; $E = E_{нач}$. Измеренные значения E , $I_{ст}$, $U_{ст}$, $R_{ст}$, r_d запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и график автоматически измеренной обратной ветви ВАХ стабилизатора.

Выведите поочередно графики зависимостей статического и дифференциального сопротивлений стабилизатора $R_{ст} = f(I_{ст})$, $r_d = f(I_{ст})$ от тока стабилизатора $I_{ст}$. Для более информативного представления каждый график можно вывести раздельно для двух пределов параметров вывода, например: $U_{ст.нач} = -0,1 U_{ст\ min}$, $U_{ст.кон} = -U_{ст\ min}$ и $U_{ст.нач} = -U_{ст\ min}$, $U_{ст.кон} = -U_{ст\ max}$.

Сохраните для отчета выводимые графики.

Выведите в окно графики зависимости $U_{ст} = f(E)$, соответствующую характеристике стабилизации стабилизатора при $R_H = \infty$. Определите с помощью курсора границы области стабилизации $|E|_{min}$, $|E|_{max}$, в которых напряжение стабилизатора изменяется в небольших пределах относительно номинального значения $U_{ст.ном}$. Запишите их значения в рабочую тетрадь или в формируемый в процессе выполнения работы электронный отчет.

Сохраните для отчета график $U_{ст} = f(E)$.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5

По результатам измерения рассчитайте значение коэффициента стабилизации при $R_H = \infty$.

5.6. Выполните измерение характеристик стабилизации $U_{ст} = f(E)$ в автоматическом режиме при различных сопротивлениях нагрузки.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Выберите режим измерения «Автоматический». Установите значения параметров автоматического измерения те же, что и в пункте 5.5.

Проведите измерения характеристик стабилизации при поочередно подключаемых сопротивлениях нагрузки $R_n = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$.

Определите с помощью курсора границы области стабилизации $|E|_{\min}, |E|_{\max}$, соответствующие различным сопротивлениям нагрузки. Запишите их значения в рабочую тетрадь или в формируемый в процессе выполнения работы электронный отчет.

Сохраните для отчета график $U_{\text{ст}} = f(E)$.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.6

По результатам измерения рассчитайте значение коэффициентов стабилизации при различных сопротивлениях нагрузки.

5.7. Выполните в ручном режиме измерение нагрузочных характеристик $U_{\text{ст}} = f(I_n)$, соответствующих зависимости напряжения на стабилитроне (нагрузке) от тока (сопротивления) нагрузки при постоянном значении ЭДС $E = E_{\text{нач min}}$, определенном в пункте 6.4 (для исследуемого стабилитрона напряжение $E_{\text{нач min}} = -10 \text{ В}$).

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Выберите режим измерения «Ручной». Установите ЭДС источника $E = E_{\text{нач min}}$.

Проведите измерения, поочередно подключая сопротивления нагрузки $R_n = 200, 500, 1000 \text{ Ом}$, $R_n = \infty$ и фиксируя результаты измерения на цифровом и графическом индикаторах.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и график измеренной нагрузочной характеристики $U_{\text{ст}} = f(I_n)$.

Выведите график зависимости $I_{\text{ст}} = f(I_n)$ и также сохраните его для отчета.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.7

По результатам измерения определите область допустимых для данного стабилитрона токов и сопротивлений внешней нагрузки.

5.8. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию вольт-амперных характеристик и параметров стабилитронов.

6. Задание для исследования вольт-амперных характеристик и параметров стабилитронов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы OrCAD рассчитать вольт-амперные характеристики стабилитрона заданного типа по его математической модели (см. приложение 2) в диапазоне изменения токов и напряжений,

ограниченном предельными значениями $I_{\text{ст max}}$, $U_{\text{ст max}}$, и значениях номинальной и предельных рабочих температур стабилитрона $t_{\text{ном}}^0$, t_{min}^0 , t_{max}^0 .

По индивидуальному заданию при заданном сопротивлении балластного (ограничительного) сопротивления $R_b = 200$ Ом и значениях сопротивлений нагрузки, используемых при физических измерениях, исследовать:

- характеристики стабилизации при изменении ЭДС источника от нуля до значения $|E|_{\text{max}}$, ограниченного предельным током стабилизации стабилитрона $I_{\text{ст max}}$;
- нагрузочные характеристики при значении ЭДС источника $|E| = (|E|_{\text{max}} - |E|_{\text{min}})/2$, где $|E|_{\text{min}}$ – нижняя граница области стабилизации.

Сопоставить результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования вольт-амперных характеристик стабилитронов, приведенными в параграфе 4.3.1.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования графики прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитрона, характеристики стабилизации и нагрузочные характеристики.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения обратного тока и напряжения стабилизации стабилитрона, обусловленные изменением его температуры.

По характеристикам стабилизации найдите границы области стабилизации $|E|_{\text{min}}$, $|E|_{\text{max}}$, соответствующие различным сопротивлениям нагрузки.

По нагрузочным характеристикам определите область допустимых для данного стабилитрона сопротивлений внешней нагрузки.

Сравните ВАХ стабилитрона, характеристики стабилизации и нагрузочные характеристики, полученные путем измерения и моделирования при номинальном значении температуры.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы;
- 2) вид лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и обработки по пункту 5, включающие:
 - график измеренной в автоматическом режиме прямой ветви ВАХ и результаты курсорных измерений в ее заданных точках (пункт 5.3);
 - график измеренной в ручном режиме обратной ветви ВАХ, показания индикатора ручных измерений, найденные по ВАХ значения $|E|_{\text{min}}$, $I_{\text{ст min}}$ и $U_{\text{ст min}}$ (пункт 5.4);

- рассчитанные значения R_{ct} , r_d в заданных точках обратной ветви ВАХ, измеренной в ручном режиме (с указанием этих точек) (пункт 5.4);
 - график характеристики стабилизации $U_{ct} = f(E)$, измеренной в ручном режиме при $R_{н} = \infty$, и найденные по ней значения коэффициента стабилизации и границ стабилизации $|E|_{min}$, $|E|_{max}$, $U_{ct min}$, $U_{ct max}$ (пункт 5.4);
 - график измеренной в автоматическом режиме обратной ветви ВАХ и результаты курсорных измерений в ее заданных точках, найденные по ВАХ значения $|E|_{min}$, $I_{ct min}$ и $U_{ct min}$ (пункт 5.5);
 - графики автоматически измеренных зависимостей $R_{ct} = f(I_{ct})$, $r_{ct} = f(I_{ct})$ (пункт 5.5);
 - графики характеристик стабилизации $U_{ct} = f(E)$, измеренных в автоматическом режиме при $R_{н} = \infty$ и $R_{н} = 200, 500, 1000$ Ом, найденные по ним значения коэффициентов стабилизации и границ стабилизации $|E|_{min}$, $|E|_{max}$, $U_{ct min}$, $U_{ct max}$ (пункты 5.5, 5.6);
 - график измеренной в ручном режиме нагрузочной характеристики, показания индикатора ручных измерений, найденные допустимые для данного стабилизатора значения токов и сопротивлений внешней нагрузки (пункт 5.7);
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
- графики прямой и обратной ветвей ВАХ стабилизатора для трех значений рабочей температуры;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения обратного тока и напряжения стабилизации, обусловленные изменением температуры стабилизатора;
 - значения области стабилизации $|E|_{min}$, $|E|_{max}$ и допустимых для данного стабилизатора сопротивлений внешней нагрузки;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов ручных, автоматических измерений и моделирования и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какой полупроводниковый прибор называется стабилизатором?
2. Какое явление лежит в основе работы стабилизатора?
3. Что такое туннельный пробой p – n -перехода и чем он определяется?
4. Что такое лавинный пробой p – n -перехода и каковы условия его возникновения?
5. Что такое напряжение стабилизации?
6. Как напряжение стабилизации зависит от уровня легирования p - и n -областей?
7. Какой материал является основным для производства стабилизаторов и почему?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты выполнения лабораторной работы, приводимые в отчете.

8. Что такое дифференциальное сопротивление стабилитрона и какова его величина на рабочем участке?
9. Как по вольт-амперной характеристике стабилитрона определить его дифференциальное сопротивление?
10. Какими предельными и номинальными параметрами характеризуются стабилитроны?
11. Какие модели и параметры используются для математического описания вольт-амперных характеристик полупроводникового стабилитрона?
12. Что такое рабочая область стабилизации стабилитрона?
13. Как определяется характеристика стабилизации напряжения?
14. Как зависят характеристики стабилизации от сопротивления нагрузки?
15. Как определяется коэффициент стабилизации напряжения? От чего он зависит?
16. Как определяется нагрузочная характеристика стабилизатора напряжения?
17. Что такое температурный коэффициент напряжения стабилизации и какую величину ТКН имеют низковольтные и высоковольтные стабилитроны?

Лабораторная работа № 5

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров стабилитронов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах полупроводниковых стабилитронов путем их экспериментального исследования с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относятся физическое измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ вольт-амперных характеристик и параметров разных экземпляров стабилитронов одного типа с целью их сопоставления и анализа причин расхождения, обусловленного несовершенством технологии.

3. Краткие теоретические сведения

Характеристики и параметры реальных полупроводниковых приборов, в том числе и стабилитронов, имеют, как правило, существенный разброс относительно среднестатистических характеристик и параметров, приводимых в справочных данных. Различие в свойствах приборов одного типа обусловлено многими факторами, но в первую очередь связано с технологией выращивания, очистки и обра-

ботки полупроводниковых кристаллов, а также последующими операциями их изготовления [1]. В любом реальном кристалле имеются химические примеси и нарушения кристаллической решетки, называемые дефектами структуры. В процессе изготовления приборов поверхность кристалла может быть также загрязнена самыми различными веществами, используемыми при ее обработке (остатки кислот, щелочи, жировые пятна и т. п.). Все это приводит к разбросу характеристик и параметров готовых приборов.

Численное значение параметра, установленное техническими условиями или государственным стандартом, называется *номинальным значением* параметра. Номинальные значения параметров устанавливаются, исходя из технологических возможностей производства и потребностей применения, на основе статистической обработки результатов испытаний опытных партий приборов [2].

Статистический разброс параметров, обусловленный несовершенством технологии, оценивают по максимально допустимым отклонениям их от номинальных значений. Эти отклонения называют *допусками* и выражают либо в относительных единицах (процентах), либо в крайних значениях параметра. Для полупроводниковых стабилизаторов приводятся параметры статистического разброса: максимально допустимое отклонение напряжения стабилизации от номинального значения $\Delta U_{\text{ст.ном}}$, минимальный и максимальный допустимые токи стабилизации и допуски на ряд других параметров. Например, для маломощного кремниевого стабилизатора КС133Г разброс напряжения стабилизации $\Delta U_{\text{ст}}$ составляет $\pm 0,35$ В, минимальный допустимый ток стабилизации $I_{\text{ст min}} = 1$ мА, максимальный допустимый ток стабилизации $I_{\text{ст max}} = 32$ мА.

Полупроводниковым приборам свойственна сильная зависимость характеристик и параметров от температуры. Однако характеристики стабилизаторов при повышении температуры незначительно отклоняются от номинальных (сотые доли процента при увеличении температуры на 1°C), за исключением случаев, когда превышает максимально допустимое значение тока стабилизатора и начинается его сильный разогрев. Поэтому незначительное изменение температуры в ходе эксперимента практически не сказывается на исследовании производственного разброса характеристик и параметров полупроводниковых стабилизаторов.

Наличие технологического разброса характеристик и параметров стабилизаторов приводит к снижению качества использующих их электронных устройств, что должно учитываться при их разработке и сервисном обслуживании.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе.

Ознакомиться с описанием и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса (АПК УД) «Электроника» при исследовании технологического разброса ВАХ стабилизаторов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получить *вариант задания* выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров стабилитронов

Необходимо с помощью средств АПК УД «Электроника» в автоматическом режиме измерить прямые и обратные ветви ВАХ четырех однотипных кремниевых стабилитронов и с помощью курсорных измерений определить параметры, характеризующие их различие (разброс) в заданных точках ВАХ. Оценить долю статистического разброса ВАХ, обусловленную технологией изготовления стабилитронов и погрешностями измерения путем проведения многократных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Стабилитрон», лабораторную работу – «Исследование технологического разброса» и тип стабилитрона (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.14) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с нижеприводимыми заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. Выполните автоматическое измерение прямых ветвей ВАХ четырех однотипных стабилитронов. С помощью курсорных измерений в трех точках усредненной ВАХ определите средние значения и максимальные абсолютные и относительные отклонения от средних значений токов и напряжений стабилитронов $U_{ст.ср}$, $I_{ст.ср}$, $dU_{ст}$, $dI_{ст}$, $dU_{ст}$, %, $dI_{ст}$, %, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений

Ознакомьтесь с выведенными на лицевую панель по умолчанию параметрами автоматического измерения ВАХ – начальным, конечным значениями и шагом изменения ЭДС $E_{нач}$, $E_{кон}$, dE и предельным измеряемым током $I_{изм\ max}$. Установите их значения $E_{нач} = 0$, $E_{кон} = 10$ В, $dE = 0,25$ В, $I_{изм\ max} \approx I_{ст\ max} / 2$ (но не более 45 мА), соответствующие измерению прямой ветви ВАХ стабилитронов.

Подтвердите заданные параметры нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение. После успешного завершения измерения на графическом индикаторе должны появиться отличающиеся цветом и типом линии графики измеренных прямых ветвей ВАХ четырех стабилитронов $I_{ст} = f(U_{ст})$ и ВАХ, полученной их усреднением $I_{ст.ср} = f(U_{ст.ср})$.

По измеренным характеристикам и строке состояния проверьте, отличается ли фактическое значение параметра измерения $E_{\text{кон}}$ от заданного, объясните возможные причины отличия.

Выберите с помощью параметров вывода $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$ и просмотрите локальные участки ВАХ стабилитронов в области малых и области больших токов, качественно оцените различия статических и дифференциальных сопротивлений отдельных стабилитронов на этих участках.

Вернитесь к исходным автоматически выводимым значениям параметров вывода ВАХ $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения относительно усредненной ВАХ в трех ее точках – вблизи порогового напряжения $U_{\text{ст.пор}}$ (напряжение изгиба ВАХ), при $U_{\text{ст}} = U_{\text{ст.кон}}$ (верхний автоматически выводимый предел параметра вывода ВАХ) и в промежуточной точке между ними. Измеренные значения параметров статистического разброса прямых ветвей ВАХ $U_{\text{ст.ср}}$, $I_{\text{ст.ср}}$, $dU_{\text{ст}}$, $dI_{\text{ст}}$, $dU_{\text{ст}}, \%$, $dI_{\text{ст}}, \%$, запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохранение результатов измерения по пункту 5.3

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и графики измеренных прямых ветвей и локальных участков ВАХ стабилитронов.

5.4. Выполните автоматическое измерение обратных ветвей ВАХ четырех однотипных стабилитронов. С помощью курсорных измерений в трех точках усредненной ВАХ определите средние значения и максимальные абсолютные и относительные отклонения от средних значений токов и напряжений стабилитронов $U_{\text{ст.ср}}$, $I_{\text{ст.ср}}$, $dU_{\text{ст}}$, $dI_{\text{ст}}$, $dU_{\text{ст}}, \%$, $dI_{\text{ст}}, \%$, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений

Установите значения параметров автоматического измерения обратных ветвей ВАХ стабилитронов $E_{\text{нач}} = -10$ В, $E_{\text{кон}} = 0$, $dE = 0,25$ В, $I_{\text{изм max}} \approx I_{\text{ст max}}$ (но не более 45 мА).

Подтвердите заданные параметры нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение. После успешного завершения измерения на графическом индикаторе должны появиться отличающиеся цветом и типом линии графики измеренных обратных ветвей ВАХ четырех стабилитронов $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{ст}})$ и ВАХ, полученной их усреднением $I_{\text{ст.ср}} = f(U_{\text{ст.ср}})$.

По измеренным характеристикам и строке состояния проверьте, отличается ли фактическое значение параметра измерения $E_{\text{нач}}$ от заданного, объясните возможные причины отличия.

Выберите с помощью параметров вывода $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$ и просмотрите локальные участки ВАХ стабилитронов в области минимального и максимального напряжений стабилизации, качественно оцените различия дифференциальных сопротивлений отдельных стабилитронов на этих участках.

Вернитесь к исходным автоматически выводимым значениям параметров вывода ВАХ $U_{\text{ст.нач}}$, $U_{\text{ст.кон}}$.

Задание для проведения курсорных измерений

С помощью курсора по усредненной ВАХ определите напряжение нижней границы стабилизации $U_{\text{ст. min}}$, соответствующее резкому излому обратной ветви ВАХ.

Проведите курсорные измерения в трех точках ВАХ: при $U_{\text{ст}} = U_{\text{ст. min}}$, $U_{\text{ст}} = U_{\text{ст.нач}}$ (напряжении на стабилитроне, измеренном при ЭДС $E = E_{\text{нач}}$) и в промежуточной точке, соответствующей $U_{\text{ст}} = (U_{\text{ст. min}} + U_{\text{ст.нач}})/2$ (все напряжения – отрицательные). Измеренные значения параметров статистического разброса обратных ветвей ВАХ $U_{\text{ст.ср}}$, $I_{\text{ст.ср}}$, $dU_{\text{ст}}$, $dI_{\text{ст}}$, $dU_{\text{ст}}, \%$, $dI_{\text{ст}}, \%$, запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Сохранение результатов измерения по пункту 5.4

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и графики измеренных обратных ветвей и локальных участков ВАХ стабилитронов.

5.5. Оцените влияние случайной погрешности при измерении технологического разброса ВАХ стабилитронов.

Задание на измерения. Выполните повторно измерение обратных ветвей ВАХ стабилитронов при тех же параметрах автоматического измерения, что и в пункте 5.4. С помощью курсорных измерений в той же точке усредненной ВАХ определите параметры статистического разброса ВАХ стабилитронов. Сравните их с измеренными в пункте 5.4 данной лабораторной работы.

Указания по проведению измерений

Не изменяя параметров автоматического измерения (пункт 5.4), проведите повторное измерение обратных ветвей ВАХ стабилитронов.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорное измерение относительно точки усредненной ВАХ, соответствующей напряжению $U_{\text{ст}} = (U_{\text{ст. min}} + U_{\text{ст.нач}})/2$, как и в пункте 5.4. Измеренные повторно значения параметров статистического разброса обратных ветвей ВАХ стабилитронов $U_{\text{ст.ср}}$, $I_{\text{ст.ср}}$, $dU_{\text{ст}}$, $dI_{\text{ст}}$, $dU_{\text{ст}}, \%$, $dI_{\text{ст}}, \%$, запишите в память цифрового индикатора курсорных измерений.

Для повышения точности оценок технологического разброса в заданной точке ВАХ можно повторить физические и курсорные измерения многократно и усреднить их результаты.

Сохранение результатов измерения по пункту 5.5

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и графики повторно измеренных обратных ветвей ВАХ стабилитронов.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5

На основе сравнения результатов измерения статистического разброса ВАХ по пунктам 5.4, 5.5 данной лабораторной работы сделайте выводы о доле случайной

составляющей погрешности измерения в получаемых оценках технологического разброса ВАХ стабилитронов и о возможности уменьшения ее путем усреднения результатов многократных измерений.

5.6. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров стабилитронов.

6. Задание для исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик стабилитронов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы *OrCAD* рассчитайте вольт-амперные характеристики четырех однотипных стабилитронов по их математической модели (см. приложение 2) при заданном технологическом разбросе *обратного напряжения пробоя*, равном 10%, в диапазоне изменения тока и напряжения стабилизации, ограниченном предельными значениями $I_{ст\ max}$, $U_{ст\ max}$ и номинальном значении температуры. Сопоставьте результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик стабилитронов, приведенными в параграфе 4.3.2.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования графики прямой и обратной ветвей ВАХ диодов с учетом их технологического разброса.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения обратного тока и напряжения стабилизации стабилитронов одного типа, обусловленные технологическим разбросом их вольт-амперных характеристик.

Сравните ВАХ стабилитронов, полученные путем измерения и моделирования.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы;
- 2) вид лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик стабилитронов по пункту 5, включающие:

- измеренные графики прямых ветвей ВАХ стабилитронов и результаты курсорных измерений в заданных точках усредненной ВАХ (пункт 5.3);
 - графики локальных участков прямых ветвей ВАХ диодов и приближенные оценки их дифференциальных сопротивлений (пункт 5.3);
 - измеренные графики обратных ветвей ВАХ стабилитронов и результаты курсорных измерений в заданных точках усредненной ВАХ (пункт 5.4);
 - графики локальных участков обратных ветвей ВАХ стабилитронов и приближенные оценки их дифференциальных сопротивлений (пункт 5.4);
 - повторно измеренные графики обратных ветвей ВАХ стабилитронов и результаты курсорных измерений в заданной точке усредненной ВАХ (пункт 5.5);
 - вывод о доминирующем источнике статистического разброса измеренных обратных ветвей ВАХ по пунктам 5.4, 5.5;
- 4) результаты моделирования и обработки по пункту 6, включающие:
- графики прямой и обратной ветвей ВАХ стабилитронов с учетом их технологического разброса;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения обратного тока и напряжения стабилизации стабилитронов одного типа, обусловленные технологическим разбросом;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования технологического разброса ВАХ стабилитронов и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие материалы и технологии используются при изготовлении полупроводниковых стабилитронов?
2. Как взаимосвязаны ВАХ и параметры стабилитронов с материалами и технологиями, которые используются в их производстве?
3. Что понимается под технологическим разбросом ВАХ и параметров полупроводниковых стабилитронов?
4. Какова физическая природа технологического разброса ВАХ и параметров у полупроводниковых стабилитронов одного типа?
5. Как проявляется технологический разброс на ВАХ исследуемых однотипных стабилитронов?
6. С помощью каких технологических приемов и методов достигается уменьшение технологического разброса ВАХ полупроводниковых стабилитронов?
7. Что можно сказать об уровне технологического разброса параметров интегральных параметрических стабилизаторов напряжения?
8. Что понимается под номинальным значением параметра полупроводникового прибора?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать результаты выполнения лабораторной работы, приводимые в отчете.

9. Как называются максимально допустимые отклонения значений параметров от номинальных?
10. Как разделить составляющие статистического разброса, обусловленные технологией и измерениями?
11. Как в справочных данных и математических моделях полупроводниковых стабилизаторов учитываются параметры технологического разброса? Приведите примеры.
12. В чем заключается отрицательная роль технологического разброса ВАХ и параметров полупроводниковых стабилизаторов в электронных схемах? Приведите примеры.

Лабораторная работа № 6

Исследование работы стабилизатора на переменном токе

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о характеристиках, параметрах и определяемых ими применениях полупроводниковых стабилизаторов путем экспериментального исследования их с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относится изучение работы стабилизатора в схеме параметрического стабилизатора напряжения путем физического измерения и исследования с помощью моделирования на ПЭВМ осциллограмм напряжений и токов в различных точках схемы и обоснования их посредством вольт-амперной характеристики стабилизатора.

3. Краткие теоретические сведения

Основное назначение полупроводниковых стабилизаторов – стабилизация напряжения в различных электронных схемах. Простейшая схема параметрического стабилизатора напряжения показана на рис. 5.9. Так как нагрузка включена параллельно стабилизатору, то в режиме стабилизации, когда напряжение на стабилизаторе постоянно, такое же напряжение будет и на нагрузке. Поэтому стабилизатор называют также *опорным диодом*. Все изменения (пульсации) напряжения (ЭДС) источника E поглощаются балластным (ограничительным) резистором R_0 .

Наиболее часто стабилизатор работает в режиме, когда входное напряжение источника $E_{вх}$ нестабильно (рис. 5.10), а сопротивление нагрузки R_n постоянно [1].

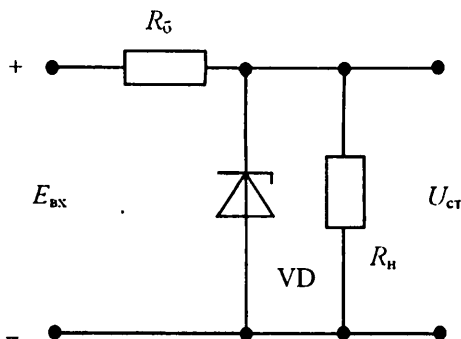


Рис. 5.9. Схема включения стабилитрона:
 R_0 – балластное (ограничительное) сопротивление, $E_{вх}$ – входное (нестабилизированное) напряжение, $U_{ст}$ – выходное стабилизированное напряжение

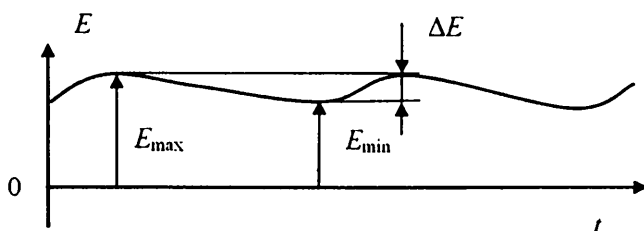


Рис. 5.10. Эпюра изменения входного напряжения (ЭДС) источника

Для установления и поддержания правильного режима стабилизации в этом случае сопротивление R_0 должно иметь определенное значение. Обычно сопротивление R_0 рассчитывают для среднего значения тока стабилитрона. Если входное напряжение меняется от $E_{\min}$ до $E_{\max}$, то балластное сопротивление можно найти по формуле

$$R_0 = (E_{cp} - U_{ст}) / (I_{cp} + I_n), \quad (5.11)$$

где $E_{cp} = 0,5 \cdot (E_{\min} + E_{\max})$ – среднее значение напряжения источника; $I_{cp} = 0,5 \cdot (I_{\min} + I_{\max})$ – средний ток стабилитрона; $I_n = U_{ст} / R_n$ – ток через нагрузку.

Если напряжение источника изменится в ту или другую сторону, то изменится и ток стабилитрона, но напряжение на нем, а следовательно, и на нагрузке останется постоянным.

Поскольку все изменение напряжения должно поглощаться балластным резистором, то наибольшее изменение этого напряжения $\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$ должно соответствовать наибольшему возможному изменению тока $I_{\max} - I_{\min}$, при котором еще сохраняется стабилизация. Отсюда следует, что стабилизация возможна только при соблюдении условия

$$\Delta E \leq (I_{\max} - I_{\min}) \cdot R_0. \quad (5.12)$$

Стабилизация в более широком диапазоне изменения E связана с увеличением сопротивления R_6 . Большее сопротивление R_6 получается при меньшем токе нагрузки I_n , то есть при большем сопротивлении нагрузки R_n и большем среднем значении ЭДС источника E_{cp} ; поэтому увеличение R_n и E_{cp} также обеспечивает расширение диапазона стабилизации ΔE .

Эффективность стабилизации напряжения характеризуется коэффициентом стабилизации K_{ct} , который показывает, во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе схемы стабилизации меньше, чем относительное изменение напряжения на входе:

$$K_{ct} = \frac{\Delta E / E}{\Delta U_{ct} / U_{ct}}. \quad (5.13)$$

Второй возможный режим стабилизации, когда входное напряжение источника стабильно, а сопротивление нагрузки меняется от $R_{n \min}$ до $R_{n \max}$. Для такого режима сопротивление балластного резистора R_6 можно определить по формуле

$$R_6 = (E - U_{ct}) / (I_{cp} + I_{n, cp}), \quad (5.14)$$

где $I_{n, cp} = 0,5 \text{ Ч } (I_{n \min} + I_{n \max})$, $I_{n \min} = U_{ct} / R_{n \max}$ и $I_{n \max} = U_{ct} / R_{n \min}$.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе.

Ознакомиться с описанием и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса (АПК УД) «Электроника» при исследовании работы стабилизатора на переменном токе и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Для ЭДС источника постоянного смещения $E_0 = 0$ определить необходимое при выполнении пункта 5.4 лабораторной работы максимально возможное значение амплитуды источника переменной ЭДС $E_m = E_{m \max}$, при котором максимальный ток стабилизатора не превысит предельного значения $I_{ct \max}$.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получить *вариант задания* выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования работы стабилизатора на переменном токе

С помощью средств АПК УД «Электроника» необходимо измерить *осциллограммы* напряжений и токов в исследуемой схеме полупроводникового параметрического стабилизатора напряжения при заданных сопротивлениях нагрузки, входной постоянной ЭДС и параметрах (амплитуде и частоте) входной переменной ЭДС. Обосновать результаты измерения посредством вольт-амперной характеристики стабилизатора. Определить области стабилизации и соответствующие им значения коэффициентов стабилизации стабилизатора напряжения.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Стабилитрон», лабораторную работу «Исследование работы прибора на переменном токе» и заданный тип стабилитрона (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.18) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь по лицевой панели стенда с исследуемой схемой стабилизатора напряжения, лицевой панелью измерителя ВАХ, цифрового осциллографа, схемой подключения каналов осциллографа, с выведенными по умолчанию значениями параметров генераторов ЭДС.

5.3. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме стабилизатора напряжения при отключенной нагрузке ($R_n = \infty$), нулевом значении постоянной составляющей и максимальной амплитуде низкочастотной переменной составляющей ЭДС на входе.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.3.1. Установите параметры настройки осциллографа: входы каналов – открытые, число периодов развертки сигнала – 2. В процессе работы число периодов развертки сигнала можно изменить для лучшей визуализации сигналов и проведения курсорных измерений.

Проведите измерение ВАХ стабилитрона, нажав кнопку включения автоматического измерителя ВАХ. При успешном завершении измерения ознакомьтесь с выведенным графиком измеренной ВАХ.

Установите ЭДС источника постоянной составляющей $E_0 = 0$, частоту колебаний источника переменной ЭДС $F = 100$ Гц, сопротивление нагрузки $R_n = \infty$.

Задайте найденное при подготовке к лабораторной работе максимально возможное значение амплитуды источника переменной ЭДС $E_m = E_{m \max}$, при котором максимальный ток стабилитрона не превысит предельного значения $I_{ст \max}$. Для исследуемого стабилитрона КС147А это условие выполняется при максимальном значении амплитуды источника $E_m = 10$ В.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.3.2. Проведите курсорные измерения по выведенным осциллограммам.

Путем перемещения вертикального курсора по осциллограммам напряжений посмотрите, как изменяется положение мгновенной рабочей точки на ВАХ стабилитрона и показания цифровых индикаторов измерителя ВАХ.

Определите нижнюю границу области стабилизации для ЭДС $|E|_{\min}$, которой соответствует точка изгиба обратной ветви ВАХ и нижние измеренные границы стабилизации для модулей тока и напряжения стабилитрона $I_{ст.изм \min}$, $U_{ст.изм \min}$.

Для удобства анализа и курсорных измерений можно одновременно отображать на экране осциллограммы сигналов одного, двух или трех каналов путем выбора их с помощью кнопок «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3» лицевой панели осциллографа.

Запишите в рабочую тетрадь полученные результаты курсорных измерений.

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального стенда и осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ.

5.4. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме стабилизатора напряжения при отключенной нагрузке ($R_n = \infty$), заданном (рабочем) значении ЭДС постоянной составляющей и заданной амплитуде и частоте переменной составляющей ЭДС на входе, имитирующей нестабильность или пульсации входного напряжения стабилизатора.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.4.1. Установите параметры настройки осциллографа по пункту 5.3.1.

Рассчитайте значения ЭДС источника постоянной составляющей ЭДС $E_0 = -(E_{m \max} + |E_{\min}|)/2$ и амплитуду переменной ЭДС $E_m = (E_{m \max} - |E_{\min}|)/2$. Например, при $E_{m \max} = 10$ В, $|E_{\min}| = 5$ В получим: $E_0 = 7,5$ В, $E_m = 2,5$ В.

Установите найденные значения параметров ЭДС источников E_0 , E_m , а также значение частоты $F = 100$ Гц и сопротивления нагрузки $R_n = \infty$.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.2. Проведите курсорные измерения по выведенным осциллограммам.

С помощью курсорных измерений определите максимальные и минимальные измеренные значения модулей тока и напряжения стабилизатора $I_{\text{ст.изм min}}$, $U_{\text{ст.изм min}}$, $I_{\text{ст.изм max}}$, $U_{\text{ст.изм max}}$ и номинальные их значения при $E = E_0$: $I_{\text{ст.изм.ном}}$, $U_{\text{ст.изм.ном}}$ (координаты рабочей точки при $R_n = \infty$).

Запишите полученные результаты в рабочую тетрадь.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.4

По результатам измерения рассчитайте:

- абсолютную $\Delta U_{\text{ст}} = U_{\text{ст.изм max}} - U_{\text{ст.изм min}}$ и относительную $\delta U_{\text{ст}} = \Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст.изм.ном}}$ нестабильности выходного напряжения стабилизатора;
- коэффициент стабилизации напряжения: $K_{\text{ст}} = \Delta U_{\text{ст}}/2E_m$.

5.5. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме стабилизатора напряжения при различных значениях сопротивления нагрузки $R_n = 1000, 500$ и 200 Ом, нулевом значении постоянной составляющей и максимальной амплитуде низкочастотной переменной составляющей ЭДС на входе.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.5.1. Установите параметры настройки осциллографа по пункту 5.3.1.

Задайте ЭДС источника постоянной составляющей $E_0 = 0$, частоту колебаний источника переменной ЭДС $F = 100$ Гц, амплитуду $E_m = E_{m \max}$, сопротивление нагрузки $R_n = 1000$ Ом.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.5.2. Проведите курсорные измерения по выведенным осциллограммам.

Путем перемещения с помощью движка вертикального курсора по осциллограммам напряжений посмотрите, как при этом изменяются положение мгновенной рабочей точки на ВАХ стабилитрона и показания индикаторов измерителя ВАХ.

Определите нижнюю границу области стабилизации для ЭДС $|E|_{\min}$, которой соответствует напряжение на стабилитроне $U_{\text{ст.изм min}}$, найденное в пункте 5.3.1 при $R_n = \infty$, а также значение тока стабилитрона $I_{\text{ст.изм min}}$ в данной точке ВАХ.

Запишите в рабочую тетрадь результаты курсорных измерений.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ.

5.5.3. Повторите измерения по пунктам 5.5.1, 5.5.2 для сопротивлений нагрузки $R_n = 500$ и 200 Ом.

5.6. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме стабилизатора напряжения при сопротивлениях нагрузки $R_n = 1000, 500$ и 200 Ом, заданном (рабочем) значении ЭДС постоянной составляющей и заданной амплитуде и частоте переменной составляющей ЭДС на входе, имитирующей нестабильность или пульсации входного напряжения стабилизатора.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.6.1. Установите параметры настройки осциллографа по пункту 5.3.1. Подключите нагрузку $R_n = 1000$ Ом.

Для заданного сопротивления нагрузки по измеренному в пункте 5.5.2 значению $|E|_{\min}$ рассчитайте значения ЭДС источника постоянной составляющей ЭДС $E_0 = -(E_{m \max} + |E|_{\min})/2$ и амплитуду переменной ЭДС $E_m = (E_{m \max} - |E|_{\min})/2$.

Установите найденные значения параметров ЭДС источников E_0, E_m , а также значение частоты $F = 100$ Гц.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.6.2. Проведите курсорные измерения по выведенным осциллограммам.

С помощью курсорных измерений определите максимальные и минимальные измеренные значения модулей тока и напряжения стабилитрона $I_{\text{ст.изм min}}, U_{\text{ст.изм min}}, I_{\text{ст.изм max}}, U_{\text{ст.изм max}}$ и номинальные их значения при $E = E_0$: $I_{\text{ст.изм ном}}, U_{\text{ст.изм ном}}$ (координаты рабочей точки при $R_n = 1000$ Ом).

Запишите полученные результаты в рабочую тетрадь.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых курсорных индикаторов.

5.6.3. Повторите измерения по пунктам 5.6.1, 5.6.2 для сопротивлений нагрузки $R_n = 500$ и 200 Ом.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.6

По результатам измерения для каждого сопротивления нагрузки рассчитайте:

- абсолютную $\Delta U_{ст} = U_{ст.изм\ max} - U_{ст.изм\ min}$ и относительную $\delta U_{ст} = \Delta U_{ст} / U_{ст.изм.ном}$ нестабильности выходного напряжения стабилизатора;
- коэффициент стабилизации напряжения $K_{ст} = 2E_m / \Delta U_{ст}$.

Сделайте вывод о возможных пределах изменения нагрузки для данного стабилизатора.

5.7. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме стабилизатора напряжения при отключенной нагрузке ($R_n = \infty$), нулевом значении постоянной составляющей и максимальной амплитуде и высокой частоте переменной составляющей ЭДС на входе.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

Установите параметры настройки осциллографа по пункту 5.3.1.

Установите ЭДС источника постоянной составляющей $E_0 = 0$, амплитуды источника переменной ЭДС $E_m = E_{m\ max}$, частоту колебаний источника переменной ЭДС $F = 1000$ Гц, сопротивление нагрузки $R_n = \infty$.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

Проанализируйте полученные осциллограммы напряжений и графики ВАХ и отметьте в рабочей тетради наблюдаемые отличия их по сравнению с измеренными на частоте $F = 100$ Гц.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ.

5.8. С помощью клавиши «Выход» лицевой панели и клавиши «Завершение работы» титульного экрана завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию работы стабилизатора на переменном токе.

6. Задание для исследования работы стабилизатора на переменном токе с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы OrCAD снять осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках моделируемой схемы параметрического стабилизатора напряжения при значениях параметров моделирования (амплитуда и частота стабилизируемой переменной ЭДС, входная постоянная ЭДС и сопротивление нагрузки), соответствующих пункту 5.6 задания по экспериментальному исследованию работы стабилизатора на переменном токе.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования OrCAD (параграф 4.1) и методиками исследования работы стабилизатора на переменном токе, приведенными в параграфе 4.2.3.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

Сравните осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме стабилизатора напряжения, полученные путем измерения и моделирования, отметьте наблюдаемые качественные и количественные отличия.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе Word.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы;
- 2) вид лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты экспериментального исследования параметрического стабилизатора напряжения по пункту 5, включающие:
 - осциллограммы напряжений с параметрами их измерения и графиками ВАХ, измеренные значения $|E|_{\min}$, $I_{\text{ст.изм. min}}$, $U_{\text{ст.изм. min}}$ при $R_n = \infty$ (пункт 5.3);
 - осциллограммы напряжений с параметрами их измерения E_0 , E_m и графиками ВАХ, измеренные и рассчитанные значения $|E|_{\min}$, $I_{\text{ст.изм. min}}$, $U_{\text{ст.изм. min}}$, $I_{\text{ст.изм. max}}$, $U_{\text{ст.изм. max}}$, $I_{\text{ст.изм. ном}}$, $U_{\text{ст.изм. ном}}$, $\Delta U_{\text{ст}}$, $\delta U_{\text{ст}}$, $K_{\text{ст}}$ при $R_n = \infty$ (пункт 5.4);
 - осциллограммы напряжений с параметрами их измерения и графиками ВАХ для сопротивлений нагрузки $R_n = 1000 \text{ Ом}$, 500 Ом , 200 Ом при найденных допустимых границах изменения ЭДС источника $|E|_{\min}$, $|E|_{\max}$, соответствующие им параметры рабочей точки стабилизатора $I_{\text{ст.изм. ном}}$, $U_{\text{ст.изм. ном}}$ и значения токов $I_{\text{ст.изм. min}}$, $I_{\text{ст.изм. max}}$ и коэффициентов стабилизации $K_{\text{ст}}$ (пункты 5.5, 5.6);
 - осциллограммы напряжений с параметрами их измерения, графиками ВАХ и описанием их отличия от измеренных на частоте $F = 100 \text{ Гц}$ (пункт 5.7);
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
 - осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме стабилизатора;
 - наблюдаемые качественные и количественные отличия осциллограмм, полученных путем измерения и моделирования, и их объяснение;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования работы стабилизатора на переменном токе и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Каково основное назначение стабилитрона и какими его свойствами оно обусловлено?
2. Каково назначение балластного резистора в схеме стабилизатора напряжения?
3. Можно ли включать стабилитрон в электрическую цепь без балластного резистора?
4. В чем заключается работа стабилитрона в случае нестабильного источника входного напряжения?
5. Каковы условия выбора рабочей точки стабилитрона на рабочем участке ВАХ?
6. В чем заключается работа стабилитрона в случае нестабильного сопротивления нагрузки?
7. Можно ли использовать стабилитрон в качестве обычного диода?
8. Как определяется коэффициент стабилизации напряжения стабилизатора на основе стабилитрона?
9. Как определяется диапазон стабилизируемых напряжений?
10. От чего зависит диапазон стабилизируемых напряжений стабилизатора напряжения?
11. Как графически найти диапазон стабилизируемых напряжений?
12. Как определяются коэффициенты пульсаций напряжения на входе и выходе стабилизатора напряжения?
13. Как выражается коэффициент пульсаций напряжения на выходе стабилизатора через коэффициент пульсаций входного напряжения?
14. Как определяется сопротивление стабилитрона для переменных составляющих тока?
15. Как графически найти ВАХ параллельно включенного стабилитрона и сопротивления нагрузки в графическом виде?
16. В чем заключаются особенности работы стабилизатора напряжения при росте частоты пульсаций?

Лабораторная работа № 7

Измерение и исследование ВАХ и параметров полевых транзисторов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах полевых транзисторов путем экспериментального исследования их с помощью

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты выполнения лабораторной работы, приводимые в отчете.

измерительных средств аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относятся:

- освоение методов экспериментального автоматического и ручного измерения вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов и методов их исследования с помощью моделирования на ПЭВМ;
- измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ характеристик и параметров полевых транзисторов разного типа, их сопоставление, физическое обоснование, анализ соответствия теоретически определяемым характеристикам и параметрам.

3. Краткие теоретические сведения

Полевым транзистором называется полупроводниковый прибор, управление током которого основано на зависимости электрического сопротивления токопроводящего слоя от напряженности поперечного электрического поля [1]. В полевых транзисторах используются только основные носители заряда: либо электроны, либо дырки, поэтому данные приборы называют униполярными.

Слой полупроводника, в котором протекает ток, называется *каналом*. Электрическое поле, воздействующее на поток носителей, создается с помощью расположенного над каналом металлического электрода, называемого *затвором*.

В настоящее время существуют три основные разновидности полевых транзисторов:

- полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом;
- полевые транзисторы со структурой металл – окисел – полупроводник, или МОП-транзисторы;
- полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ).

Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом. Структура полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом показана на рис. 5.11.

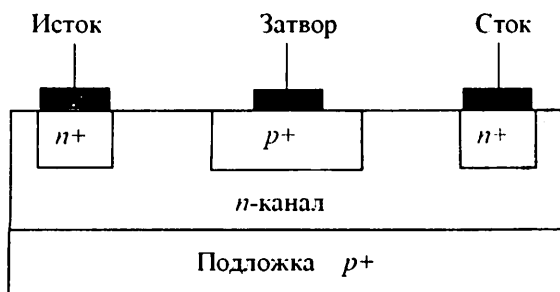


Рис. 5.11. Структура полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом

На подложке из p -кремния создается тонкий слой полупроводника n -типа, выполняющий функции канала. На концах канала находятся сильно легированные n^+ -области, называемые *истоком* и *стоком* соответственно, с помощью которых канал включается в цепь управляемого тока. Под металлическим электродом затвора находится p^+ -слой, образующий с каналом p - n -переход.

Полевые транзисторы с барьером Шоттки, структура которых показана на рис. 5.12, имеют принцип действия такой же, как транзисторы с управляющим p - n -переходом. Поэтому ниже рассматриваются полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом, анализ которых более нагляден.

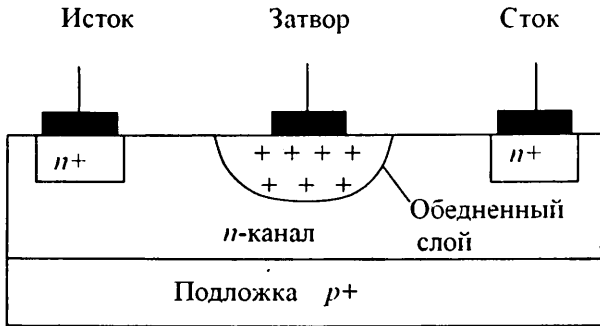


Рис. 5.12. Структура полевого транзистора с барьером Шоттки

Принцип действия. Прикладывая к затвору обратное напряжение $U_{зп}$, можно изменять ширину обедненной области p - n -перехода. Чем больше обратное напряжение, тем глубже обедненный слой и тем, соответственно, меньше поперечное сечение канала, где протекает ток. Таким образом, меняя обратное напряжение на затворе, можно менять поперечное сечение, а значит, и сопротивление канала. В результате будет меняться величина тока стока I_c , протекающего по каналу и выходной цепи транзистора под воздействием приложенного напряжения сток–исток $U_{си}$. Поскольку величина выходного тока (тока стока) может быть достаточно большой, а входной ток затвора (ток обратно смещенного p - n -перехода) мал, то обеспечивается усиление по току и, соответственно, по мощности.

Статические характеристики и параметры. Связь между током стока и напряжениями на стоке $U_{си}$ и затворе $U_{зп}$ определяется с помощью семейства статических *выходных (стоковых) вольт-амперных характеристик*, выражающих зависимость $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зп} = \text{const}$ (рис. 5.13а). Управляющее действие затвора иллюстрируют статические *передаточные (сток-затворные) вольт-амперные характеристики* (рис. 5.13б), выражающие зависимость $I_c = f(U_{зп})$ при $U_{си} = \text{const}$ [3]. На вольт-амперных характеристиках (ВАХ) полевого транзистора можно выделить три области: *линейную, насыщения и отсечки* (рис. 5.13а).

В линейной области с увеличением напряжения $U_{си}$ ток стока I_c вначале довольно быстро растет вплоть до точки перегиба, и характеристики представляют собой прямые линии, наклон которых определяется напряжением на затворе.

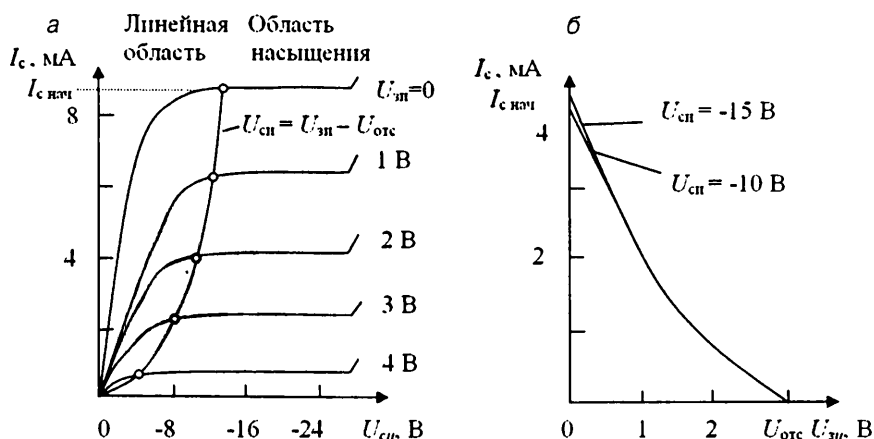


Рис. 5.13. Выходные (а) и передаточные характеристики (б) транзистора КП103М с каналом р-типа

В этой области полевой транзистор может использоваться как сопротивление, управляемое напряжением на затворе.

В области насыщения рост тока стока прекращается, и характеристики идут практически горизонтально. Это объясняется тем, что при повышении напряжения $U_{си}$ ток стока должен увеличиваться, но так как одновременно повышается обратное напряжение на $p-n$ -переходе стока, то обедненный слой расширяется, канал сужается, то есть его сопротивление возрастает и за счет этого ток стока должен уменьшиться. Таким образом, происходят два противоположных воздействия на ток стока, который в результате остается почти постоянным. Увеличение напряжения на стоке выше предельного значения приводит к электрическому пробое $p-n$ -перехода. В области насыщения полевые транзисторы используются в качестве усилительных приборов.

Напряжение сток-исток, соответствующее точкам перегиба, определяется как $U_{си} = U_{зи} - U_{отс}$.

При увеличении обратного напряжения на затворе ток стока уменьшается, и характеристика проходит ниже. При определенном значении напряжения на затворе, называемом напряжением отсечки $U_{отс}$, или пороговым напряжением $U_{пор}$, канал почти полностью перекрывается и протекает лишь ток утечки, обусловленный обратным напряжением на $p-n$ -переходе стока (для КП103М $U_{отс} = 2,7-7,0$ В при $U_{си} = 10$ В, $I_c = 10$ мкА).

Теоретическое описание ВАХ полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом в области насыщения получено Уильямом Шокли [1]:

$$I_c = I_{c \max} \left[1 - 3 \frac{U_{зи}}{U_{отс}} + 2 \left(\frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^{3/2} \right], \quad (5.15)$$

где $I_{c \max}$ – максимальный ток стока при $U_{зи} = 0$, называемый также начальным током $I_{c \text{ нач}}$.

На практике используют более простое описание ВАХ в области насыщения:

$$I_c = k(U_{отс} - U_{зи})^2, \quad (5.16)$$

где $k = I_{c.нач}/U_{отс}^2$ – постоянный коэффициент, зависящий от геометрических и электрофизических параметров транзистора.

В линейной области ВАХ ПТ описывается выражением [2]

$$I_c = 2k \left[(U_{отс} - U_{зи}) \cdot U_{си} - \frac{U_{си}^2}{2} \right]. \quad (5.17)$$

К низкочастотным параметрам ПТ, определяемым по ВАХ, относятся крутизна S , выходное сопротивление R_i (выходная проводимость $g_{22} = 1/R_i$) и сопротивление канала R_k .

Основной параметр ПТ – *крутизна* – определяется частной производной передаточной характеристики при заданном (постоянном) напряжении сток–исток:

$$S = (\partial I_c / \partial U_{зи})|_{U_{си} = \text{const}}. \quad (5.18)$$

Крутизна характеризует усилительные свойства полевого транзистора в области насыщения и измеряется в сименсах (Сим), или, как чаще принято называть, в миллиамперах на вольт.

Дифференцируя, можно найти зависимость крутизны от тока стока и напряжения затвор–исток:

$$S = 2k(U_{отс} - U_{зи}) = \frac{2I_{c.нач}}{U_{отс}^2}(U_{отс} - U_{зи}) = \frac{2}{|U_{отс}|} \sqrt{I_c I_{c.нач}} = S_{\max} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right), \quad (5.19)$$

где $S_{\max} = 2I_{c.нач}/|U_{отс}|$ – максимальное значение крутизны при $U_{зи} = 0$.

Второй параметр – *выходное (внутреннее) сопротивление* R_i , называемое также дифференциальным сопротивлением, – представляет сопротивление канала ПТ переменному току:

$$R_i = (\partial U_{си} / \partial I_c)|_{U_{зи} = \text{const}}. \quad (5.20)$$

Оно характеризует слабо выраженную зависимость тока стока от напряжения сток–исток. На участке насыщения R_i может достигать сотен кОм.

Параметром линейной области ВАХ ПТ является сопротивление канала постоянному току $R_k = U_{си}/I_c$, зависящее от напряжения затвор–исток $U_{зи}$.

Иногда используется такой параметр, как статический *коэффициент усиления*, который показывает, во сколько раз сильнее действует на ток стока изменение напряжения на затворе, чем изменение напряжения на стоке:

$$\mu = dU_{си}/dU_{зи} = S \cdot R_i \quad (5.21)$$

при $I_c = \text{const}$.

К параметрам ПТ относится также его *входное сопротивление*, определяемое как

$$R_{вх} = (\partial U_{зи} / \partial I_3)|_{U_{си} = \text{const}}. \quad (5.22)$$

Поскольку ток затвора I_3 – это очень малый ток обратно смещенного p – n –перехода (ток утечки), то входное сопротивление полевого транзистора достигает единиц и десятков МОм.

Измерение, или графический расчет, крутизны и выходного (внутреннего) сопротивления ПТ по его ВАХ выполняют по конечным приращениям тока стока и напряжений затвор–исток и сток–исток:

$$S = (\Delta I_c / \Delta U_{зи}) U_{си} = \text{const}; \quad R_i = (\Delta U_{си} / \Delta I_c) U_{зи} = \text{const}. \quad (5.23)$$

Полевые транзисторы характеризуются *предельными параметрами*, которые приводятся в их справочных данных.

Например, для полевого транзистора КП103М приводятся предельные параметры:

- предельное напряжение затвор–исток $U_{зи, \text{пред}} = 17 \text{ В}$;
- предельное напряжение сток–исток $U_{си, \text{пред}} = 10 \text{ В}$;
- максимальный ток стока $I_{с \text{ max}} = 10 \text{ мА}$;
- максимальная рассеиваемая мощность $P_{с \text{ max}} = 120 \text{ мВт}$ при температуре $T = 218\text{--}358 \text{ К}$.

МОП-транзисторы. Устройство полевых МОП-транзисторов показано на рис. 5.14. Их называют также МДП-транзисторами (от слов металл – диэлектрик – полупроводник), так как диэлектриком для кремния служит двуокись кремния SiO_2 .

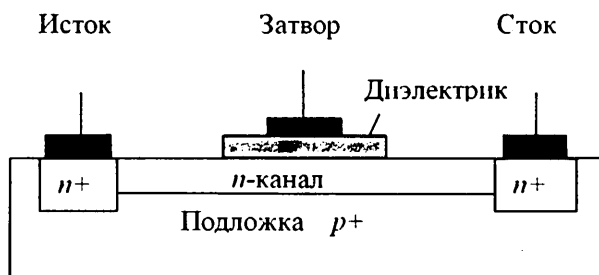


Рис. 5.14. Структура МДП-транзистора со встроенным n -каналом

Принцип действия. МОП-транзистор с n -каналом, который называется *встроенным*, может работать в режимах обеднения и обогащения. Эти режимы работы наглядно показывают выходные и передаточные характеристики (рис. 5.15а, б).

Если при $U_{зи} = 0$ между стоком и истоком приложить напряжение, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. При подаче на затвор отрицательного напряжения относительно истока в канале создается поперечное электрическое поле, выталкивающее из канала электроны проводимости. Чем больше это напряжение, тем меньше ток. Этот режим транзистора называют *режимом обеднения*.

Если же подавать на затвор положительное смещение, то под действием электрического поля из областей истока и стока, а также из подложки в канал будут приходить дополнительные электроны и ток стока возрастет. Этот режим называют *режимом обогащения*.

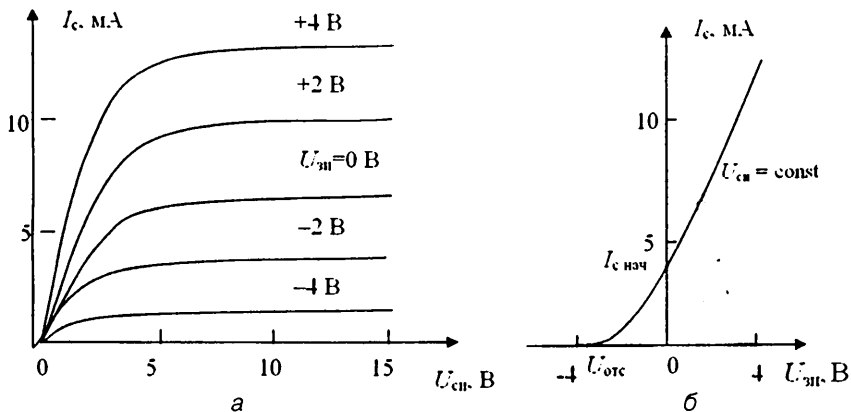


Рис. 5.15. Выходные (а) и передаточные (б) характеристики МОП-транзистора со встроенным каналом

Другим типом МОП-транзистора является транзистор с *индуцированным каналом* (рис. 5.16.) От транзистора со встроенным каналом он отличается тем, что канал возникает только при приложении на затвор напряжения определенной полярности.

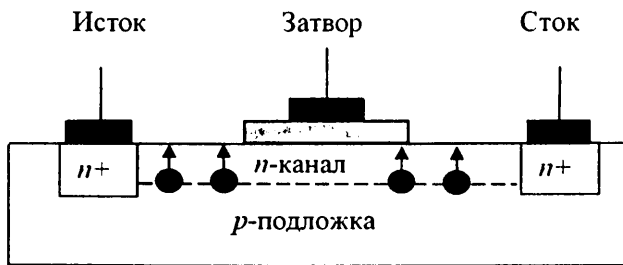


Рис. 5.16. Структура МДП-транзистора с индуцированным n -каналом

Его выходные и передаточные вольт-амперные характеристики показаны на рис. 5.17а, б.

При отсутствии напряжения канала нет, между истоком и стоком расположен только кристалл p -типа и на одном из $p-n+$ -переходов действует обратное напряжение. Если подать на затвор положительное напряжение, то под влиянием электрического поля электроны проводимости будут перемещаться из областей истока и стока и из подложки к затвору.

Когда напряжение затвора превысит некоторое *пороговое* значение $U_{пор}$ (единицы вольт), то в приповерхностном слое концентрация электронов превысит концентрацию дырок, произойдет так называемая *инверсия* типа электропроводности, то есть образуется тонкий канал n -типа и транзистор начнет проводить ток.

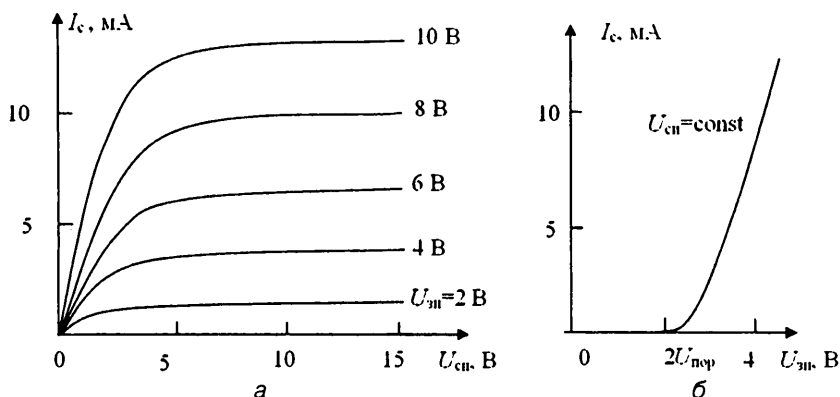


Рис. 5.17. Выходные (а) и передаточные (б) характеристики МОП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

Таким образом, подобный транзистор может работать только в режиме обогащения. Поскольку входной ток МДП-транзисторов ничтожно мал, а выходной ток может быть большим, то получается значительное усиление по мощности.

Основные параметры МОП-транзисторов аналогичны параметрам полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом.

Условные обозначения рассмотренных разновидностей полевых транзисторов на электрических схемах приведены на рис. 5.18.

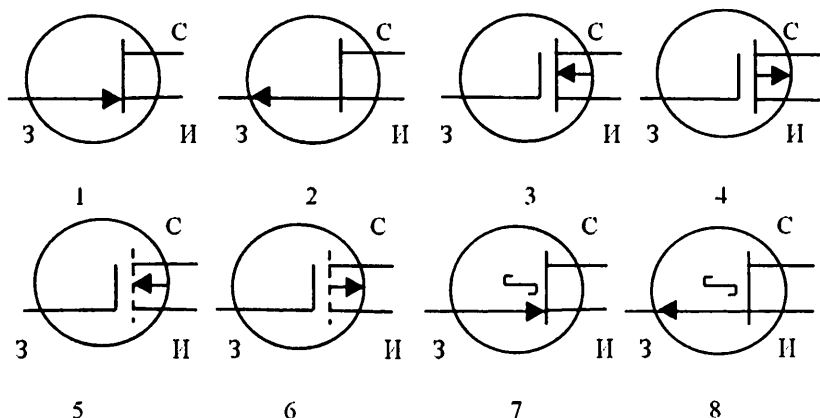


Рис. 5.18. Условные обозначения различных типов полевых транзисторов (И – исток, С – сток, З – затвор): 1, 2 – транзисторы с управляющим p - n -переходом (1 – с p -каналом, 2 – с p -каналом), 3, 4 – МОП-транзисторы со встроенным каналом (3 – с p -каналом, 4 – с p -каналом), 5, 6 – МОП-транзисторы с индуцированным каналом (5 – с p -каналом, 6 – с p -каналом), 7, 8 – транзисторы с барьером Шоттки (7 – с p -каналом, 8 – с p -каналом)

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения по работе.

Ознакомиться с принципом работы, техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» при измерении вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получить *вариант задания* выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов

Необходимо с помощью средств АПК «Электроника» провести измерение статических и динамических передаточных и выходных ВАХ для ПТ с управляющим $p-n$ -переходом и каналом p -типа и (или) ПТ с изолированным затвором и каналом n -типа в ручном и автоматическом режимах.

Определить значения параметров ПТ – сопротивления канала, крутизны, выходной проводимости (выходное сопротивление) в заданных точках ВАХ с помощью расчетов и автоматических курсорных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Полевой транзистор», лабораторную работу – «Измерение и исследование ВАХ» и заданный тип полевого транзистора (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.11) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с приводимыми ниже заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. В ручном режиме измерения снимите статические выходные характеристики ПТ $I_c = f(U_c)|U_s$ для трех (или четырех) значений напряжения затвор–исток $U_{зи}$:

а) при напряжении $U_{зи(1)} = 0$;

б) при напряжении $U_{зи(2)}$, соответствующем достаточно малому току стока, например $I_c = 0,1$ мА или 0,05 мА (при напряжении, близком к напряжению отсечки $U_{c,отс}$);

- в) при промежуточном значении напряжения затвор–исток $U_{\text{зи}(3)} = U_{\text{зи}(2)}/2$;
 г) для ПТ с изолированным затвором – при напряжении затвор–исток $U_{\text{зи}(4)} > 0$, соответствующем максимально допустимому (или близкому к нему) значению тока стока $I_c = I_{c\text{ макс}}$.

Измерение статических выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) включает определение с помощью пробных измерений априорно неизвестных значений $U_{\text{зи}}$ (кроме $U_{\text{зи}(1)} = 0$) и равных им значений ЭДС E_z и проведение контрольных измерений при найденных значениях E_z и различных значениях ЭДС E_c .

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.3.1. Выберите режим измерения «Ручной», вид выводимых характеристик «Выходные». Установите предельное (максимальное по модулю) значение ЭДС питания цепи стока $E_c = E_{c\text{ пред}}$. Для исследуемых ПТ допустимыми являются предельные значения ЭДС $E_{c\text{ пред}} = 10$ В (ПТ с n -каналом) и $E_{c\text{ пред}} = -10$ В (ПТ с p -каналом).

5.3.2. Установите значение ЭДС затвора $E_z = U_{\text{зи}(1)} = 0$, проведите измерение и зафиксируйте измеренные значения I_c , $U_{\text{си}}$, $U_{\text{зи}}$ на цифровом и графическом индикаторах (путем нажатия кнопки «Запись»).

5.3.3. Изменяя ЭДС затвора E_z в допустимых пределах, проводя измерения и фиксируя их результаты, найдите необходимые значения напряжений $U_{\text{зи}(2)}$, $U_{\text{зи}(3)}$, $U_{\text{зи}(4)}$ (напряжение $U_{\text{зи}(4)}$ находится только для ПТ с изолированным затвором). Запишите эти значения в рабочую тетрадь.

5.3.4. Соедините точки в окне графики линией. Полученная ВАХ является динамической выходной характеристикой с включенным в цепи стока ПТ сопротивлением $R_c = 300$ Ом, которая описывается выражением $I_c = (E_c - U_c)/R_c$ (нагрузочная прямая).

5.3.5. Установите ЭДС E_z , соответствующую одному из найденных значений $U_{\text{зи}}$, например $U_{\text{зи}(1)} = 0$. Изменяя ЭДС питания цепи стока E_c в пределах от $E_c = 0$ до $E_{c\text{ пред}}$ с шагом 1 В, проводя измерения и фиксируя их результаты, снимите статическую выходную ВАХ, соответствующую заданному значению $U_{\text{зи}}$.

На участке ВАХ, соответствующем переходу из линейной области в область насыщения, шаг изменения ЭДС можно уменьшить до 0,25–0,5 В с целью лучшего выявления этого перехода. Соедините точки измеренной ВАХ линией.

5.3.6. Повторите действия пункта 5.3.5 для других значений $U_{\text{зи}}$.

По верхней ВАХ, соответствующей $U_{\text{зи}(1)} = 0$ для ПТ с управляющим p – n -переходом и $U_{\text{зи}(4)}$ для ПТ с изолированным затвором, определите значения тока стока и напряжения сток–исток в точке перегиба ВАХ (на границе перехода из линейной области в область насыщения), условно обозначаемые как $I_{c\text{ нас}}$, $U_{c\text{ нас}}$ (для ПТ с управляющим p – n -переходом $I_{c\text{ нас}} = I_{c\text{ нач}}$ – соответствует начальному току стока при $U_{\text{зи}} = 0$), а также значение напряжения $U_{c\text{и}(1)}$ в верхней точке ВАХ при $E_c = -E_{c\text{ пред}}$.

Запишите значения $I_{c\text{ нас}}$ ($I_{c\text{ нач}}$), $U_{c\text{ нас}}$, $U_{c\text{и}(1)}$ в рабочую тетрадь.

Сохраните для отчета копию лицевой панели виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и графики измеренного семейства статических выходных ВАХ (совместно с графиком динамической выходной ВАХ).

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.3

По выходной ВАХ, соответствующей $U_{\text{зи}(1)} = 0$, определите значения сопротивления канала R_k и выходной проводимости g_{22} (или выходного сопротивления R_i) ПТ при напряжениях $U_{\text{си}} = U_{\text{с.нас}}/2$, $U_{\text{си}} = U_{\text{с.нас}}$ и $U_{\text{си}} > U_{\text{с.нас}}$ (в линейной области, в точке перегиба и в области насыщения).

5.4. В ручном режиме измерения снимите семейство статических передаточных ВАХ ПТ $I_c = f(U_c)|U_{\text{зи}}$ для трех значений напряжения сток–исток $U_{\text{си}}$: $U_{\text{си}(1)}$, $U_{\text{с.нас}}$ и $U_{\text{с.нас}}/2$, которые определены в пункте 5.3.6. Измерения проведите при значениях напряжения затвор–исток $U_{\text{зи}}$, определенных в пункте 5.3.3: $U_{\text{зи}(1)}$, $U_{\text{зи}(2)}$, $U_{\text{зи}(3)}$, $U_{\text{зи}(4)}$ ($U_{\text{зи}(4)}$ – для ПТ с изолированным затвором).

Измерение передаточных статических ВАХ при заданных значениях напряжения сток–исток включает поиск с помощью пробных измерений соответствующих им значений ЭДС питания цепи стока E_c при различных задаваемых значениях напряжения затвор–исток (ЭДС E_z) и проведение контрольных измерений при найденных значениях ЭДС E_c и заданных значениях ЭДС E_z .

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.4.1. Выберите режим измерения «Ручной», вид выводимых характеристик «Передаточные». Установите ЭДС затвора E_z , равной напряжению $U_{\text{зи}(4)}$ или $U_{\text{зи}(1)}$ в зависимости от типа ПТ, ЭДС стока $E_c = E_{\text{с.пред}}$ ($E_c = 10$ В для ПТ с n -каналом и $E_c = -10$ В для ПТ с p -каналом). Проведите измерение и зафиксируйте измеренные значения I_c , $U_{\text{си}} = U_{\text{си}(1)}$, $U_{\text{зи}}$ на цифровом и графическом индикаторах.

5.4.2. Установите значение ЭДС затвора $E_z = U_{\text{зи}(1)}$ для ПТ с изолированным затвором или $U_{\text{зи}(3)}$ для ПТ с управляющим p - n -переходом. Уменьшая по модулю ЭДС стока E_c и проводя пробные измерения (но не фиксируя их результаты), найдите значение E_c , при котором $U_{\text{си}} \approx U_{\text{си}(1)}$ с допустимой погрешностью в пределах $\pm 0,1$ В. Зафиксируйте результаты измерения во второй полученной точке передаточной ВАХ.

Аналогичным образом проведите измерения для других значений напряжения на затворе $U_{\text{зи}}$.

Соедините линией точки полученной статической передаточной ВАХ при $U_{\text{си}} \approx U_{\text{си}(1)}$.

5.4.3. Снимите вторую статическую передаточную ВАХ при $U_{\text{си}} \approx U_{\text{с.нас}}$. Для этого в зависимости от типа ПТ установите ЭДС затвора E_z , равной $U_{\text{зи}(4)}$ или $U_{\text{зи}(1)}$, и ЭДС стока $E_c = U_{\text{с.нас}} + (E_{\text{с.пред}} - U_{\text{си}(1)})$. Уменьшая по модулю ЭДС стока E_c и проводя пробные измерения (но не фиксируя их результаты), найдите значение E_c , при котором $U_{\text{си}} \approx U_{\text{с.нас}}$ с допустимой погрешностью в пределах $\pm 0,1$ В. Зафиксируйте результаты измерения в первой точке измеряемой передаточной ВАХ.

Аналогичным образом проведите измерения для других значений напряжения на затворе $U_{\text{зи}}$.

Соедините линией точки полученной статической передаточной ВАХ при $U_{\text{си}} \approx U_{\text{с.нас}}$.

5.4.4. Повторите действия, приведенные в пункте 5.4.3, для третьей статической передаточной ВАХ при $U_{\text{си}} \approx U_{\text{с.нас}}/2$. При недостаточной информативности

полученных передаточных характеристик выполните дополнительные измерения при других допустимых значениях напряжения $U_{зи}$.

По измеренным в ручном режиме передаточным ВАХ определите приближенные значения напряжения отсечки $U_{з.отс}$ и начального тока стока $I_{с.нач}$ ПТ, запишите их в рабочую тетрадь.

Дополнительно проведите измерение динамической передаточной ВАХ ПТ $I_c = f(U_{зг})|E_c = \text{const}$ при сопротивлении в цепи стока $R_c = 300$ Ом, значении ЭДС стока $E_c = E_{с.пред}$ и значениях напряжения затвора $U_{зи}$, равных $U_{зи(1)}$, $U_{зи(2)}$, $U_{зи(3)}$, $U_{зи(4)}$. Точки измеренной динамической ВАХ соедините линией.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и графики измеренного семейства статических передаточных ВАХ (совместно с графиком динамической передаточной ВАХ).

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.4

По передаточной ВАХ, соответствующей напряжению $U_{си} = U_{си(1)}$ (верхней ВАХ), определите значения крутизны ПТ при напряжениях затвор–исток $U_{зи(1)}$, $U_{зи(2)}$, $U_{зи(3)}$, $U_{зи(4)}$.

5.5. Выполните измерение выходных и передаточных ВАХ полевого транзистора в автоматическом режиме. Измерения проведите при начальных и конечных значениях ЭДС стока и затвора $E_{с.нач}$, $E_{с.кон}$, $E_{з.нач}$, $E_{з.кон}$, соответствующих их значениям, найденным при ручных измерениях. Шаг изменения для ЭДС стока dE_c можно принять равным 0,5 В, для ЭДС затвора $dE_z = 0,25$ В.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.5.1. Установите необходимые параметры автоматического измерения ВАХ. Проведите измерение. Проанализируйте автоматически выводимые характеристики $I_c = f(E_z)|E_c = \text{const}$ и параметры вывода ВАХ. По характеристикам и строке состояния проверьте, отличаются ли фактические значения параметров измерения от их заданных значений, объясните возможные причины отличия.

5.5.2. С помощью соответствующих клавиш выберите для вывода семейство выходных статических характеристик. Путем подбора параметров вывода ограничьте число выводимых на экран характеристик исходя из удобства их анализа.

Выведите в окно графики совместно со статическими динамическую выходную ВАХ. По верхней выводимой ВАХ, соответствующей $U_{зи(1)} = 0$ для ПТ с управляющим $p-n$ -переходом и $U_{зи(4)}$ для ПТ с изолированным затвором (см. пункт 5.3), определите значения начального тока $I_{с.нач}$ (тока насыщения $I_{с.нас}$) и напряжения насыщения $U_{с.нас}$ в точке перегиба ВАХ, запишите эти значения в рабочую тетрадь.

Задание для проведения курсорных измерений по пункту 5.5.2

Проведите курсорные измерения по выходной ВАХ, соответствующей напряжению $U_{зи} = 0$ при напряжениях сток–исток $U_{си} = U_{с.нас}/2$, $U_{си} = U_{с.нас}$ и $U_{си} > U_{с.нас}$

(в линейной области, в точке перегиба и в области насыщения). Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения токов, напряжений, сопротивления канала R_k и выходной проводимости g_{22} (или выходного сопротивления R_i).

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики выходных характеристик, измеренных в автоматическом режиме.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5.2

По результатам курсорных измерений постройте зависимость сопротивления канала R_k и выходной проводимости g_{22} (или выходного сопротивления R_i) ПТ от напряжения сток–исток $U_{си}$.

5.5.3. С помощью соответствующих клавиш выберите для вывода семейство передаточных статических характеристик. Подберите параметры вывода таким образом, чтобы в окне графики отображалось небольшое число измеренных характеристик, например три: верхняя ВАХ, нижняя и одна из промежуточных.

Выведите в окно графики совместно со статическими динамическую передаточную ВАХ. По измеренным в автоматическом режиме передаточным ВАХ определите приближенные значения напряжения отсечки $U_{з.отс}$ и начального тока стока $I_{с.нач}$ (тока насыщения $I_{с.нас}$ при $U_{зи(4)}$), запишите их в рабочую тетрадь.

Задание для проведения курсорных измерений по пункту 5.5.3

Проведите курсорные измерения по верхней статической передаточной ВАХ, соответствующей напряжению сток–исток $U_{си(1)}$, при следующих напряжениях затвор–исток $U_{зи}$: $U_{зи(1)} = 0$; $U_{зи(2)} \approx U_{з.отс}$; $U_{зи(3)} \approx U_{з.отс}/2$; для ПТ с изолированным затвором также при $U_{зи} = U_{зи(4)}$ (см. пункт 5.3).

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения токов, напряжений и крутизны ПТ S .

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики передаточных характеристик ПТ, измеренных в автоматическом режиме.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5.3

По результатам курсорных измерений постройте зависимость крутизны ПТ S от напряжения затвор–исток $U_{зи}$.

5.6. По индивидуальному заданию проведите измерения ВАХ для полевого транзистора другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип транзистора. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.7. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов.

6. Задание для исследования вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы *OrCAD* по математической модели полевого транзистора заданного типа (см. приложение 2) рассчитать его передаточные и выходные статические вольт-амперные характеристики при номинальном значении рабочей температуры транзистора $t_{\text{ном}}^0$ в диапазоне, ограниченном предельными для данного транзистора значениями напряжений и токов ($U_{\text{зи max}}, U_{\text{си max}}, I_{\text{с max}}$). Рассчитать также передаточную и выходную характеристики, соответствующие фиксированному напряжению $|U_{\text{си}}| = 5$ В и фиксированному напряжению $U_{\text{зи}} = 0$ при предельных для данного транзистора значениях температуры $t_{\text{min}}^0, t_{\text{max}}^0$.

По индивидуальному заданию рассчитать зависимость крутизны полевого транзистора от температуры в диапазоне, ограниченном ее предельными для данного транзистора значениями.

Сопоставить результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов, приведенными в параграфах 4.4.1, 4.4.4.

Сохраните для отчета:

- графики семейства статических ВАХ полевого транзистора, рассчитанные при номинальном значении температуры;
- графики передаточной и выходной ВАХ, рассчитанные для номинального и предельных значений температуры;
- графики передаточной и выходной динамических вольт-амперных характеристик при сопротивлении в цепи стока $R_{\text{с}} = 300$ Ом и ЭДС питания цепи стока $|E_{\text{с}}| = 10$ В;
- график зависимости крутизны полевого транзистора от температуры.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения тока стока полевого транзистора, вызванные изменением температуры транзистора.

Сравните качественно и количественно полученные путем измерения и моделирования ВАХ полевого транзистора для номинального значения температуры.

Оцените степень изменения крутизны полевого транзистора в диапазоне его рабочих температур.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых полупроводниковых приборов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;
- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и обработки по пункту 5, включающие:
 - показания цифрового индикатора ручных измерений и графики выходных характеристик, измеренных в ручном режиме (совместно с графиком динамической выходной ВАХ) (пункт 5.3);
 - приближенные значения начального тока $I_{с.нач}$ (тока насыщения $I_{с.нас}$) и напряжения насыщения $U_{с.нас}$ определенные по выходным ВАХ, измеренным в ручном режиме (пункт 5.3);
 - найденные значения сопротивления канала R_k и выходной проводимости g_{22} (или выходного сопротивления R_i) по выходным ВАХ, измеренным в ручном режиме (пункт 5.3);
 - показания цифрового индикатора ручных измерений и графики измеренного в ручном режиме семейства статических передаточных ВАХ (совместно с графиком динамической передаточной ВАХ) (пункт 5.4);
 - приближенные значения напряжения отсечки $U_{з.отс}$ и начального тока стока $I_{с.нач}$ (тока насыщения $I_{с.нас}$), определенные по передаточным ВАХ, измеренным в ручном режиме (пункт 5.4);
 - найденные значения крутизны S по передаточным ВАХ, измеренным в ручном режиме (пункт 5.4);
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и выводимые графики выходных характеристик, измеренных в автоматическом режиме (пункт 5.5);
 - значения начального тока $I_{с.нач}$ (тока насыщения $I_{с.нас}$) и напряжения насыщения $U_{с.нас}$ определенные по выходным ВАХ, измеренным в автоматическом режиме (пункт 5.5);
 - построенные по результатам курсорных измерений графики зависимости сопротивления канала R_k и выходной проводимости g_{22} (или выходного сопротивления R_i) ПТ от напряжения сток–исток $U_{си}$ (пункт 5.5);
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и выводимые графики передаточных характеристик ПТ, измеренных в автоматическом режиме (пункт 5.5);
 - значения напряжения отсечки $U_{з.отс}$ и начального тока стока $I_{с.нач}$ (тока насыщения $I_{с.нас}$), определенные по передаточным ВАХ, измеренным в автоматическом режиме (пункт 5.5);

- построенный по результатам курсорных измерений график зависимости крутизны S ПТ от напряжения затвор–исток $U_{зи}$ (пункт 5.5);
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
 - сохраненные для отчета графики статических ВАХ;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения тока стока транзистора при напряжениях $U_{зи} = 0, |U_{си}| = 5$ В, вызванные изменением температуры;
 - степень изменения крутизны полевого транзистора в диапазоне его рабочих температур;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов ручных, автоматических измерений и моделирования на ПЭВМ и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие полупроводниковые приборы называются полевыми транзисторами?
2. Какие существуют виды полевых транзисторов?
3. Чем управляются полевые транзисторы – напряжением или током?
4. Каковы полярности напряжений полевого транзистора и чем они определяются?
5. Как устроен и работает полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом?
6. Как устроен полевой транзистор с барьером Шоттки и каковы его особенности?
7. Какой вид имеют передаточные и выходные характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и с барьером Шоттки?
8. Как устроен и работает МОП-транзистор?
9. Какой вид имеют передаточные и выходные характеристики МОП-транзистора со встроенным и с индуцированным каналами?
10. В чем заключается различие МОП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами?
11. Какие характерные области можно выделить на ВАХ полевых транзисторов?
12. Как определяется граница между линейной областью и областью насыщения на ВАХ полевого транзистора?
13. Как определяются область и напряжение отсечки на ВАХ полевого транзистора?
14. Какими параметрами характеризуются полевые транзисторы?
15. Какие модели и параметры используются для математического описания вольт-амперных характеристик полевых транзисторов?
16. Какие параметры и как определяются по вольт-амперной характеристике полевого транзистора?
17. Что такое крутизна полевого транзистора, как она определяется и от чего зависит?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты лабораторной работы, приведенные в отчете.

18. Что такое сопротивление канала и внутреннее (выходное) сопротивление полевого транзистора, как они определяются и от чего зависят?
19. Как зависят параметры полевого транзистора от режима его работы?
20. Как зависят ВАХ и параметры полевых транзисторов от температуры?
21. Чем определяются частотные свойства полевых транзисторов?
22. Какими параметрами учитываются частотные свойства полевого транзистора в его математической модели?

Лабораторная работа № 8

Исследование технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах полевых транзисторов путем экспериментального исследования их с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

Задачами лабораторной работы являются физическое измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов разных типов и разных экземпляров транзисторов одного типа с целью их сопоставления и анализа причин расхождения, обусловленного несовершенством технологии.

3. Краткие теоретические сведения

Для изготовления полупроводниковых приборов используются различные материалы и технологии. Основным материалом для производства полевых транзисторов в настоящее время остается кремний. Однако все более широкое распространение получают арсенид-галлиевые полевые транзисторы с барьером Шоттки, работа которых основана на выпрямительных свойствах контакта металл – полупроводник.

Важнейшими этапами технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов являются выращивание и очистка полупроводниковых монокристаллов, механическая резка кристаллов на пластины, механическая и химическая полировка поверхности пластин. Полученные полупроводниковые пластины (подложки) являются исходным материалом для производства дискретных приборов и интегральных микросхем по *планарной технологии*. Сущность планарной технологии заключается в том, что в ходе технологического процесса обработке

подвергается только одна поверхность полупроводниковой пластины, на которой в едином технологическом цикле групповым методом формируется множество дискретных приборов.

Для изготовления, например, полевых транзисторов со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) на поверхности подложки методом *эпитаксии* наращивается тонкий слой кремния с нужным типом проводимости и концентрацией носителей – будущий канал. Затем под воздействием кислорода при высокой температуре поверхность кремния окисляется, образуя слой изолятора SiO_2 , который будет отделять металлический электрод затвора от токопроводящего канала. Оксид кремния при этом является не только изолятором, но и служит для маскирования поверхности от нежелательных воздействий в ходе последующих этапов технологической обработки.

Для формирования на поверхности полупроводника структуры полевого транзистора используется процесс *фотолитографии*. Для этого весь слой оксида покрывают светочувствительным фоторезистом, и с помощью фотошаблонов определенные участки пластины засвечиваются и проявляются. Затем с помощью органических растворителей фоторезист удаляется с засвеченных мест и с открывшихся участков удаляется слой оксида, открывая доступ к активному слою. В открывшихся окнах формируются омические контакты истока и стока путем повышенного легирования этих областей при помощи диффузии или ионной имплантации, вакуумным термическим испарением наносятся металлические электроды затвора, истока и стока и контактные площадки электродов для подключения к внешним выводам транзистора.

Следует отметить, что приведенные основные операции могут производиться неоднократно в разной последовательности и полный технологический цикл составляет десятки операций, включая резку пластины на кристаллы (чипы), установку кристаллов в корпуса, пайку к внешним выводам и ряд других операций.

В ходе разработки, изготовления и эксплуатации полупроводниковых приборов следует учитывать, что их характеристики и параметры могут иметь существенный разброс. Численное значение параметра, установленное техническими условиями или государственным стандартом, называется *номинальным значением*, или *номиналом*. Номинальные значения параметров устанавливают, исходя из технологических возможностей производства и потребностей применения, на основе статистической обработки результатов испытаний опытных партий приборов [1].

В условиях производства не всегда удастся обеспечить строгое соблюдение номиналов, и фактическое значение параметров отличается от номинального, то есть существует *технологический разброс параметров*, обусловленный рядом производственных причин. Обычно устанавливают максимально допустимое отклонение значений параметров от номинала. Его называют *допуском* и выражают либо в процентах, либо в крайних значениях параметра.

Разброс характеристик и параметров полевых транзисторов одного типа обусловлен многими факторами, прежде всего это связано с технологией выращивания,

очистки и обработки полупроводниковых кристаллов, а также последующими операциями изготовления приборов [2]. В любом реальном кристалле имеются химические примеси и нарушения кристаллической решетки, называемые дефектами структуры. В процессе изготовления приборов поверхность кристалла может быть также загрязнена самыми различными веществами, использованными при ее обработке (остатки кислот, щелочи, жировые пятна и т. п.). Все это приводит к разбросу характеристик и параметров готовых приборов.

У монокристаллов кремния, например, дефекты структуры приводят к радиальному разбросу величины удельного электрического сопротивления до 10–15%. На характеристиках и параметрах полевых транзисторов это проявляется в том, что изменяются крутизна, начальный ток стока транзисторов и величина напряжения отсечки.

По этой причине весь технологический процесс изготовления полупроводниковых приборов должен основываться на использовании химических веществ исключительно высокой чистоты (99,999%) и осуществляться в так называемых «чистых помещениях». Чистота, однако, является лишь одним из условий, за которым следят на всех стадиях технологического процесса. Высокие требования предъявляются также и к геометрической точности шаблонов для фотолитографии. Например, характерный размер затвора полевого транзистора в 1 мкм требует точности изготовления фотошаблона, по крайней мере на порядок выше, то есть 0,1 мкм. Но еще более важным становится совмещение проекций изображений на поверхности пластины во время фотолитографической обработки, которое достигается применением на фотошаблонах специальных геометрических знаков, называемых реперными.

Следует различать составляющие статистического разброса характеристик и параметров полевых транзисторов, обусловленные технологией изготовления и измерениями.

Для полупроводниковых приборов характерна сильная зависимость характеристик и параметров от температуры. Однако свойства полевых транзисторов слабо изменяются с ростом температуры, так как ток переносят основные носители заряда, концентрация которых слабо зависит от температуры, за исключением случаев, когда превышает максимально допустимое значение тока и начинается сильный разогрев прибора. Поэтому незначительное изменение температуры в ходе эксперимента практически не сказывается на исследовании разброса характеристик и параметров полупроводниковых стабилитронов.

Влияние технологического разброса на характеристики и параметры полевых транзисторов находит свое отражение в справочных данных. Например, для малоомощного полевого транзистора КП103М относительная разность крутизны характеристики при $U_{сн} = 10$ В, $U_{зи} = 0$ В составляет не более 10%, относительная разность начального тока стока также составляет не более 10%, относительная разность напряжений отсечки при $U_{сн} = 10$ В, $I_c = 10$ мкА – не более 10%.

Наличие технологического разброса снижает качество электронных устройств и должно учитываться при их разработке и сервисном обслуживании.

4. Задание на подготовку к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе.

Ознакомиться с принципом работы и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса (АПК) «Электроника» при исследовании технологического разброса ВАХ полевых транзисторов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получить *вариант задания* выполнения работы в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов

Необходимо с помощью средств АПК УД «Электроника» в автоматическом режиме измерить статические передаточные и выходные ВАХ четырех однотипных полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом и каналом p -типа и полевых транзисторов с изолированным затвором и каналом n -типа. С помощью курсорных измерений в заданных точках ВАХ определить средние значения и максимальные отклонения от средних значений для токов стока, крутизны и выходной проводимости ПТ, характеризующие их статистический разброс. Оценить долю статистического разброса ВАХ, обусловленную технологией изготовления полевых транзисторов и погрешностями измерения путем проведения многократных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Полевой транзистор», лабораторную работу – «Исследование технологического разброса» и заданный тип полевого транзистора (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.15) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с приводимыми ниже заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. Выполните измерение выходных ВАХ четырех однотипных полевых транзисторов в автоматическом режиме. Измерения проведите при исходных параметрах автоматического измерения $E_{с,нач}$, $E_{с,кон}$, $E_{з,нач}$, $E_{з,кон}$, dE_c , dE_z , $I_{с,изм\ lim}$ (начальных, конечных значениях и шаге изменения ЭДС стока и затвора и предельном измеряемом значении тока стока), выводимых по умолчанию. С помощью курсор-

ных измерений в трех точках усредненной ВАХ определите средние значения и максимальные отклонения от средних значений для токов стока и выходной проводимости ПТ, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Ознакомьтесь с выведенными на лицевую панель по умолчанию параметрами автоматического измерения ВАХ. Подтвердите их нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение. После успешного завершения измерения на графическом индикаторе должны появиться отличающиеся цветом и типом линии графики четырех измеренных выходных ВАХ $I_c = f(U_{си})|U_{зи}$ и ВАХ, полученной их усреднением, которые соответствуют начальному значению напряжения затвор–исток $U_{зи,нач}$.

Просмотрите выводимые характеристики при различных допустимых значениях параметра вывода ВАХ $U_{зи,нач} - U_{зи,кон}$. По характеристикам и строке состояния проверьте, отличаются ли фактические значения параметров измерения от заданных значений, объясните возможные причины расхождения.

Задание для проведения курсорных измерений

Установите значение параметра вывода $U_{зи(1)} = 0$. Проведите курсорные измерения по усредненной выходной ВАХ, соответствующей напряжению $U_{зи} = 0$ при напряжениях сток–исток $U_{си} = U_{с,нас}/2$, $U_{си} = U_{с,нас}$ и $U_{си} > U_{с,нас}$, где $U_{с,нас}$ – напряжение сток–исток в условной точке перегиба усредненной выходной ВАХ (точке перехода ВАХ из линейной области в область насыщения).

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения напряжений $U_{зи}$, $U_{си}$, средние значения и максимальные относительные отклонения токов стока $I_{с,ср}$, dI_c , %, и выходной проводимости $g_{22ср}$, dg_{22} , %.

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и выводимые графики измеренных выходных характеристик.

5.4. Выведите в окно графики передаточные ВАХ четырех однотипных ПТ, измеренные автоматически совместно с выходными ВАХ. Проведите курсорные измерения в трех точках усредненной передаточной ВАХ, определите средние значения и максимальные отклонения от средних значений для токов стока и крутизны ПТ, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

С помощью клавиши «Передаточные» выведите на экран графики четырех измеренных передаточных ВАХ $I_c = f(U_s)|U_c$ и ВАХ, полученной их усреднением, которые отличаются цветом и типом линии. Просмотрите выводимые характеристики при различных допустимых параметрах вывода ВАХ $U_{си}$, определите максимальные (по модулю) значения параметра вывода $U_{си(1)}$ и напряжения отсечки $U_{з,отс}$.

Задание для проведения курсорных измерений

По передаточным ВАХ, соответствующим напряжению вывода $U_{си(1)}$, проведите курсорные измерения при следующих напряжениях затвор–исток $U_{зи}$: $U_{зи(1)} = 0$;

$U_{зи(2)} \approx U_{з.отс}$, $U_{зи(3)} \approx U_{з.отс}/2$; для ПТ с изолированным затвором также проведите измерение при максимальном напряжении $U_{зи(4)} > 0$, соответствующем фактическому конечному значению параметра измерения $E_{з.кон}$, которое определяется (ограничивается) максимально допустимым (или близким к нему) значением тока стока $I_c = I_{c\max}$.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в заданных точках ВАХ значения напряжений $U_{зи}$, $U_{си}$, средние значения и максимальные относительные отклонения токов стока $I_{c\text{ср}}$, dI_c , %, и крутизны $S_{ср}$, dS , %.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и измеренные графики передаточных характеристик ПТ.

5.5. Оцените влияние случайной погрешности при измерении технологического разброса ВАХ.

Задание для измерения. Выполните повторно измерение выходных и передаточных ВАХ четырех однотипных полевых транзисторов при тех же исходных параметрах автоматического измерения, что и в пункте 5.3. С помощью курсорных измерений в тех же точках усредненных ВАХ определите средние значения и максимальные отклонения от средних значений для токов стока, выходной проводимости и крутизны ПТ, характеризующие их статистический разброс. Сравните их с результатами измерений, проведенных по пунктам 5.3, 5.4 данной лабораторной работы.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Не изменяя параметров автоматического измерения (пункт 5.3), проведите повторное измерение выходных и передаточных ВАХ четырех однотипных полевых транзисторов.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения в тех же точках усредненной выходной и передаточной ВАХ полевых транзисторов, что и в пунктах 5.3, 5.4 лабораторной работы.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора результаты курсорных измерений, включающие значения напряжений $U_{зи}$, $U_{си}$, средние значения и максимальные относительные отклонения токов стока $I_{c\text{ср}}$, dI_c , %, выходной проводимости $g_{22\text{ср}}$, dg_{22} , % и крутизны $S_{ср}$, dS , %.

Физические и курсорные измерения можно провести многократно и усреднить их результаты.

Сохраните для отчета показания цифровых индикаторов и измеренные графики выходных и передаточных характеристик ПТ.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.5

На основе сравнения результатов измерения статистического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов по пунктам 5.3, 5.4, 5.5 лабораторной работы сделайте выводы о доле случайной составляющей погрешности измерения в получаемых оценках технологического разброса ВАХ и о возможности уменьшения ее путем усреднения результатов многократных измерений.

5.6. Выполните измерение линейных участков выходных ВАХ четырех одно-типных полевых транзисторов при разнополярных значениях ЭДС стока $E_{с,нач}$, $E_{с,кон}$ и значениях $E_{з,нач}$, $E_{з,кон}$, $dE_{сг}$, $dE_{зг}$, выводимых по умолчанию. С помощью курсорных измерений в двух точках усредненной ВАХ определите средние значения и максимальные отклонения от средних значений для токов стока и выходной проводимости ПТ, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Определите необходимые для измерения линейных начальных участков выходных ВАХ ПТ значения ЭДС стока $E_{с,нач}$, $E_{с,кон}$: $E_{с,нач} = -E_{с,кон} \approx |U_{з.отс}| + I_{с,нач.ср} R_c$, где $U_{з.отс}$ – напряжение отсечки (пороговое напряжение) ПТ, $I_{с,нач.ср}$ – среднее значение тока стока ПТ при $U_{з(1)} = 0$, которые определены в пункте 5.4; $R_c = 300$ Ом – измерительное сопротивление в цепи стока. Установите найденные значения параметров автоматического измерения и проведите измерение ВАХ. После успешного завершения измерения ознакомьтесь с выведенными на графический индикатор выходными ВАХ четырех однотипных ПТ и усредненной ВАХ при положительных и отрицательных значениях напряжения стока $U_{сг}$.

Проанализируйте выводимые характеристики при различных допустимых значениях параметра вывода ВАХ $U_{зг}$.

Задание для проведения курсорных измерений

5.6.1. Установите значение параметра вывода $U_{з(1)} = 0$. Проведите курсорные измерения в точках усредненной выходной ВАХ, соответствующей напряжению $U_{зг} = 0$ при напряжениях сток–исток $U_{сг} = \pm U_{сг \max} / 2$ и $U_{сг} = \pm U_{сг \max}$, где $U_{сг \max}$ – максимальное по модулю измеренное значение напряжения сток–исток.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения напряжений $U_{зг}$, $U_{сг}$, средних значений и максимальных относительных отклонений токов стока $I_{с,ср}$, dI_c , %, и выходной проводимости $g_{22ср}$, dg_{22} , %.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики измеренных выходных характеристик.

5.6.2. Повторите курсорные измерения по пункту 5.6.1 при значении параметра вывода ВАХ $U_{з(1)} \approx |U_{з.отс}| / 2$ (с учетом необходимого знака $U_{зг}$ для конкретного ПТ).

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики измеренных выходных характеристик.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.6

По результатам курсорных измерений пунктов 5.6.1, 5.6.2 определите приближенно средние значения сопротивлений канала ПТ в заданных точках ВАХ.

5.7. По индивидуальному заданию проведите измерения ВАХ для полевого транзистора другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип полевого транзистора. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.8. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров полевых транзисторов.

6. Задание для исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы OrCad по математической модели исследуемого полевого транзистора (приложение 2) рассчитайте вольт-амперные характеристики четырех однотипных полевых транзисторов при заданном технологическом разбросе параметра модели БЭТА (крутизны транзистора), равном 10%, и номинальном значении температуры. Расчет характеристик проведите при фиксированных напряжениях $|U_{си}| = 5$ В для передаточных ВАХ и $U_{зи} = 0$ для выходных ВАХ в диапазоне, ограниченном предельными значениями напряжений и токов транзистора $U_{зи\max}$, $U_{си\max}$, $I_{с\max}$.

Сопоставьте результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования OrCAD (параграф 4.1) и методиками исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик полевых транзисторов, приведенными в параграфе 4.4.2.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования графики передаточных и выходных ВАХ транзисторов с учетом их технологического разброса.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения тока стока полевых транзисторов одного типа при напряжениях $U_{зи} = 0$, $|U_{си}| = 5$ В, вызванные технологическим разбросом их вольт-амперных характеристик.

Сравните качественно и количественно результаты измерения и моделирования технологического разброса ВАХ полевых транзисторов.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе Word.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых полевых транзисторов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;

- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик полевых транзисторов по пункту 5, включающие:
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных выходных характеристик ПТ (пункт 5.3);
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных передаточных характеристик ПТ (пункт 5.4);
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных выходных и передаточных ВАХ ПТ, выводы о влиянии случайной погрешности измерения на оценку технологического разброса ВАХ ПТ на различных участках измеренных ВАХ (пункт 5.5);
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных выходных характеристик ПТ при разнополярных значениях ЭДС стока (пункт 5.6).
 - приближенные средние значения сопротивлений канала ПТ в заданных точках ВАХ, найденные по результатам курсорных измерений пунктов 5.6.1, 5.6.2;
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
 - графики передаточных и выходных ВАХ транзисторов с учетом их технологического разброса;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения тока стока полевых транзисторов одного типа при напряжениях $U_{зи} = 0, |U_{си}| = 5 \text{ В}$, вызванные технологическим разбросом их вольт-амперных характеристик;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования технологического разброса ВАХ и параметров полевых транзисторов и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие материалы и технологии используются при изготовлении полевых транзисторов?
2. Как взаимосвязаны ВАХ и параметры полевых транзисторов с материалами и технологиями, которые используются в их производстве?
3. Что понимается под технологическим разбросом ВАХ и параметров полевых транзисторов?
4. Какова физическая природа технологического разброса ВАХ и параметров у полевых транзисторов одного типа?
5. Как проявляется технологический разброс на ВАХ и параметрах исследуемых однотипных транзисторов?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты лабораторной работы, приведенные в отчете.

6. С помощью каких технологических приемов и методов достигается уменьшение технологического разброса ВАХ транзисторов?
8. Как разделить составляющие статистического разброса, обусловленные технологией и измерениями?
9. Какие параметры технологического разброса приводятся в справочных данных полевых транзисторов? Приведите примеры.
10. Как учитывается в математических моделях полевых транзисторов технологический разброс их параметров?
11. Как проявляется технологический разброс ВАХ и параметров полевых транзисторов в электронных схемах? Приведите примеры.
12. Какими методами достигается уменьшение влияния технологического разброса ВАХ полевых транзисторов на характеристики качества электронных устройств на их основе?
13. Каковы особенности технологического разброса у интегральных полевых транзисторов, изготовленных на одном кристалле?

Лабораторная работа № 9

Исследование работы полевого транзистора на переменном токе

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о характеристиках, параметрах и применениях полевых транзисторов путем экспериментального их исследования с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относится изучение работы полевого транзистора в динамическом режиме путем физического измерения и исследования с помощью моделирования на ПЭВМ осциллограмм напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада и их обоснования посредством вольт-амперных характеристик полевого транзистора.

3. Краткие теоретические сведения

Полевые транзисторы применяются для усиления электрических сигналов. В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общей точкой для входного и выходного напряжений, различают три основные схемы включения ПТ: схема с общим истоком (ОИ), схема с общим стоком (ОС) и схема с общим затвором (ОЗ). Наибольшее распространение для усиления сигналов получила

схема с общим истоком [1]. На рис. 5.19 приведена простейшая схема резистивно-го усилительного каскада с ОИ на основе полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа.

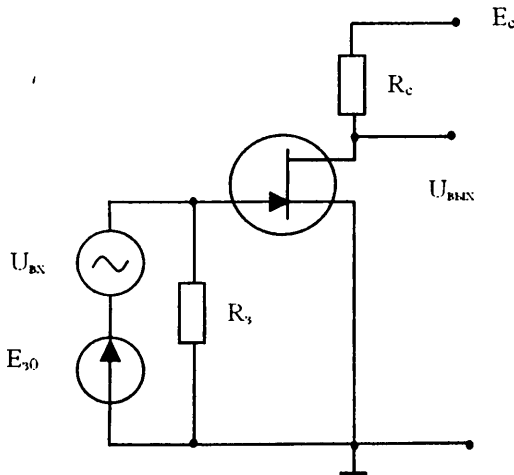


Рис. 5.19. Схема усилительного каскада с общим истоком на полевом транзисторе

Кроме активного элемента (ПТ), схема содержит источник питания цепи стока E_c , источник смещения E_{30} в цепи затвора, в которой действует также источник усиливаемого напряжения $U_{вх}$, резистор нагрузки R_c в цепи стока и резистор утечки R_3 в цепи затвора. В практических схемах используются различные способы задания смещения и связи с источником сигнала. В схеме усиления активный элемент, управляемый входным напряжением, преобразует энергию источника питания в энергию полезных усиливаемых сигналов, выделяемых на сопротивлении нагрузки.

Каскад с общим истоком обеспечивает большое усиление по току и по напряжению. Наглядное представление об усилительных свойствах полевого транзистора дает графоаналитический метод расчета и анализа работы каскада [2] (рис. 5.20).

Графоаналитический метод позволяет не только определить переменные составляющие токов и напряжений, но и задать режим работы транзистора по постоянному току. Расчет выполняют с помощью семейства выходных и передаточных характеристик транзистора. Для этого на семействе статических выходных характеристик по заданному или выбранному значению напряжения питания цепи стока E_c и сопротивления нагрузки R_c строится динамическая выходная характеристика, называемая также *линией нагрузки* (рис. 5.20а). Линия нагрузки определяется выражением

$$I_c = (E_c - U_{си})/R_c, \quad (5.24)$$

которое получается из уравнения Кирхгофа для выходной цепи транзистора

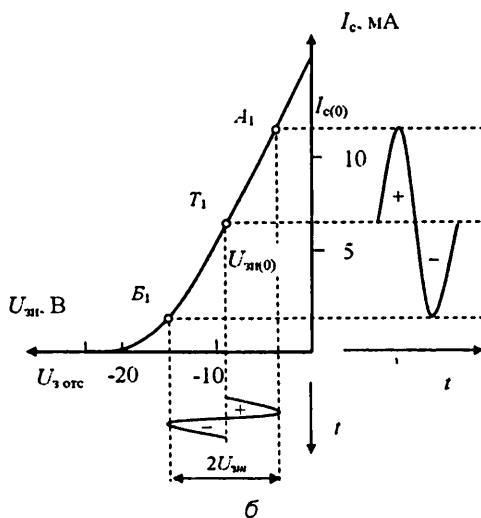
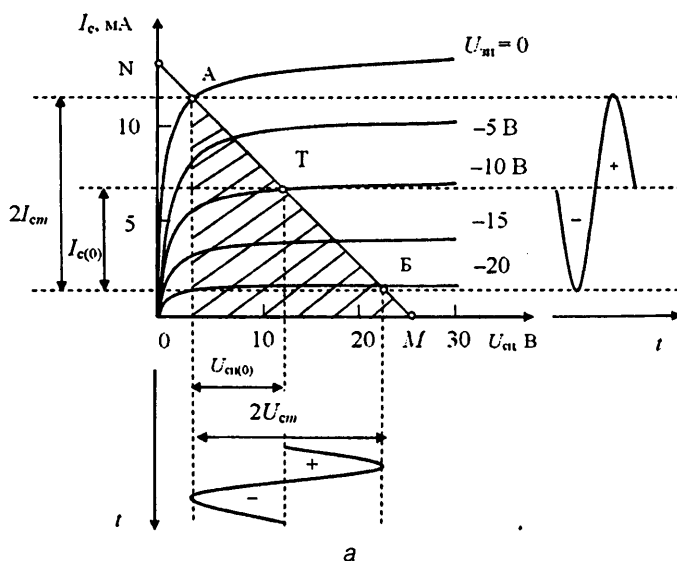


Рис. 5.20. К графоаналитическому расчету и анализу режима усиления полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

$$E_c = U_{гг} + I_c R_c. \quad (5.25)$$

Выражение (5.24) является уравнением прямой линии, которая может быть построена по двум точкам пересечения ее с осями координат. При $I_c = 0$ получаем $U_{гг} = E_c$; откладываем эту точку на оси напряжений (точка М). При $U_{гг} = 0$ получаем $I_c = E_c / R_c$; откладываем это значение по оси тока, получаем точку N. Соединяя эти точки пря-

мой, получаем линию нагрузки. Затем выбираем на ней рабочий участок (область рабочих токов транзистора) и исходную рабочую точку. Например, для получения большой выходной мощности и малых искажений сигнала следует взять рабочий участок АБ. Входное напряжение $U_{\text{зи}}$ изменяется при этом от $U_{\text{зи}} = 0$ (точка А) до $U_{\text{зи}} = U_{\text{отс}}$ (точка Б). По проекциям рабочего участка на оси координат определяем двойные амплитуды переменных составляющих выходного напряжения $2U_{\text{см}}$ и выходного тока $2I_{\text{см}}$. По ним можно найти полезную выходную мощность

$$P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_{\text{см}} \cdot U_{\text{см}}. \quad (5.26)$$

На рис. 5.20а заштрихован так называемый *треугольник полезной мощности*. Его гипотенузой является рабочий участок АБ, а катетами – соответственно двойные амплитуды тока $2I_{\text{см}}$ и напряжения $2U_{\text{см}}$. Нетрудно увидеть, что площадь треугольника соответствует учетверенной полезной выходной мощности $2I_{\text{см}} \cdot U_{\text{см}}$.

Рабочая точка Т выбирается на середине рабочего участка линии нагрузки и соответствует напряжению на затворе $U_{\text{зи}(0)}$, равному половине суммы напряжений на затворе в точках А и Б. Половиной разности этих напряжений определяется максимальная амплитуда переменной составляющей входного напряжения $U_{\text{зм}}$. Проекция рабочей точки на оси координат определяют постоянные значения тока стока $I_{\text{с}(0)}$ и напряжения $U_{\text{си}(0)}$ в режиме покоя.

Коэффициент усиления каскада по напряжению K_u можно рассчитать как отношение амплитуд его выходного и входного напряжений:

$$K_u = U_{\text{м вых}} / U_{\text{м вх}} = U_{\text{см}} / U_{\text{зм}}. \quad (5.27)$$

Если имеется семейство передаточных статических характеристик, то, перенося на них точки динамической выходной ВАХ, можно построить динамическую передаточную ВАХ, рис. 5.20б. На нее отображаются точки А, Т₁ и Б₁, соответствующие точкам А, Т и Б выходной динамической характеристики, которые определяют рабочую точку и границы рабочего участка на динамической передаточной характеристике. Проекция рабочего участка А₁Б₁ на ось напряжений выражает двойную амплитуду переменной составляющей входного напряжения $2U_{\text{зм}}$. Проекция точки Т₁ на ось напряжений определяет постоянное напряжение (ЭДС) смещения $E_{\text{з0}}$.

По динамической передаточной ВАХ может быть графически определена также средняя динамическая крутизна каскада $S_d = 2I_{\text{см}} / 2U_{\text{зм}}$, через которую по заданному сопротивлению нагрузки рассчитывается коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = S_d R_{\text{н}}. \quad (5.28)$$

Следует отметить, что МДП-транзисторы и полевые транзисторы с барьером Шоттки используются в тех же схемах включения, что и полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения по работе.

Ознакомиться с принципом работы, измерительными возможностями и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса при исследовании работы полевых транзисторов на переменном токе и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе. Получить *вариант задания* ее выполнения в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования работы полевого транзистора на переменном токе

С помощью средств АПК УД «Электроника» измерить осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада на полевом транзисторе для разных режимов работы транзистора, значений амплитуды и частоты сигнала, сопротивления нагрузки и ЭДС источника питания. Обосновать результаты измерения посредством ВАХ транзистора; определить коэффициенты передачи энергетические характеристики каскада по данным измерения.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Полевой транзистор», лабораторную работу – «Исследование работы прибора на переменном токе» и тип полевого транзистора (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.19) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь по лицевой панели стенда со схемой исследуемого каскада на полевом транзисторе, с лицевыми панелями измерителя ВАХ и цифрового осциллографа, со схемой подключения каналов осциллографа, с параметрами источников постоянной и переменной ЭДС, с их выводимыми по умолчанию значениями.

5.3. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада, соответствующих работе полевого транзистора в режиме большого сигнала без отсечки тока (в режиме А).

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.3.1. Проведите измерение ВАХ ПТ, нажав кнопку включения автоматического измерителя ВАХ. При успешном завершении измерения ознакомьтесь с выведенными графиками измеренных статических выходных и динамических передаточных и выходных ВАХ.

Установите значение ЭДС питания цепи стока $E_c = +7,5$ В для ПТ с n -каналом и $E_c = -7,5$ В для ПТ с p -каналом (или другое значение в соответствии с индивидуальным вариантом).

Изменяя ЭДС источника смещения цепи затвора $E_{з0}$, по графикам ВАХ и показаниям цифровых индикаторов измерителя ВАХ, определите нижнюю и верхнюю границы рабочего участка по напряжению затвор–исток $U_{зп.ниж}$, $U_{зп.верх}$, соответствующие работе ПТ в области насыщения без отсечки тока.

Запишите в рабочую тетрадь соответствующие границам рабочего участка значения ЭДС источника смещения цепи затвора $E_{з.ниж}$, $E_{з.верх}$.

Установите исходную рабочую точку в середине рабочего участка ВАХ путем задания ЭДС смещения $E_{з(0)} = (U_{з.ниж} + U_{з.верх})/2$ (рабочая точка 0).

Задайте соответствующую рабочему участку максимальную амплитуду переменной (гармонической) составляющей ЭДС затвора $E_{п\max}$ (амплитуду входного сигнала), равную $|U_{з.верх} - U_{з.ниж}|/2$. Частоту гармонического сигнала оставьте равной значению, выводимому по умолчанию.

Запишите в рабочую тетрадь выводимые на цифровые индикаторы значения токов и напряжений ПТ в рабочей точке $U_{зп(0)}$, $I_{с(0)}$, $U_{сн(0)}$.

Проверьте в рабочей тетради соответствие полученных данных уравнению Кирхгофа для выходной цепи: $E_c = U_{сн} + I_c R_c$.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

При успешном завершении измерения на экран выводятся измеренные осциллограммы напряжений затвор–исток $U_{зп}$ (входной ЭДС $E_{з}$) (канал 1), сток–исток $U_{сн}$ (канал 2) и падения напряжения $U_{Rc} = I_c R_c$ на сопротивлении нагрузки R_c , пропорционального току стока I_c (канал 3). Мгновенные значения напряжений и тока стока ПТ отображаются также на графиках передаточной и выходной динамических ВАХ измерителя ВАХ.

Подберите удобное для анализа и проведения курсорных измерений число периодов развертки сигналов осциллографа, равное, например, одному периоду.

Определите по осциллограммам, каким является усилительный каскад с общим истоком – инвертирующий или неинвертирующий, а также в каком соотношении находятся фазы напряжения сток–исток и тока стока.

5.3.2. Проведите курсорные измерения по выведенным осциллограммам напряжений. Перемещая курсорную линию вдоль осциллограмм и контролируя показания связанных с нею цифровых индикаторов мгновенных значений напряжений, найдите ближайшее положение линии, при котором напряжения $U_{зп}$, $U_{сн}$, U_{Rc} на входах каналов осциллографа принимают свои экстремальные (максимальные или минимальные) значения. Это положение соответствует моменту времени t_1 , равному $1/4$ периода сигнала T .

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда. Сохраните измеренные ВАХ и осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.3.2.

5.3.3. Перемещая далее курсорную линию вдоль осциллограмм и контролируя показания курсорных индикаторов напряжений, найдите второе положение линии, при котором напряжения $U_{зп}$, $U_{сн}$, U_{Rc} на входах каналов также принимают экстремальные (но противоположные предыдущему) значения. Это положение соответствует моменту времени t_2 , равному $3/4$ периода сигнала T .

Сохраните для отчета измеренные ВАХ и осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.3.3.

5.3.4. Не изменяя положения курсорной линии, переведите входы каналов осциллографа в режим «Закрытые».

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов по пункту 5.3.4, необходимые для определения постоянных составляющих токов и напряжений¹.

5.3.5. Переведите входы каналов осциллографа в режим «Открытые». Установите амплитуду переменной составляющей ЭДС затвора E_m (амплитуду входного сигнала), равной нулю ($E_m = 0$).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

При успешном завершении измерения сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.3.5².

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.3

По результатам измерения определите:

- значения напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока в исходной рабочей точке (точка покоя) $U_{зи(0)}$, $U_{си(0)}$, $I_{с(0)}$;
- средние значения (постоянные составляющие) напряжения сток–исток $U_{си-}$ и тока стока $I_{с-}$ (по разности значений токов или напряжений в заданной точке осциллограммы при открытых и закрытых входах осциллографа, см. примечание к пункту 5.3.4);
- амплитуды напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока $U_{зи m}$, $U_{си m}$, $I_{с m}$ (по размаху соответствующих им осциллограмм);
- коэффициент передачи (усиления) по напряжению $K_U = U_{си m}/U_{зи m}$;
- динамическую крутизну $S = I_{с m}/U_{зи m}$;
- разности средних и исходных значений напряжения сток–исток и тока стока: $\Delta U_{си} = U_{си-} - U_{си(0)}$; $\Delta I_{с} = I_{с-} - I_{с(0)}$;
- мощность переменной составляющей выходного сигнала $P_{-} = (I_{с m} U_{си m})/2$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в динамическом режиме, $P_{рас-} = I_{с-} U_{с-}$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в режиме покоя, $P_{рас(0)} = I_{с(0)} U_{с(0)}$;
- мощность, потребляемую от источника питания в динамическом режиме, $P_{потр-} = I_{с-} E_{с}$;

¹ Постоянная составляющая тока I_{-} или напряжения U_{-} определяется как разность измеренных по осциллограмме значений тока или напряжения при открытых и закрытых входах каналов осциллографа, соответствующих одному и тому же моменту времени (t_1 или t_2). При определении I_{-} , U_{-} по двум моментам времени их значения $I_{-(1)}$, $I_{-(2)}$, $U_{-(1)}$, $U_{-(2)}$, полученные в моменты времени t_1 , t_2 , необходимо усреднить: $I_{-} = (I_{-(1)} + I_{-(2)})/2$, $U_{-} = (U_{-(1)} + U_{-(2)})/2$.

² Осциллограммы и показания цифровых индикаторов по пункту 5.3.5 соответствуют значениям токов и напряжений в рабочей точке ПТ. Если эти значения были измерены ранее, то выполнение пункта 5.3.5 не является обязательным.

- мощность, потребляемую от источника питания в режиме покоя, $P_{\text{потр}(0)} = I_{c(0)}E_c$;
- коэффициент полезного действия каскада $\eta = P_{\text{сиг}}/P_{\text{потр}}$.

5.4. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада при разных положениях исходной рабочей точки ПТ в режиме малого сигнала без отсечки тока.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.4.1. Установите входы каналов осциллографа в положение «Закрытые». Задайте амплитуду входного сигнала $E_m = E_{m\text{max}}/3$. Оставьте установленное в пункте 5.3 положение исходной рабочей точки в середине рабочего участка динамической ВАХ, соответствующее значению ЭДС смещения затвора, равному $E_{0(0)}$ (рабочая точка 0).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.2. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения, установив курсорную линию в положение, соответствующее моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.4.2 совместно с графиками ВАХ.

5.4.3. Установите ЭДС смещения затвора, равную $E_{30(1)} = (U_{3.\text{ниж}} + E_{m\text{max}}/3)$ для ПТ с каналом n -типа или $E_{30(1)} = (U_{3.\text{ниж}} - E_{m\text{max}}/3)$ – для ПТ с каналом p -типа, что соответствует рабочей точке в нижней области рабочего участка динамической ВАХ (рабочая точка 1).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.4. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения, установив курсорную линию в положение, соответствующее моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ совместно с графиками ВАХ по пункту 5.4.4.

5.4.5. Установите ЭДС смещения затвора, равную $E_{30(2)} = (U_{3.\text{верх}} - E_{m\text{max}}/3)$ для ПТ с каналом n -типа или $E_{30(2)} = (U_{3.\text{верх}} + E_{m(\text{max})}/3)$ – для ПТ с каналом p -типа, что соответствует рабочей точке в верхней области рабочего участка динамической ВАХ (рабочая точка 2).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.6. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения, установив курсорную линию в положение, соответствующее моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ совместно с графиками ВАХ по пункту 5.4.6.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.4

По результатам измерения для трех положений исходной рабочей точки ($l = 0, 1, 2$) определите:

- значения напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока в исходной рабочей точке (точке покоя) $U_{зи(l)}, U_{си(l)}, I_{с(l)}$;
- амплитуды напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока $U_{зи.м(l)}, U_{си.м(l)}, I_{с.м(l)}$;
- коэффициент передачи (усиления) по напряжению $K_{U(l)} = U_{си.м(l)} / U_{зи.м(l)}$;
- динамическую крутизну $S_{(l)} = I_{с.м(l)} / U_{зи.м(l)}$.

Постройте графики зависимости коэффициента усиления K_U и динамической крутизны S от значения тока коллектора в рабочей точке $I_{к(l)}$, то есть от режима работы ПТ по постоянному току.

5.5. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада, соответствующих работе полевого транзистора в режиме большого сигнала с отсечкой тока (режим, близкий к режиму В).

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.5.1. Установите ЭДС смещения затвора, равную $E_{з0(3)} = U_{з.ниж}$, что соответствует нижнему положению исходной рабочей точки на динамической ВАХ.

Задайте значение амплитуды входного сигнала $E_m = |U_{з.верх} - U_{з.ниж}| = 2E_{m\max}$. Если окажется, что сумма $E_m + E_{з0(3)} > 10$ В, то уменьшите амплитуду входного сигнала до значения $E_m = 10 - E_{з0(3)}$ В.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.5.1.

5.5.2. Проведите курсорные измерения при положении курсорной линии, соответствующем моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.5.2.

5.5.3. Переведите входы осциллографа в режим «Закрытые». Проведите курсорные измерения при положении курсорной линии, соответствующем моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов по пункту 5.5.3.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.5

По результатам измерения определите:

- значения напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока в исходной рабочей точке (точке покоя) $U_{зи(3)}, U_{си(3)}, I_{с(3)}$;
- средние значения (постоянные составляющие) напряжения сток–исток $U_{си-}$ и тока стока $I_{с-}$;

- минимальное (по модулю) значение напряжения сток–исток $U_{\text{си min}}$;
- амплитуду напряжения сток–исток $U_{\text{сим}} = E_c - U_{\text{си min}}$ и тока стока $I_{\text{см}}$;
- амплитуду первой гармоники тока стока $I_{\text{с1м}} \approx I_{\text{см}}/2$;
- разности средних и исходных значений напряжения сток–исток и тока стока: $\Delta U_{\text{си(3)}} = U_{\text{си}} - U_{\text{си(3)}}; \Delta I_{\text{с(3)}} = I_{\text{с}} - I_{\text{с(3)}}$;
- коэффициенты использования транзистора по напряжению и по току $\psi = I_{\text{с1м}}/I_{\text{с}}, \xi = U_{\text{сим}}/E_c$;
- мощность первой гармоники выходного сигнала $P_{\sim 1} = (I_{\text{с1м}})^2 R_c/2$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в динамическом режиме, $P_{\text{рас}} = I_{\text{с}} U_{\text{си}}$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в режиме покоя, $P_{\text{рас(3)}} = I_{\text{с(3)}} U_{\text{си(3)}}$;
- мощность, потребляемую от источника питания в динамическом режиме, $P_{\text{потр}} = I_{\text{с}} E_c$;
- мощность, потребляемую от источника питания в режиме покоя, $P_{\text{потр(3)}} = I_{\text{с(3)}} E_c$.

5.6. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада в режиме анимации при различных сопротивлениях нагрузки: $R_c = 100, 300, 600$ Ом.

5.6.1. Включите режим «Анимация». Выберите сопротивление нагрузки $R_c = 300$ Ом. Установите входы каналов осциллографа в положение «Закрытые». Задайте амплитуду входного сигнала $E_m = E_{m \text{ max}}/3$. Установите ЭДС смещения затвора $E_{з0} = (U_{\text{з.нач}} + U_{\text{з.кон}})/2$, соответствующую середине рабочего участка динамической ВАХ (рабочая точка 0).

Путем нажатия клавиши «Принять» выведите на экран осциллограммы напряжений, вычисленные по входному сигналу и ВАХ ПТ.

5.6.2. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения и сохранение результатов измерения (аналогично пункту 5.4.2).

5.6.3. Выберите сопротивление нагрузки $R_c = 600$ Ом. Увеличьте (по модулю) ЭДС источника питания цепи стока E_c до значения, при котором отображаемая на графиках измерителя ВАХ выходная динамическая характеристика (линия нагрузки) пройдет через ту же рабочую точку 0, что и при сопротивлении нагрузки $R_c = 300$ Ом.

Путем нажатия клавиши «Принять» выведите на экран осциллограммы напряжений, вычисленные по входному сигналу и ВАХ ПТ.

5.6.4. По осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения и сохранение результатов измерения (аналогично пункту 5.4.2).

5.6.5. Выберите сопротивление нагрузки $R_c = 100$ Ом. Уменьшите ЭДС источника питания цепи стока E_c до значения, при котором отображаемая на графиках измерителя ВАХ выходная динамическая характеристика (линия нагрузки) пройдет через ту же рабочую точку 0, что и при сопротивлении нагрузки $R_c = 300$ Ом.

Путем нажатия клавиши «Принять» выведите на экран осциллограммы напряжений, вычисленные по входному сигналу и ВАХ БТ.

5.6.6. По осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения и сохранение результатов измерения (аналогично пункту 5.4.2)¹.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.6

По результатам измерения для каждого из сопротивлений нагрузки $R_c = 100, 300, 600 \text{ Ом}$ определите:

- значения напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока в исходной рабочей точке (точке покоя) $U_{зи(0)}, U_{си(0)}, I_{с(0)}$;
- амплитуды напряжений затвор–исток, сток–исток и тока стока $U_{зи м}, U_{си м}, I_{с м}$;
- коэффициент передачи (усиления) по напряжению $K_U = U_{си м}/U_{зи м}$;
- динамическую крутизну $S = I_{с м}/U_{зи м}$.

Постройте графики зависимости коэффициента усиления K_U и динамической крутизны S от сопротивлений нагрузки R_c .

5.7. Аналогичным образом проведите измерения при другом значении ЭДС источника питания цепи стока E_c (в соответствии с индивидуальным вариантом).

5.8. По индивидуальному заданию проведите измерения для другого типа полевого транзистора. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип полевого транзистора. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.9. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию работы полевого транзистора на переменном токе.

6. Задание для исследования работы полевого транзистора на переменном токе с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы OrCad исследуйте осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках моделируемой схемы усилительного каскада с общим истоком при значениях параметров моделирования, соответствующих одному из пунктов 5.3–5.6 задания по его экспериментальному исследованию (по выбору или по индивидуальному заданию преподавателя).

При исходных данных на моделирование, соответствующих пункту 5.4.1 (исследование работы усилительного каскада в линейном режиме – режиме малых

¹ Если при исходном значении ЭДС источника питания цепи стока E_c в пункте 5.6.1 (равном 7,5 В или –7,5 В в зависимости от типа транзистора) не удастся установить одинаковый при разных сопротивлениях нагрузки режим работы транзистора по постоянному току, то значение E_c в пункте 5.6.1 нужно уменьшить (по модулю) до значения, при котором данное условие достигается. Можно также выбрать и другой, одинаковый при всех нагрузках режим работы транзистора по постоянному току. Необходимые значения ЭДС источника питания при разных сопротивлениях нагрузки можно найти предварительно с помощью динамических ВАХ, а затем уже выполнять измерения по пунктам 5.6.1–5.6.6.

сигналов), исследуйте осциллограммы напряжений и токов при значении частоты сигнала, близкой к предельной для данного полевого транзистора.

По индивидуальному заданию исследуйте влияние входной емкости полевого транзистора на его частотные свойства.

Сопоставьте результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования OrCad (параграф 4.1) и методиками исследования работы полевого транзистора на переменном токе, приведенными в параграфах 4.4.3, 4.4.5.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках и график зависимости тока стока от частоты.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

Сравните осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада на полевом транзисторе, полученные путем измерения и моделирования, отметьте наблюдаемые качественные и количественные отличия.

Оцените степень уменьшения коэффициента усиления каскада при значении частоты сигнала, близкой к предельной для данного полевого транзистора, и значение его входной емкости.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе Word.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых полевых транзисторов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;
- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и обработка по пунктам 5.3–5.6 экспериментального исследования усилительного каскада на полевом транзисторе;
- 4) результаты моделирования и обработки по пункту 6, включающие:
 - осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада, *график зависимости тока стока от частоты*;
 - наблюдаемые качественные и количественные отличия осциллограмм, полученных путем измерения и моделирования, их объяснение;
 - значения коэффициентов усиления каскада на низкой частоте сигнала и частоте, близкой к предельной для данного полевого транзистора, *значение его входной емкости*;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования работы полевого транзистора на переменном токе и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие возможны схемы включения полевых транзисторов?
2. Что такое динамические вольт-амперные характеристики усилительного каскада и как они строятся?
3. Что такое нагрузочная характеристика каскада, как она описывается и строится?
4. Как задается положение рабочей точки на нагрузочной характеристике?
5. На каком участке ВАХ необходимо выбирать рабочую точку полевого транзистора при использовании его для усиления электрических сигналов?
6. На каком участке ВАХ необходимо выбирать рабочую точку транзистора при использовании его в качестве резистора, управляемого напряжением?
7. Какие возможны режимы работы полевого транзистора в зависимости от положения исходной рабочей точки, в чем заключаются их особенности?
8. Как графически и аналитически определить коэффициент усиления каскада на полевом транзисторе?
9. Как графически определить амплитуды выходного напряжения и выходного тока усилительного каскада на полевом транзисторе при заданной амплитуде входного гармонического сигнала?
10. Что понимается под средней крутизной полевого транзистора при работе в режиме большого сигнала?
11. Как графически определить полезную выходную мощность усилительного каскада на полевом транзисторе при заданной амплитуде входного гармонического сигнала?
12. Как графически определить мощность, потребляемую от источника питания, и коэффициент полезного действия усилительного каскада на полевом транзисторе при заданной амплитуде входного гармонического сигнала?
13. Как зависит коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада на полевом транзисторе от значения тока покоя?
14. Как и почему зависит коэффициент усиления каскада на полевом транзисторе от частоты сигнала?
15. Какими параметрами определяются частотные свойства полевых транзисторов и как они учитываются в их математических моделях?
16. Как зависит коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада на полевом транзисторе от сопротивления нагрузки?
17. Что усиливают полевые транзисторы – напряжение или ток?
18. От чего возможны искажения формы сигналов в усилительном каскаде на полевом транзисторе?
19. Какие характерные области можно выделить на ВАХ полевых транзисторов?
20. Какие положения исходной рабочей точки на ВАХ соответствуют различным применениям полевых транзисторов? Приведите примеры.

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты лабораторной работы, приведенные в отчете.

Лабораторная работа № 10

Измерение и исследование ВАХ и параметров биполярных транзисторов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах биполярных транзисторов путем экспериментального исследования их с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относятся:

- освоение методов экспериментального ручного и автоматического измерений вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов и методов их исследования с помощью моделирования на ПЭВМ;
- измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ характеристик и параметров биполярных транзисторов разного типа, их сопоставление, физическое обоснование, анализ соответствия теоретически определяемым характеристикам и параметрам.

3. Краткие теоретические сведения

Полупроводниковый прибор, имеющий три электрода и два взаимодействующих между собой $p-n$ -перехода, называется *биполярным транзистором* [1]. Устройство, обозначение и включение биполярных транзисторов $n-p-n$ - и $p-n-p$ -типа показано на рис. 5.21.

Термин «биполярный транзистор» означает устройство, в котором используются носители заряда двух видов: электроны и дырки. Слово «транзистор» (от англ. *transfer resistor*) означает, что этот прибор согласует низкоомную входную цепь эмиттера с высокоомной выходной цепью коллектора, третий электрод – база является управляющим.

Основными материалами для изготовления биполярных транзисторов служат кремний, германий и арсенид галлия. По технологии изготовления они делятся на сплавные, диффузионные и эпитаксиальные.

Биполярные транзисторы – активные приборы, позволяющие усиливать, генерировать и преобразовывать электрические колебания в широком диапазоне частот и мощностей. В соответствии с этим их можно разделить на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (3–30 МГц), высокочастотные (30–300 МГц), сверхвысокочастотные (более 300 МГц). По мощности их можно разделить на маломощные (не более 0,3 Вт), средней мощности (0,3–1,5 Вт) и большой мощности (более 1,5 Вт).

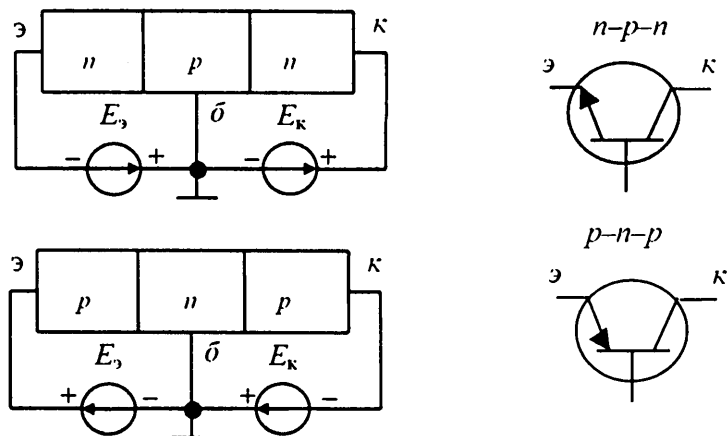


Рис. 5.21. Устройство, условное обозначение и включение биполярных транзисторов в активном режиме

В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общей точкой действия входного и выходного напряжений, различают три основные схемы включения БТ: схема с общим эмиттером, схема с общей базой и схема с общим коллектором, называемая также эмиттерным повторителем.

Принцип работы, характеристики и параметры биполярных транзисторов удобно рассматривать на примере широко используемой на практике схемы включения транзистора с общим эмиттером (рис. 5.22). Эта схема дает наибольшее усиление по току, напряжению и мощности [2]. На схеме показаны включенные в цепи базы источник питания E_b с резистором R_b для задания режима работы транзистора по постоянному току и источник питания E_k цепи коллектора с нагрузочным резистором R_k .

В зависимости от того, какие напряжения действуют на переходах, различают три режима работы транзистора:

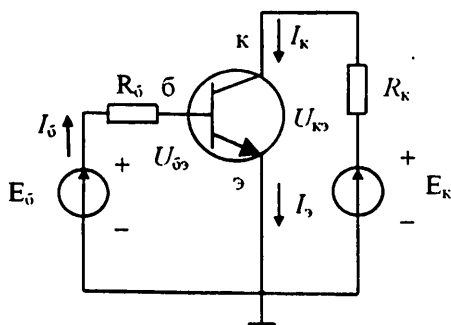


Рис. 5.22. Включение биполярного транзистора $n-p-p$ -типа по схеме с общим эмиттером

- 1) активный режим работы, или режим усиления, когда эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 2) режим насыщения, когда оба перехода смещены в прямом направлении;
- 3) режим отсечки, когда оба перехода смещены в обратном направлении.

Принцип работы биполярного транзистора заключается в том, что незначительный по величине ток базы I_b , возникающий при подаче прямого напряжения $U_{бэ}$ на переход эмиттер–база, вызывает значительные изменения тока эмиттера $I_э$ и тока коллектора $I_к$. Это обусловлено сильной инжекцией электронов из эмиттера, которые втягиваются полем обратно смещенного коллекторного перехода. Ток коллектора при этом определяется выражением

$$I_k = \beta_{ст} \cdot I_b, \quad (5.29)$$

где $\beta_{ст}$ – статический коэффициент передачи тока базы, значительно превышающий по величине единицу.

Ток коллектора I_k связан с напряжением на переходе база–эмиттер уравнением Эберса – Молла [3]:

$$I_k = I_{k0} (e^{U_{бэ}/\varphi_T} - 1), \quad (5.30)$$

где I_{k0} – обратный ток коллекторного перехода, φ_T – температурный потенциал, составляющий для кремния при температуре $T = 300$ К примерно 26 мВ.

Токи эмиттера, коллектора и базы транзистора связаны соотношением:

$$I_э = I_k + I_b.$$

Зависимость между входными и выходными токами и напряжениями в транзисторах определяется семействами *входных* и *выходных* статических вольт-амперных характеристик (рис. 5.23).

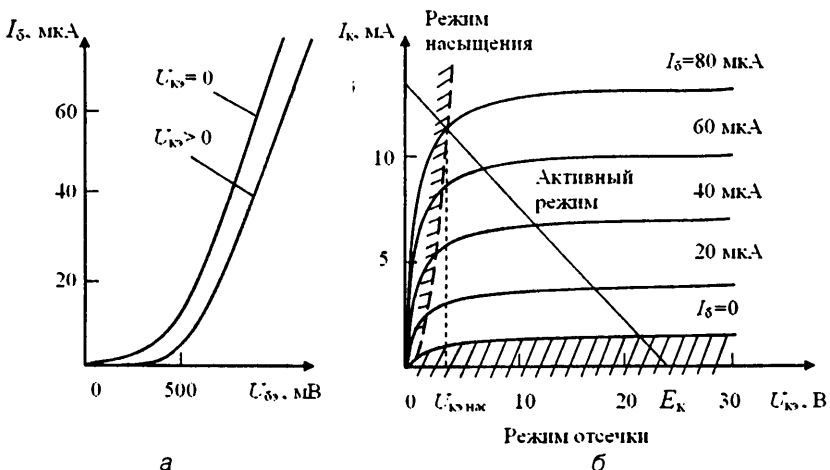


Рис. 5.23. Входные (а) и выходные (б) ВАХ биполярного транзистора p – n – p -типа в схеме с общим эмиттером

Входные характеристики $I_6 = f(U_{63})|U_{кз}$ (рис. 5.23а) снимаются при постоянных выходных напряжениях коллектор–эмиттер $U_{кз} = \text{const}$. При $U_{кз} = 0$ характеристика идет из начала координат, так как при отсутствии напряжения отсутствует и ток. При $U_{кз} > 0$ характеристика сдвигается вправо на величину так называемого порогового напряжения $U_{63, \text{пор}}$, различающегося у германиевых и кремниевых транзисторов.

Семейство выходных ВАХ $I_к = f(U_{кз})|I_6$ (рис. 5.23б) снимается при различных токах базы $I_6 = \text{const}$.

На вольт–амперных характеристиках выделены области, соответствующие работе транзистора в активном режиме, в режимах насыщения и отсечки.

Биполярные транзисторы (БТ) характеризуются большим числом различных параметров (статических, дифференциальных, физических) и соответствующих им физических эквивалентных схем и эквивалентных схем, основанных на представлении транзистора как линейного активного четырехполюсника. Одним из широко используемых на практике параметров БТ является определенный выше статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером $\beta_{ст}(1)$.

При представлении БТ как линейного активного четырехполюсника используются несколько систем характеристических параметров, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения измерения параметров и практического их использования в инженерных расчетах. Как правило, в справочных данных транзисторов приводятся значения так называемых смешанных h -параметров – h_{11} , h_{12} , h_{21} , h_{22} .

Параметр h_{11} в схеме с общим эмиттером определяется как отношение приращения входного напряжения база–эмиттер к вызвавшему его приращению тока базы при фиксированном значении напряжения коллектор–эмиттер:

$$h_{11} = (\Delta U_{63} / \Delta I_6) | U_{кз} = \text{const}. \quad (5.31)$$

Данный параметр имеет смысл и размерность *дифференциального входного сопротивления* транзистора в режиме малого сигнала.

Параметр h_{21} в схеме с общим эмиттером определяется как приращение тока коллектора к вызвавшему его приращению тока базы при фиксированном значении напряжения коллектор–эмиттер:

$$h_{21} = (\Delta I_к / \Delta I_6) | U_{кз} = \text{const}. \quad (5.32)$$

Параметр h_{21} называется *дифференциальным коэффициентом усиления транзистора по току*, или коэффициентом передачи по току. Значения дифференциального h_{21} и статического $\beta_{ст}$ коэффициентов усиления по току достаточно близки.

Параметр h_{12} в схеме с общим эмиттером определяется как отношение приращения напряжения база–эмиттер к вызвавшему его приращению напряжения коллектор–эмиттер при фиксированном значении тока базы:

$$h_{12} = (\Delta U_{63} / \Delta U_{кз}) | I_6 = \text{const}. \quad (5.33)$$

Он характеризует влияние выходной цепи транзистора на входную цепь вследствие имеющейся внутренней обратной связи между ними и называется *коэффициентом обратной связи по напряжению*.

Параметр h_{22} в схеме с общим эмиттером определяется как отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению напряжения коллектор–эмиттер при фиксированном значении тока базы:

$$h_{22} = (\Delta I_k / \Delta U_{кз}) | I_6 = \text{const}. \quad (5.34)$$

Он имеет смысл и размерность *дифференциальной выходной проводимости*, обратной выходному сопротивлению транзистора в режиме малого сигнала.

Указанные параметры биполярных транзисторов могут быть легко определены на основе их ВАХ.

В соответствии со схемой, изображенной на рис. 5.22, могут быть измерены и построены динамические входные и выходные характеристики каскада $I_k = f(U_{кз}) | E_k = \text{const}$, $I_6 = f(U_{бз}) | E_k = \text{const}$. Выходная динамическая характеристика описывается уравнением $I_k = (E_k - U_{кз}) / R_k$ и называется также нагрузочной прямой, или нагрузочной характеристикой (рис. 5.23б). Динамические характеристики используются для выбора режима работы транзистора по постоянному току и графического определения значений его токов и напряжений при приложении входного переменного напряжения или тока.

Используя соотношения между токами и напряжениями БТ в схемах включения с общим эмиттером и с общей базой: $I_3 = I_k + I_6$, $U_{к6} = U_{кз} - U_{бз}$, – можно по измеренным ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером построить его ВАХ в схеме включения с общей базой – входные $I_3 = f(U_{36}) | U_{к6} = \text{const}$ и выходные $I_k = f(U_{к6}) | I_3 = \text{const}$ – и определить соответствующие этой схеме включения h -параметры транзистора:

$$\begin{aligned} h_{11(об)} &= (\Delta U_{36} / \Delta I_3) | U_{к6} = \text{const}; & h_{21(об)} &= (\Delta I_k / \Delta I_3) | U_{к6} = \text{const}; \\ h_{12(об)} &= (\Delta U_{36} / \Delta U_{к6}) | I_3 = \text{const}; & h_{22(об)} &= (\Delta I_k / \Delta U_{к6}) | I_3 = \text{const}. \end{aligned}$$

К основным предельным параметрам БТ относятся максимально допустимое напряжение коллектор–эмиттер $U_{кз \max}$, максимальный постоянный ток коллектора $I_{к \max}$ и максимальная рассеиваемая мощность на коллекторе $P_{к \max}$. При определенных применениях БТ необходимо учитывать и предельно допустимое значение обратного напряжения перехода эмиттер–база $U_{б6 \max}$, также приводимое в справочных данных.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения по работе.

Ознакомиться с принципом работы и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом (АПК УД) «Электроника» при измерении вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе и получить вариант задания ее выполнения в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов

Необходимо с помощью средств АПК «Электроника» провести измерение входных и выходных ВАХ для БТ $p-n-p$ - и (или) $n-p-n$ -типа в ручном и автоматическом режимах для схем включения с общим эмиттером и общей базой (ОЭ, ОБ). Определить значения h -параметров БТ в заданных точках ВАХ с помощью расчетов и автоматических курсорных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Биполярный транзистор», лабораторную работу «Измерение и исследование ВАХ» и тип биполярного транзистора (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 4.12) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с приводимыми ниже заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. В ручном режиме измерения снимите статическую выходную характеристику БТ в схеме с ОЭ $I_k = f(U_{кэ})|I_6 = \text{const}$ при максимальном задаваемом значении тока базы $I_{6, \text{зад max}}$.

Измерение выходных статических ВАХ включает определение с помощью пробных измерений априорно неизвестного значения тока базы $I_{6, \text{зад max}}$, поиск соответствующих ему значений ЭДС E_6 при различных задаваемых значениях ЭДС E_k и проведение контрольных измерений при найденных значениях ЭДС E_6 и заданных значениях ЭДС E_k .

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.3.1. Выберите режим измерения «Ручной», вид выводимых характеристик «Выходные». Установите предельное (максимальное по модулю) значение ЭДС питания цепи коллектора $E_k = E_{k, \text{пред}}$. Для исследуемых БТ допустимыми являются предельные значения $E_{k, \text{пред}} = 10$ В (БТ $n-p-n$ -типа) и $E_{k, \text{пред}} = -10$ В (БТ $p-n-p$ -типа).

5.3.2. Установите значение ЭДС источника питания цепи базы $E_6 = 0$, проведите измерение и зафиксируйте измеренные значения I_6 , $U_{кэ}$, I_k , $U_{бэ}$ на цифровом и графическом индикаторах путем нажатия кнопки «Запись». В окне графики при этом отобразится точка с координатами $U_{кэ}$, I_k в соответствии с выбранным видом выводимой ВАХ.

5.3.3. Изменяя ЭДС в цепи базы от $E_{6, \text{нач}} = 0$ с некоторым шагом, проводите измерения и фиксируйте их результаты до достижения током коллектора заданного

предела измерения по току $I_{к.изм.пред}$ или до достижения ЭДС базы максимального по модулю значения $|E_{б.макс}| = 10$ В.

Запишите в рабочую тетрадь соответствующее этим условиям предельное значение ЭДС источника цепи базы $E_{б.предл}$ и максимальное значение тока базы $I_{б.макс}$.

5.3.4. Соедините точки в окне графики линией. Полученная ВАХ является динамической выходной характеристикой при включенном в цепи коллектора БТ сопротивлении нагрузки $R_k = 300$ Ом, которая описывается выражением $I_k = (E_k - U_{к0})/R_k$ (нагрузочная прямая).

5.3.5. Выполните еще раз измерение при установленных значениях $E_{б1} = E_{б.предл}$, $E_{к1} = E_{к.предл}$, определяющих первую точку измеряемой статической выходной ВАХ при $I_b = I_{б.макс}$, зафиксируйте результаты измерения. Установите значение ЭДС питания цепи коллектора $E_{к2} = E_{к.предл}/2$. Изменяя ЭДС E_b вблизи значения $E_{б1}$ и проводя пробные измерения (но не фиксируя их результаты), найдите значение ЭДС $E_{б2}$, при котором ток базы достаточно близок к значению $I_b = I_{б.макс}$. Зафиксируйте полученные при $E_{б2}$, $E_{к2}$ измеренные значения токов и напряжений БТ на цифровом и графическом индикаторах. Они определяют вторую точку измеряемой статической выходной ВАХ.

Аналогичным образом проведите измерения при других значениях ЭДС питания цепи коллектора в диапазоне от $E_k = 0$ до $E_{к.предл}$.

Соедините точки измеренной статической выходной ВАХ линией.

По *индивидуальному заданию* в ручном режиме могут быть измерены также статические выходные ВАХ при других значениях тока базы, например $I_b = I_{б.макс}/2$.

Сохраните для отчета копию лицевой панели виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и график измеренной статической выходной ВАХ (совместно с графиком измеренной динамической ВАХ).

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.3

В точке выходной статической ВАХ, соответствующей напряжению коллектор–эмиттер $U_{к0} = E_{к.предл}/2$, определите значения статического коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером $\beta_{ст} = I_k/I_b$, статического выходного сопротивления $R_{к.ст} = U_{к0}/I_k$ и динамического выходного сопротивления (параметра h_{22}) $r_{ид} = h_{22} = \Delta U_{к0}/\Delta I_k$.

5.4. В ручном режиме измерения снимите статические входные ВАХ БТ в схеме с ОЭ $I_b = f(U_{б0})|U_{к0}$ для двух значений напряжения коллектор–эмиттер $U_{к0}$: $U_{к0(1)} = 0$, $U_{к0(2)} = E_{к.предл}/2$ (для исследуемых БТ $U_{к0(2)} = 5$ В или $U_{к0(2)} = -5$ В в зависимости от типа).

Измерение входных статических ВАХ при заданном значении напряжения коллектор–эмиттер $U_{к0.зад} \neq 0$ включает поиск с помощью пробных измерений соответствующих этому напряжению значений ЭДС E_k при различных задаваемых значениях ЭДС E_b и проведение контрольных измерений при найденных значениях ЭДС E_k и заданных значениях ЭДС E_b .

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.4.1. Выберите режим измерения «Ручной», вид выводимых характеристик «Входные». Установите значение ЭДС питания цепи коллектора $E_k = 0$, при котором напряжение $U_{к0} = U_{к0(1)} = 0$.

5.4.2. Изменяя ЭДС в цепи базы от $E_{б,нач} = 0$ с некоторым шагом, проводите измерения и фиксируйте их результаты до достижения током коллектора заданного предела измерения по току $I_{к,изм,пред}$ или до достижения ЭДС базы максимального по модулю значения $|E_{б,макс}| = 10$ В.

Запишите в рабочую тетрадь соответствующие этому условию предельное значение ЭДС источника цепи базы $E_{б,пред2}$ и максимальное значение тока базы $I_{б,макс2}$.

Соедините точки в окне графики линией. Полученная ВАХ является входной статической характеристикой при $U_{кз} = U_{кз(1)} = 0$.

5.4.3. Установите значение ЭДС $E_{б1} = 0$, $E_{к1} = U_{кз(2)}$. Выполните измерение. Убедитесь в том, что измеренное значение напряжения коллектор–эмиттер $U_{кз}$ практически совпадает с заданным значением $U_{кз(2)}$. При наличии расхождения скорректируйте значение ЭДС $E_{к1}$. Зафиксируйте измеренные значения токов и напряжений, определяющие первую точку измеряемой статической выходной ВАХ при $U_{кз} = U_{кз(2)}$.

Установите значение ЭДС питания цепи базы $E_{б2} = E_{б,пред2}/4$. Изменяя значение ЭДС E_k и проводя пробные измерения (но не фиксируя их результаты), найдите значение ЭДС $E_{к2}$, при котором измеренное значение напряжения коллектор–эмиттер $U_{кз}$ практически совпадает с заданным значением $U_{кз(2)}$, при котором нужно измерить входную ВАХ. Зафиксируйте измеренные при $E_{б2}$, $E_{к2}$ значения токов и напряжений БТ на цифровом и графическом индикаторах. Они определяют вторую точку измеряемой статической выходной ВАХ.

Аналогичным образом проведите измерения при других значениях ЭДС питания цепи базы в диапазоне от $E_b = 0$ до предельного значения $E_{б,пред1}$, при котором ток коллектора достигает заданного предела измерения по току $I_{к,изм,пред}$ или ЭДС базы – максимального по модулю значения $|E_{б,макс}| = 10$ В (это может быть значение $E_{б,пред2}$, $E_{б,пред1}$ или другое, большее по модулю значение).

Соедините точки измеренной статической входной ВАХ линией.

Дополнительно проведите измерение динамической входной ВАХ $I_b = f(U_{бз})|E_k = \text{const}$ при включенном в цепи коллектора сопротивлении нагрузки $R_k = 300$ Ом, значении ЭДС питания цепи коллектора $E_k = E_{к,пред}$ и значениях ЭДС питания цепи базы, задаваемых в диапазоне от $E_b = 0$ до найденного выше предельного значения $E_{б,пред1}$.

Точки измеренной входной динамической ВАХ соедините линией.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и графики измеренных входных статических ВАХ (совместно с графиком динамической входной ВАХ).

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.4

По измеренным входным статическим ВАХ определите значения статического входного сопротивления $R_{вх,ст} = U_{бз}/I_b$ и дифференциального входного сопротивления $r_{вх,д} = \Delta U_{бз}/\Delta I_b$ (параметра $h_{11} = \Delta I_b/\Delta U_{бз}$) БТ при одинаковом среднем значении тока базы $I_b \approx I_{б,макс2}/2$.

5.5. Выполните измерение статических выходных и входных ВАХ биполярного транзистора в автоматическом режиме для схем включения с ОЭ и ОБ. Измерения проведите при начальных и конечных значениях ЭДС питания цепей коллек-

тора и базы $E_{к.нач}$, $E_{к.кон}$, $E_{б.нач}$, $E_{б.кон}$, соответствующих их значениям, найденным при ручных измерениях. Шаг изменения для ЭДС питания цепи коллектора dE_k можно принять равным 0,1 В, для ЭДС питания цепи базы $dE_b = 0,1$ В.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

5.5.1. Установите необходимые параметры автоматического измерения ВАХ. Проведите измерение. Проанализируйте автоматически выводимые характеристики $I_k = f(E_k)|E_b = \text{const}$ или $I_b = f(E_b)|E_k = \text{const}$ и параметры вывода ВАХ для схемы с ОЭ. По характеристикам и строке состояния проверьте, отличаются ли фактические значения параметров измерения от их заданных значений, объясните возможные причины отличия.

5.5.2. С помощью соответствующих клавиш выберите для вывода семейство выходных статических характеристик схемы с ОЭ. Путем подбора параметров вывода ограничьте число выводимых на экран характеристик исходя из удобства их анализа.

Выведите в окно графики совместно со статическими динамическую выходную ВАХ.

По верхней выводимой ВАХ, соответствующей значению тока базы $I_{б.кон}$, определите значения тока коллектора и напряжения коллектор–эмиттер в точке перегиба ВАХ, соответствующей переходу транзистора из активной области в область насыщения $I_{к.нас}$, $U_{кэ.нас}$.

Запишите значения $I_{к.нас}$, $U_{кэ.нас}$ в рабочую тетрадь.

Задание на проведение курсорных измерений по пункту 5.5.2.

Проведите курсорные измерения по выходным ВАХ, соответствующим (примерно) значениям тока базы $I_{б.кон}$, $I_{б.кон}/2$, $0,1I_{б.кон}$ при напряжении коллектор–эмиттер $U_{кэ} = E_{к.пред}/2$. Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения токов, напряжений и h -параметров h_{21} , h_{22} .

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики выходных характеристик БТ в схеме с ОЭ, измеренных в автоматическом режиме.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5.2

По результатам курсорных измерений постройте графики зависимости параметров транзистора в схеме с ОЭ h_{21} , h_{22} от тока коллектора.

5.5.3. С помощью соответствующих клавиш выберите для вывода семейство входных статических характеристик БТ в схеме с ОЭ. Подберите параметры вывода таким образом, чтобы в окне графики отображалось небольшое число измеренных характеристик, например три: при $U_{кэ(1)} = 0$, $U_{кэ(2)} = 0,1E_{к.пред}$, $U_{кэ(3)} = E_{к.пред}/2$.

Выведите в окно графики совместно со статическими входными ВАХ динамическую входную ВАХ.

По измеренным в автоматическом режиме входным статическим ВАХ определите приближенные значения порогового напряжения $U_{ба.пор}$, при котором ток базы практически равен нулю.

Запишите значения $U_{ба.пор}$ в рабочую тетрадь.

Задание на проведение курсорных измерений по пункту 5.5.3

Проведите курсорные измерения по входной статической ВАХ, соответствующей напряжению коллектор–эмиттер $U_{кэ(2)}$ (или $U_{кэ(3)}$), при значениях тока базы, равных $I_{б,кон}$, $I_{б,кон}/2$, $0,1I_{б,кон}$.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения токов, напряжений и h -параметров h_{11} , h_{12} .

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики входных характеристик БТ в схеме с ОЭ, измеренных в автоматическом режиме.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5.3

По результатам курсорных измерений постройте графики зависимости параметров транзистора в схеме с ОЭ h_{11} , h_{12} от тока базы.

5.5.4. С помощью соответствующих клавиш выберите для вывода семейство выходных статических характеристик схемы с ОБ. Путем подбора параметров вывода ограничьте число выводимых на экран характеристик исходя из удобства их анализа.

Определите значение прямого напряжения на переходе коллектор–база $U_{кб,прям}$ в точке пересечения оси напряжений верхней выводимой ВАХ, соответствующей значению тока эмиттера $I_{э,кон}$.

Запишите значение $U_{кб,прям}$ в рабочую тетрадь.

Задание на проведение курсорных измерений по пункту 5.5.4.

Проведите курсорные измерения по выходным ВАХ схемы с ОБ, соответствующим (примерно) значениям тока эмиттера $I_{э,кон}$, $I_{э,кон}/2$, $0,1I_{э,кон}$ при напряжении коллектор–база $U_{кб} = E_{к,пред}/2$. Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения токов, напряжений и h -параметров h_{21} , h_{22} .

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики выходных характеристик БТ в схеме с ОБ, измеренных в автоматическом режиме.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5.4

По результатам курсорных измерений постройте графики зависимости параметров транзистора в схеме с ОБ h_{21} , h_{22} от тока коллектора.

5.5.5. С помощью соответствующих клавиш выберите для вывода семейство входных статических характеристик БТ в схеме с ОБ. Подберите параметры вывода таким образом, чтобы в окне графики отображалось небольшое число измеренных характеристик, например три: при $U_{кб(1)} = 0$, $U_{кб(2)} = 0,1E_{к,пред}$, $U_{кб(3)} = E_{к,пред}/2$.

По измеренным в автоматическом режиме входным статическим ВАХ определите приближенные значения порогового напряжения $U_{эб,пор}$, при котором ток эмиттера практически равен нулю.

Запишите значения $U_{эб,пор}$ в рабочую тетрадь.

Задание на проведение курсорных измерений по пункту 5.5.5.

Проведите курсорные измерения по входной статической ВАХ, соответствующей напряжению коллектор–база $U_{кэ(2)}$, при значениях тока эмиттера, равных $I_{э,кон}$, $I_{э,кон}/2$, $0,1I_{э,кон}$.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения токов, напряжений и h -параметров h_{11} , h_{12} в схеме с ОБ.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики входных характеристик БТ в схеме с ОБ, измеренных в автоматическом режиме.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.5.5

По результатам курсорных измерений постройте графики зависимости параметров транзистора в схеме с ОБ h_{11} , h_{12} от тока эмиттера.

5.6. По индивидуальному заданию проведите измерения ВАХ для биполярного транзистора другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип биполярного транзистора. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.7. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов.

6. Задание для исследования вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы OrCAD по математической модели биполярного транзистора заданного типа (приложение 2) рассчитать его входные и выходные статические вольт-амперные характеристики при номинальном значении рабочей температуры $t_{ном}^0$ в диапазоне, ограниченном предельными значениями напряжений и токов транзистора $U_{бэ max}$, $U_{кэ max}$, $I_{б max}$, $I_{к max}$.

Рассчитать также входную и выходную статические характеристики, соответствующие фиксированному напряжению $U_{кэ}$ и фиксированному току базы I_b , при предельных для данного транзистора значениях температуры t_{min}^0 , t_{max}^0 (например, входную характеристику, соответствующую напряжению $|U_{кэ}| = 5$ В, и выходную характеристику, соответствующую току базы $I_b < I_{б max}$, при котором ток коллектора составляет 5–10 мА).

По индивидуальному заданию рассчитать зависимость коэффициента усиления транзистора по току от частоты в диапазоне, ограниченном ее предельным для данного транзистора значением.

Сопоставить результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования OrCAD (параграф 4.1) и методиками исследования вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов, приведенными в параграфах 4.5.1, 4.5.4, 4.5.5.

Сохраните для отчета:

- графики семейства ВАХ биполярного транзистора, рассчитанные для номинального значения температуры;
- графики входной и выходной ВАХ, рассчитанные для номинального и предельных значений температуры;
- график зависимости коэффициента усиления транзистора по току от частоты.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения напряжения база–эмиттер, тока базы и тока коллектора транзистора, вызванные изменением температуры транзистора.

Сравните качественно и количественно полученные путем измерения и моделирования ВАХ биполярного транзистора для номинального значения температуры.

Оцените степень уменьшения коэффициента усиления по току биполярного транзистора на соответствующей ему предельной частоте.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых полупроводниковых приборов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;
- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и их обработки по пункту 5, включающие:
 - показания цифрового индикатора ручных измерений и графики выходных характеристик, измеренных в ручном режиме (совместно с графиком динамической выходной ВАХ) (пункт 5.3);
 - найденные значения $E_{б.пред1}$ и максимального тока базы $I_{б.макс1}$ (пункт 5.3);
 - найденные значения параметров $\beta_{ст}$, $R_{и.ст}$ и h_{22} в заданной точке выходной статической ВАХ, измеренной в ручном режиме (пункт 5.3);
 - показания цифрового индикатора ручных измерений и графики измеренных в ручном режиме входных статических ВАХ (совместно с графиком динамической входной ВАХ) (пункт 5.4);
 - найденные значения $E_{б.пред2}$ и максимального тока базы $I_{б.макс2}$ (пункт 5.4);
 - найденные значения параметров $R_{вх.ст}$, h_{11} в заданных точках входных статических ВАХ, измеренных в ручном режиме (пункт 5.4);
 - показания цифровых индикаторов курсорных измерений и выводимые графики выходных характеристик БТ для схем включения с ОЭ, ОБ, измеренных в автоматическом режиме (пункт 5.5);
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и выводимые графики входных характеристик БТ для схем включения с ОЭ, ОБ, измеренных в автоматическом режиме (пункт 5.5);
 - значения $I_{к.нас}$, $U_{кз.нас}$, $U_{кб.прям}$, $U_{бэ.пор}$ и $U_{эб.пор}$ найденные по выходным и входным ВАХ, измеренным в автоматическом режиме (пункт 5.5);

- построенные по результатам курсорных измерений графики зависимости параметров транзистора h_{21} , h_{22} от тока коллектора для схем включения с ОЭ, ОБ (пункт 5.5);
 - построенные по результатам курсорных измерений графики зависимости параметров транзистора h_{11} , h_{12} от тока базы (схема с ОЭ) и тока эмиттера (схема с ОБ) (пункт 5.5);
- 4) результаты моделирования и их обработки по пункту 6, включающие:
- сохраненные для отчета графики статических ВАХ;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения напряжения база–эмиттер, токов базы и коллектора, вызванные изменением температуры;
 - степень уменьшения коэффициента усиления по току биполярного транзистора на соответствующей ему предельной частоте;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов ручных, автоматических измерений и моделирования на ПЭВМ и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие полупроводниковые приборы называются биполярными транзисторами?
2. Какие существуют виды биполярных транзисторов?
3. Чем управляются биполярные транзисторы – напряжением или током?
4. Каковы полярности напряжений питания биполярных транзисторов и чем они определяются?
5. Как устроен и работает биполярный транзистор $p-n-p$ -типа?
6. Как устроен и работает биполярный транзистор $n-p-n$ -типа?
7. В каком режиме работает $p-n$ -переход эмиттер–база биполярного транзистора?
8. В каком режиме работает $p-n$ -переход коллектор–база биполярного транзистора?
9. Как связаны между собой токи и напряжения биполярного транзистора?
10. Как определяются обратные токи биполярного транзистора?
11. Как определяются коэффициенты усиления биполярного транзистора в схеме с общей базой и общим эмиттером?
12. Какой вид имеют входные и выходные характеристики биполярного транзистора в схемах с общим эмиттером и общей базой?
13. Какими математическими уравнениями описываются ВАХ биполярных транзисторов?
14. Какие области можно выделить на вольт-амперных характеристиках биполярного транзистора?
15. В какой области ВАХ и как проявляются усилительные свойства биполярного транзистора?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты лабораторной работы, приведенные в отчете.

16. Как по вольт-амперным характеристикам биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, получить его характеристики в схеме с общей базой?
17. Как определяются границы между активной областью, областью насыщения и отсечки на ВАХ биполярного транзистора?
18. Как определяется пороговое напряжение на ВАХ биполярного транзистора и от чего оно зависит?
19. Как определяется напряжение насыщения (остаточное напряжение) на ВАХ биполярного транзистора и от чего оно зависит?
20. Как по ВАХ и заданному сопротивлению нагрузки найти графически коэффициенты усиления по току и напряжению каскада на БТ в заданной рабочей точке?
21. Какими параметрами характеризуются биполярные транзисторы?
22. Какие параметры и как определяются по вольт-амперным характеристикам БТ?
23. Что такое параметр h_{21} биполярного транзистора, как он определяется и от чего зависит?
24. Что такое параметр h_{22} биполярного транзистора, как он определяется и от чего зависит?
25. Что такое параметр h_{11} биполярного транзистора, как он определяется и от чего зависит?
26. Что такое параметр h_{12} биполярного транзистора, как он определяется и от чего зависит?
27. Как зависят параметры биполярного транзистора от режима его работы?
28. Как зависят ВАХ и параметры биполярного транзистора от температуры?
29. Какие модели и параметры используются для математического описания вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов?
30. Чем определяются частотные свойства биполярных транзисторов?
31. Какими параметрами учитываются частотные свойства биполярного транзистора в его математической модели?

Лабораторная работа № 11

Исследование технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о физических принципах работы и определяемых ими характеристиках и параметрах биполярных транзисторов путем экспериментального исследования их с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относится физическое измерение и исследование с помощью моделирования на ПЭВМ вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов разных типов и разных экземпляров транзисторов одного типа с целью их сопоставления и анализа причин расхождения, обусловленного несовершенством технологии.

3. Краткие теоретические сведения

Для изготовления биполярных транзисторов широко используются различные материалы и технологии. Основным полупроводниковым материалом для производства биполярных транзисторов в настоящее время остается кремний. Также применяются германий и арсенид галлия.

Кроме полупроводниковых материалов, используются различные диэлектрические соединения, проводящие материалы и сплавы, фоторезисты, органические и неорганические кислоты, щелочи и т. д.

Важнейшими этапами технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов являются выращивание и очистка полупроводниковых монокристаллов, механическая резка кристаллов на пластины, механическая и химическая полировка поверхности пластин. Полученные полупроводниковые пластины (подложки) являются исходным материалом для производства дискретных приборов и интегральных микросхем по *планарной технологии*. Сущность планарной технологии заключается в том, что в ходе технологического процесса обработке подвергается только одна поверхность полупроводниковой пластины, на которой в едином технологическом цикле групповым методом формируется множество приборов.

Для изготовления, например, биполярных транзисторов $n-p-n$ -типа одна сторона n -подложки дополнительно легируется, и получается так называемый n^+ – будущий коллектор. Затем под воздействием кислорода при высокой температуре поверхность кремния окисляется, образуя слой изолятора SiO_2 , который служит для защиты поверхности от воздействий внешней среды и проникновения примесей в ходе последующих этапов технологической обработки.

Для формирования структуры биполярного транзистора используется процесс *фотолитографии*. Для этого на поверхность со стороны n -слоя наносят слой светочувствительного фоторезиста, и с помощью фотошаблонов определенные участки засвечиваются и проявляются. Затем с помощью органических растворителей фоторезист удаляется с засвеченных мест и с открывшихся участков удаляется слой оксида, открывая доступ к n -слою. Через открывшиеся окна кремниевую пластинку подвергают воздействию паров борной кислоты. Бор диффундирует в n -кремний и создает слой с электропроводностью p -типа – базу будущего транзистора. Затем p -слой вновь покрывают защитной пленкой двуокиси кремния. Далее в пленке оксида методом фотолитографии над p -слоем снова создаются окна несколько меньшего размера и в атмосфере пятиокиси фосфора производят диффузию донорной примеси. В результате образуется n^+ -эмиттер. Затем эмит-

терный слой снова защищается пленкой двуокиси кремния. После этого над областями базы и эмиттера снова вскрываются окна и вакуумным термическим испарением наносятся металлические электроды базы и эмиттера и контактные площадки для подключения к внешним выводам транзистора.

После резки пластины на кристаллы, содержащие по одной транзисторной структуре, каждый из элементов устанавливается в корпус, при этом коллектор, как правило, припаивается к корпусу транзистора.

Следует отметить, что приведенные основные операции могут неоднократно повторяться и полный технологический цикл составляет десятки операций.

В ходе разработки, изготовления и эксплуатации полупроводниковых приборов и биполярных транзисторов, в частности, следует учитывать, что их характеристики и параметры могут иметь существенный технологический разброс.

Численное значение параметра прибора, установленное техническими условиями или государственным стандартом, называется *номинальным значением*, или *номиналом*. Номинальные значения параметров устанавливают, исходя из технологических возможностей производства и потребностей применения, на основе статистической обработки результатов испытаний опытных партий приборов [1].

В условиях производства не всегда удается обеспечить строгое соблюдение технологического процесса, и фактическое значение параметров отличается от номинального, то есть существует *технологический разброс параметров*. Обычно устанавливают максимально допустимое отклонение значений параметров от номинала. Его называют *допуском* и выражают либо в процентах, либо в крайних значениях параметра.

Разброс характеристик и параметров биполярных транзисторов одного типа обусловлен многими факторами, прежде всего это связано с технологией выращивания, очистки и обработки полупроводниковых кристаллов, а также последующими операциями изготовления приборов [2]. В любом реальном кристалле имеются химические примеси и нарушения кристаллической решетки, называемые дефектами структуры. У монокристаллов кремния, например, дефекты структуры приводят к радиальному разбросу величины удельного электрического сопротивления до 10–15%. В процессе изготовления приборов поверхность кристалла может быть также загрязнена самыми различными веществами, использованными при ее обработке (остатки кислот, щелочи, жировые пятна и т. п.). Все это приводит к разбросу характеристик и параметров готовых приборов. Например, в справочниках по полупроводниковым приборам приводится значение статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером $\beta = 70\text{--}140$ для биполярных транзисторов типа КТ 3107.

Для уменьшения технологического разброса параметров весь процесс изготовления полупроводниковых приборов должен основываться на использовании химических веществ высокой чистоты (99,999% содержания основного вещества) и осуществляться в так называемых «чистых помещениях». Чистота, однако, является лишь одним из условий, за которым следят на всех стадиях технологического процесса. Высокие требования предъявляются также и к геометрической точности шаблонов для фотолитографии. Жесткие требования предъявляются и к опе-

рациям локального травления и легирования приповерхностной области полупроводника.

Следует различать составляющие статистического разброса характеристик и параметров биполярных транзисторов, обусловленные технологией изготовления и измерениями.

Для полупроводниковых приборов в целом характерна сильная зависимость характеристик и параметров от температуры. Наиболее сильно проявляется воздействие температуры на характеристики и параметры биполярных транзисторов для схемы включения с общим эмиттером. Оно обусловлено сильной зависимостью начального тока коллектора от температуры. Это следует учитывать в ходе эксперимента и не превышать максимально допустимого значения тока коллектора, когда начинается сильный разогрев прибора.

Технологический разброс параметров биполярных транзисторов следует учитывать при разработке электронных устройств на их основе. Например, при использовании биполярного транзистора в качестве усилительного элемента в различных электронных схемах необходимо правильно задать режим по постоянному току. Для этого необходимо определить положение рабочей точки (РТ) на выходных $I_k = f(U_{кз})$ и входных $I_b = f(U_{бз})$ вольт-амперных характеристиках. На выходных ВАХ положение рабочей точки задается постоянным значением тока коллектора $I_{к(0)}$ и напряжением $U_{кз(0)}$ в режиме покоя при заданном токе базы $I_{б(0)}$, который выступает в качестве параметра. Технологический разброс значения статистического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером β приводит к разбросу начального тока коллектора и, как следствие, к неопределенности положения РТ. Это особенно критично при построении многокаскадных схем с гальванической межкаскадной связью.

Проблему увеличения коэффициента усиления транзисторов по току решают в ряде случаев схемотехнически путем каскадного включения двух и более транзисторов. Впервые такие схемы включения были предложены Дарлингтоном под названием «составной транзистор».

Уменьшить влияние технологического разброса можно также путем подбора транзисторов одного типа с необходимыми параметрами путем их измерения.

Наличие технологического разброса снижает качество электронных устройств, что должно учитываться при их разработке и сервисном обслуживании.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе.

Ознакомиться с принципом работы и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса «Электроника» при исследовании технологического разброса ВАХ биполярных транзисторов и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе и получить вариант задания ее выполнения в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов

Необходимо с помощью средств АПК УД «Электроника» в автоматическом режиме измерить статические входные и выходные ВАХ четырех однотипных биполярных транзисторов $p-n-p$ - и/или $n-p-n$ -типа. С помощью курсорных измерений в заданных точках ВАХ определить средние значения и максимальные относительные отклонения от средних значений для токов коллектора, токов базы и параметров h_{11} , $\beta_{ст}$ транзисторов, характеризующие их статистический разброс. Оценить долю статистического разброса ВАХ, обусловленную технологией изготовления транзисторов и погрешностями измерения путем проведения многократных измерений.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Биполярный транзистор», лабораторную работу – «Исследование технологического разброса» и тип биполярного транзистора (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 3.16) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь с лицевой панелью виртуального лабораторного стенда, с отображаемой на нем схемой измерения.

Проведите измерения в соответствии с приводимыми ниже заданиями (пунктами выполнения лабораторной работы).

5.3. Выполните измерение выходных ВАХ четырех однотипных биполярных транзисторов в автоматическом режиме. Измерения проведите при исходных параметрах автоматического измерения $E_{б,нач}$, $E_{б,кон}$, $E_{к,нач}$, $E_{к,кон}$, dE_b , dE_k , $I_{к,изм\ lim}$ (начальные, конечные значения и шаг изменения ЭДС источников питания цепей базы и коллектора и предельное измеряемое значение тока коллектора), выводимых по умолчанию. С помощью курсорных измерений по усредненным ВАХ, соответствующим трем значениям тока базы, определите при заданном напряжении коллектор–эмиттер средние значения и максимальные относительные отклонения от средних значений для токов коллектора I_k и статического коэффициента усиления по току $\beta_{ст}$, характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Ознакомьтесь с выведенными на лицевую панель по умолчанию параметрами автоматического измерения ВАХ. Подтвердите их нажатием клавиши «Принять». Проведите измерение. После успешного завершения измерения на графическом

индикаторе должны появиться отличающиеся цветом и типом линии графики четырех измеренных выходных ВАХ $I_k = f(U_{кз})/I_{б,нач}$ и ВАХ, полученной их усреднением, которые соответствуют автоматически определенному начальному значению тока базы $I_{б,нач}$.

Просмотрите выводимые характеристики при различных допустимых значениях параметра вывода ВАХ $I_{б,нач} - I_{б,кон}$. По характеристикам и строке состояния проверьте, отличаются ли фактические значения параметров измерения от заданных значений, объясните возможные причины расхождения.

Запишите в рабочую тетрадь предельные значения параметров вывода $I_{б,нач} - I_{б,кон}$.

Задание для проведения курсорных измерений

Установите максимальное (конечное) значение параметра вывода $I_b = I_{б,кон}$. Проведите курсорное измерение по усредненной выходной ВАХ при напряжении коллектор–эмиттер $U_{кз} = E_{к,пред}/2$, где $E_{к,пред}$ – предельное (максимальное по модулю) значение ЭДС питания цепи коллектора $E_k = E_{к,пред}$. Для исследуемых БТ допустимыми являются предельные значения $E_{к,пред} = 10$ В (БТ $n-p-n$ -типа) и $E_{к,пред} = -10$ В (БТ $p-n-p$ -типа).

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения тока базы I_b , напряжения коллектор–эмиттер $U_{кз}$, среднее по четырем БТ значение тока коллектора $I_{к,ср}$, относительное отклонение токов коллектора БТ от среднего dI_k , %, среднее по четырем БТ значение параметра $b_{ст,ср}$ и максимальное относительное отклонение значений параметра $b_{ст}$ от среднего $db_{ст}$, %.

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда, показания цифрового индикатора и выводимые графики измеренных выходных характеристик.

Повторите курсорные измерения и сохраните их результаты при значениях параметра вывода: $I_b = I_{б,кон}/2$ и $I_b = I_{б,нач}$.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.3

По результатам курсорных измерений постройте графики зависимости среднего значения параметра транзистора $b_{ст,ср}$ от тока коллектора.

5.4. Измерение входных характеристик биполярных транзисторов и их статистического разброса.

Задание для измерения. Выведите в окно графики входные ВАХ четырех однотипных БТ, измеренные автоматически совместно с выходными ВАХ. Проведите курсорные измерения в трех точках усредненных входных характеристик, соответствующих напряжениям коллектор–эмиттер $U_{кз} = 0$, $U_{кз} = E_{к,пред}/2$, определите средние значения и максимальные относительного отклонения от средних значений для токов базы и входного сопротивления (параметра h_{11}), характеризующие их статистический разброс.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

С помощью кнопки «Входные» выведите на экран графики четырех измеренных входных ВАХ $I_b = f(U_{бз})/U_{кз}$ и ВАХ, полученной их усреднением, которые отли-

чаются цветом и типом линии. Просмотрите выводимые характеристики при различных допустимых значениях параметра вывода ВАХ $U_{кз.нач} - U_{кз.кон}$.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения относительно усредненной входной ВАХ, соответствующей напряжению коллектор–эмиттер $U_{кз} = 0$ при значениях тока базы, равных $I_{б.кон}$, $I_{б.кон}/2$, $I_{б.нач}$, найденных в пункте 5.3.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора измеренные в точках ВАХ значения напряжения коллектор–эмиттер $U_{кз}$, напряжения база–эмиттер $U_{бэ}$, среднее по четырем БТ значение тока базы $I_{б.ср}$, максимальное относительное отклонение токов базы БТ от среднего dI_b , %, среднее по четырем БТ значение параметра $h_{11ср}$ и максимальное относительное отклонение значений параметра h_{11} от среднего dh_{11} , %.

Сохраните для отчета показания цифрового индикатора и выводимые графики входных характеристик БТ, измеренных в автоматическом режиме.

Повторите курсорные измерения и сохраните их результаты при значениях параметра вывода $U_{кз} = E_{к.пред}/2$.

Задание для обработки результатов измерения по пункту 5.4

По результатам курсорных измерений постройте графики зависимости среднего значения параметра транзистора $h_{11ср}$ от тока базы для двух значений напряжения коллектор–эмиттер.

5.5. Оцените влияние случайной погрешности при измерении технологического разброса ВАХ.

Задание для измерения. Выполните повторно измерение выходных и входных ВАХ четырех однотипных биполярных транзисторов при тех же исходных параметрах автоматического измерения, что и в пункте 5.3. С помощью курсорных измерений в тех же точках усредненных ВАХ определите средние значения и максимальные отклонения от средних значений для токов коллектора, базы, входного сопротивления и коэффициента усиления по току, характеризующие их статистический разброс. Сравните их с измеренными значениями в пунктах 5.3, 5.4 лабораторной работы.

Указания по проведению измерений и сохранению полученных результатов

Не изменяя параметров автоматического измерения пункта 5.3, проведите повторное измерение выходных и входных ВАХ четырех однотипных биполярных транзисторов.

Задание для проведения курсорных измерений

Проведите курсорные измерения в тех же точках усредненной выходной и входной ВАХ биполярных транзисторов, что и в пунктах 5.3, 5.4 данной лабораторной работы.

Зафиксируйте в памяти цифрового индикатора результаты курсорных измерений, включающие значения тока базы I_b , напряжений коллектор–эмиттер $U_{кз}$ и база–эмиттер $U_{бэ}$, средних значений и максимальных относительных отклонений

токов базы $I_{б,ср}$, $dI_{б}$, %, коллектора $I_{к,ср}$, $dI_{к}$, % и параметров – коэффициентов усиления по току $\beta_{ст,ср}$, $d\beta_{ст}$, % и входного сопротивления $h_{11,ср}$, dh_{11} , %.

Физические и курсорные измерения можно провести многократно и усреднить их результаты.

Сохраните для отчета показания цифровых индикаторов и измеренные графики выходных и входных характеристик БТ.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.5

На основе сравнения результатов измерения статистического разброса ВАХ и параметров биполярных транзисторов по пунктам 5.3, 5.4, 5.5 данной лабораторной работы сделайте выводы о доле случайной составляющей погрешности измерения в получаемых оценках технологического разброса ВАХ и о возможности уменьшения ее путем усреднения результатов многократных измерений.

5.6. По *индивидуальному заданию* проведите измерения ВАХ для биполярного транзистора другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберите нужный тип биполярного транзистора. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.7. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию технологического разброса вольт-амперных характеристик и параметров биполярных транзисторов.

6. Задание по исследованию технологического разброса вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы *OrCAD* по математической модели исследуемого биполярного транзистора (приложение 2) рассчитать вольт-амперные характеристики четырех однотипных биполярных транзисторов при заданном технологическом разбросе параметра модели $\beta_{ТА}$ (коэффициент усиления по току транзистора), равном 10%, и номинальном значении температуры. Расчет характеристик провести при фиксированных значениях напряжения $|U_{кз}| = 5$ В для входной ВАХ и тока базы $I_{б} < I_{б\max}$ для выходной ВАХ в диапазоне, ограниченном предельными значениями напряжений и токов транзистора $U_{бэ\max}$, $U_{кз\max}$, $I_{б\max}$, $I_{к\max}$.

Сопоставить результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования технологического разброса вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов, приведенными в параграфе 4.5.2.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования графики входных и выходных ВАХ транзисторов с учетом их технологического разброса.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

По результатам моделирования рассчитайте максимальные абсолютные и относительные изменения тока коллектора при фиксированном токе базы I_b и тока базы при фиксированном напряжении эмиттер–коллектор $U_{кэ}$ у биполярных транзисторов одного типа, которые вызваны технологическим разбросом их вольт-амперных характеристик.

Сравните качественно и количественно результаты измерения и моделирования технологического разброса ВАХ биполярных транзисторов.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых биполярных транзисторов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;
- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и обработки по пункту 5, включающие:
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных выходных характеристик БТ (пункт 5.3);
 - построенные по результатам курсорных измерений графики зависимости среднего значения параметра транзистора $\beta_{ст.ср}$ от тока коллектора;
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных входных характеристик БТ (пункт 5.4);
 - построенные по результатам курсорных измерений графики зависимости среднего значения параметра транзистора $h_{1ср}$ от тока базы для двух значений напряжения коллектор–эмиттер;
 - показания цифрового индикатора курсорных измерений и графики измеренных выходных и входных ВАХ БТ; выводы о влиянии случайной погрешности измерения на оценку технологического разброса ВАХ БТ на различных участках измеренных ВАХ (пункт 5.5);
- 4) результаты моделирования и обработки по пункту 6, включающие:
 - графики входных и выходных ВАХ транзисторов с учетом их технологического разброса;
 - максимальные абсолютные и относительные изменения тока базы и тока коллектора биполярных транзисторов одного типа, вызванные технологическим разбросом их вольт-амперных характеристик;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования технологического разброса ВАХ и параметров биполярных транзисторов и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие материалы и технологии используются при изготовлении биполярных транзисторов?
2. Как взаимосвязаны ВАХ и параметры биполярных транзисторов с материалами и технологиями, которые используются в их производстве?
3. Что понимается под технологическим разбросом ВАХ и параметров биполярных транзисторов?
4. Какова физическая природа технологического разброса ВАХ и параметров у биполярных транзисторов одного типа?
5. Как проявляется технологический разброс на ВАХ и параметрах исследуемых однотипных транзисторов?
6. С помощью каких технологических приемов и методов достигается уменьшение технологического разброса ВАХ транзисторов?
8. Как разделить составляющие статистического разброса, обусловленные технологией и измерениями?
9. Какие параметры технологического разброса приводятся в справочных данных биполярных транзисторов? Приведите примеры.
10. Как учитывается в математических моделях биполярных транзисторов технологический разброс их параметров?
11. Как проявляется технологический разброс ВАХ и параметров биполярных транзисторов в электронных схемах? Приведите примеры.
12. Какими методами достигается уменьшение влияния технологического разброса ВАХ биполярных транзисторов на характеристики качества электронных устройств на их основе?
13. Каковы особенности технологического разброса у интегральных биполярных транзисторов, изготовленных на одном кристалле?

Лабораторная работа № 12

Исследование работы биполярного транзистора на переменном токе

1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических знаний о характеристиках, параметрах и применениях биполярных транзисторов путем экспериментального их исследования с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» и моделирования на ПЭВМ.

¹ Отвечая на контрольные вопросы, необходимо использовать относящиеся к ним результаты лабораторной работы, приведенные в отчете.

2. Задачи лабораторной работы

К задачам лабораторной работы относится изучение работы биполярного транзистора в динамическом режиме путем физического измерения и исследования с помощью моделирования на ПЭВМ осциллограмм напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада и их обоснования посредством вольт-амперных характеристик биполярного транзистора.

3. Краткие теоретические сведения

Биполярные транзисторы (БТ) применяются для усиления электрических сигналов. В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общей точкой действия входного и выходного напряжений, различают три схемы включения БТ: схема с общим эмиттером (ОЭ), схема с общей базой (ОБ) и схема с общим коллектором (ОК), называемая также эмиттерным повторителем. Наибольшее распространение для усиления сигналов переменного тока получила схема с общим эмиттером [1]. На рис. 5.24 приведена схема резистивного усилительного каскада с ОЭ на основе БТ $n-p-n$ -типа.

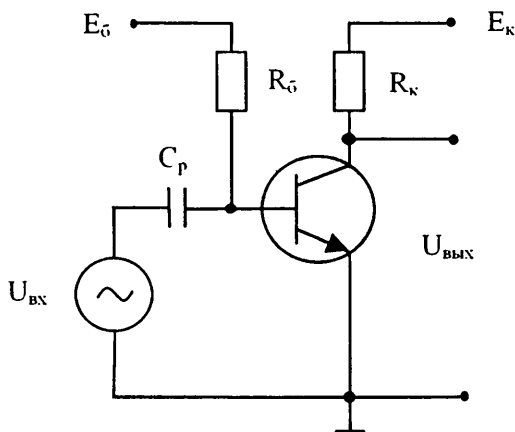


Рис. 5.24. Типовая схема усилительного каскада с общим эмиттером

Кроме активного элемента (БТ), схема содержит источник питания цепи коллектора E_k , источник смещения цепи базы E_b , резистор нагрузки R_k , резистор смещения R_b и конденсатор C_p , разделяющий входные цепи постоянного и переменного тока. Через разделительный конденсатор ко входу каскада подключается источник усиливаемого переменного напряжения $U_{вх}$. В практических схемах используются различные способы задания смещения, в том числе от общего источника питания E_k , различные способы термостабилизации режима работы и связи с источником сигнала, в том числе гальванической. В схеме усиления активный

элемент, управляемый входным током, преобразует энергию источника питания в энергию полезных усиливаемых сигналов, выделяемых на сопротивлении нагрузки.

Каскад с общим эмиттером дает большое усиление по току, по напряжению и мощности и инвертирует фазу сигнала.

Наглядное представление об усилительных свойствах биполярного транзистора дает графоаналитический метод расчета и анализа усилительных каскадов [2]. Графоаналитический метод позволяет определить переменные составляющие токов и напряжений транзистора с учетом его нелинейных свойств, выбрать и задать необходимый режим работы транзистора по постоянному току. Он основывается на использовании семейств статических входных и выходных характеристик транзистора (рис. 5.25).

При этом на семействе статических выходных характеристик (рис. 5.25а) строится динамическая выходная характеристика, называемая также линией нагрузки, или нагрузочной характеристикой.

Она устанавливает связь между током коллектора I_k и напряжением коллектор–эмиттер $U_{кэ}$ транзистора при заданном сопротивлении нагрузки R_k и ЭДС (напряжении) источника питания E_k :

$$I_k = (E_k - U_{кэ})/R_k. \quad (5.35)$$

Построение линии нагрузки производится по точкам ее пересечения с осями координат. При $I_k = 0$ получаем $U_{кэ} = E_k$, откладываем на оси напряжений значение E_k , получаем точку М. При $U_{кэ} = 0$ получаем $I_k = E_k/R_k$, откладываем это значение по оси токов, получаем точку N. Соединяя эти точки прямой, получаем линию нагрузки. Затем на ней выбираем рабочий участок. Например, для получения большой выходной мощности и малых искажений сигнала следует взять рабочий участок АБ. По проекциям рабочего участка на оси координат определяем двойные амплитуды первых гармоник переменных составляющих выходного напряжения $2U_{кэ м}$ и выходного тока $2I_{к т}$. После этого можно найти выходную мощность:

$$P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_{к т} \cdot U_{кэ м}. \quad (5.36)$$

На рис. 5.25а заштрихован так называемый *треугольник полезной мощности*. Его гипотенузой является рабочий участок АБ, а катетами – соответственно двойные амплитуды тока $2I_{к т}$ и напряжения $2U_{кэ м}$. Нетрудно вычислить, что площадь треугольника соответствует учетверенной полезной мощности $2I_{к т} \cdot U_{кэ м}$. В этом случае рабочая точка Т на линии нагрузки соответствует току базы $I_{б(0)}$, среднему по отношению к токам базы в точках А и Б. Рабочая точка Т определяет амплитуду первой гармоники входного тока $I_{б м}$ как половину разности токов базы, соответствующих точкам А и Б. Проекции рабочей точки на оси координат определяют постоянное значение тока коллектора $I_{к(0)}$ и напряжения $U_{кэ(0)}$ в режиме покоя.

Если имеется семейство входных характеристик транзистора, то можно построить входную динамическую характеристику путем перенесения на это семейство точек выходной динамической характеристики. На эту характеристику переносятся точки А, Т и Б и получаются точки A_1 , T_1 и B_1 (рис. 5.25б). Проекция рабочего участка A_1B_1 на ось напряжений дает двойную амплитуду входного на-

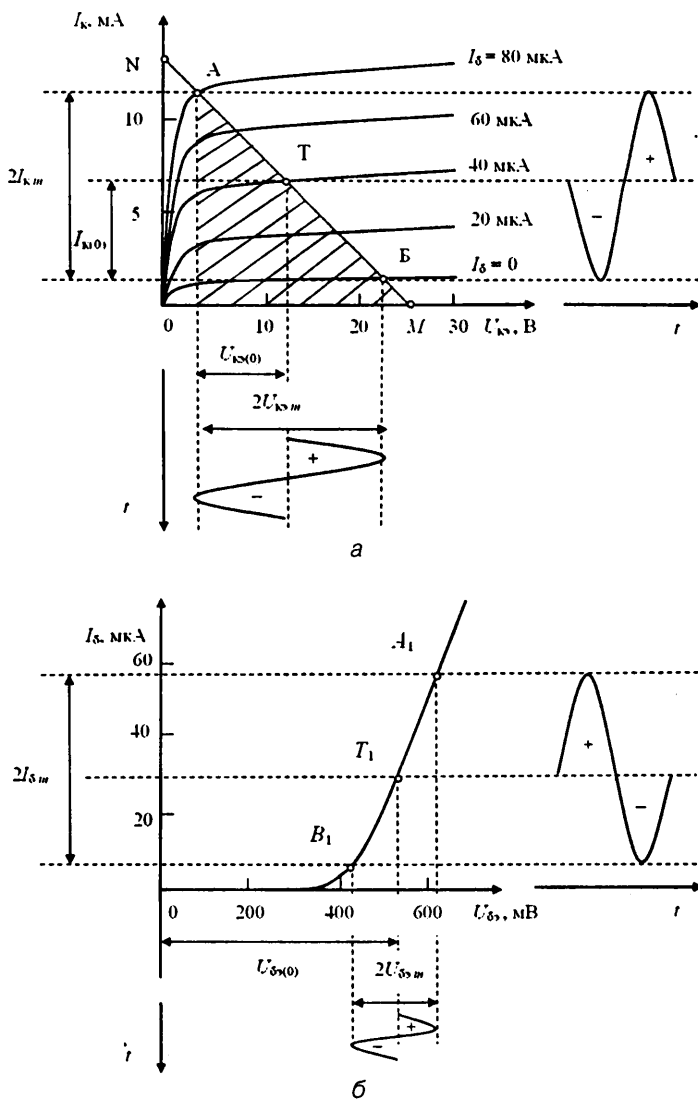


Рис. 5.25. К графоаналитическому методу расчета и анализа усилительного каскада на биполярном транзисторе

пряжения $2U_{Bm}$. Зная I_{Bm} и $U_{B(0)}$, можно рассчитать входное сопротивление $R_{вх}$ и входную мощность по формулам

$$R_{вх} = U_{B(0)} / I_{Bm}, \quad (5.37)$$

$$P_{вх} = 0,5 \cdot I_{Bm} \cdot U_{B(0)}. \quad (5.38)$$

Рабочая точка T_1 определяет также постоянное напряжение базы $U_{бэ(0)}$. Считая, что постоянная составляющая тока базы в режиме усиления равна $I_{б(0)}$, можно рассчитать сопротивление резистора смещения в цепи базы R_6 , через который от источника E_6 подается постоянное напряжение на базу:

$$R_6 = (E_6 - U_{бэ(0)})/I_{б(0)}. \quad (5.39)$$

Коэффициенты усиления каскада по напряжению, току и мощности можно рассчитать в соответствии с их определениями:

$$K_I = I_{к т}/I_{б т}; K_U = U_{к э т}/U_{б э т}; K_P = K_I \cdot K_U. \quad (5.40)$$

Биполярные транзисторы могут работать как в активной области ВАХ без отсечки тока (в режиме А), так и в активной области с отсечкой тока (например, в режиме В). При работе в ключевом режиме используется также область насыщения ВАХ.

4. Задание для подготовки к работе

Ознакомиться с целями, задачами и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения.

Ознакомиться с принципом работы, измерительными возможностями и техническими характеристиками аппаратно-программного комплекса при исследовании работы биполярного транзистора на переменном токе и с технологией исследования полупроводниковых приборов посредством моделирования на ПЭВМ.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к работе и получить *вариант задания* ее выполнения в соответствии с приложением 4.

5. Задание для экспериментального исследования работы биполярного транзистора на переменном токе

С помощью средств АПК УД «Электроника» измерить осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада на биполярном транзисторе для разных режимов работы транзистора, значений амплитуды и частоты сигнала, сопротивлений нагрузки и ЭДС источника питания. Обосновать результаты измерения посредством ВАХ транзистора; определить коэффициенты передачи и энергетические характеристики каскада по данным измерения.

Порядок выполнения задания

5.1. Выполните соединение с сервером с титульного экрана аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» (рис. 3.7), нажав клавишу «Подключение».

Выберите исследуемый прибор – «Биполярный транзистор», лабораторную работу – «Исследование работы прибора на переменном токе» и тип биполярного транзистора (рис. 3.8).

Откройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Начать выполнение».

На открывшейся лицевой панели (рис. 4.20) укажите номер индивидуального варианта.

5.2. Ознакомьтесь по лицевой панели стенда со схемой исследуемого каскада на биполярном транзисторе, с лицевыми панелями измерителя ВАХ и цифрового осциллографа, со схемой подключения каналов осциллографа, с параметрами источников постоянной и переменной ЭДС, с их выводимыми по умолчанию значениями.

5.3. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада, соответствующих работе биполярного транзистора в режиме большого сигнала без насыщения и отсечки тока (в режиме А).

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.3.1. Проведите измерение ВАХ БТ, нажав кнопку включения автоматического измерителя ВАХ. При успешном завершении измерения ознакомьтесь с выведенными графиками измеренных статических и динамических входных и выходных ВАХ.

Установите значение ЭДС источника питания цепи коллектора $E_k = 7,5$ В для БТ $n-p-n$ -типа и $E_k = -7,5$ В для БТ $p-n-p$ -типа.

Установите амплитуду ЭДС источника переменной составляющей сигнала в цепи базы $E_m = 0$.

Изменяя ЭДС источника смещения цепи базы E_0 , по графикам ВАХ и показаниям цифровых индикаторов измерителя ВАХ определите по току базы $I_{б.нач}$, $I_{б.кон}$ и напряжению база–эмиттер $U_{бэ.нач}$, $U_{бэ.кон}$ начальную (нижнюю) и конечную (верхнюю) границы рабочего участка, соответствующие работе БТ в активной области (без насыщения и отсечки тока).

Запишите в рабочую тетрадь соответствующие границам рабочего участка значения ЭДС источника смещения цепи базы $E_{б.нач}$, $E_{б.кон}$.

Найдите и установите значение ЭДС источника $E_0 = E_{0(0)}$, которому на графиках ВАХ соответствует значение тока базы в середине рабочего участка ВАХ $I_{б(0)} = (I_{б.нач} + I_{б.кон})/2$, которое определяет положение исходной рабочей точки (рабочая точка 0).

Запишите в рабочую тетрадь выводимые на цифровые индикаторы измерителя ВАХ значения токов и напряжений БТ в рабочей точке $I_{б(0)}$, $U_{бэ(0)}$, $I_{к(0)}$, $U_{кэ(0)}$.

Проверьте в рабочей тетради соответствие полученных данных уравнению Кирхгофа для входной и выходной цепей: $E_0 = U_{бэ} + I_{б}R_б$, $E_k = U_{кэ} + I_{к}R_к$.

Задайте соответствующую рабочему участку максимальную амплитуду ЭДС источника переменной (гармонической) составляющей в цепи базы $E_{m \max}$ (амплитуду входного сигнала), равную $|E_{б.кон} - E_{б.нач}|/2$. Частоту гармонического сигнала оставьте равной значению, выводимому по умолчанию.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

При успешном завершении измерения на экран выводятся измеренные осциллограммы входной ЭДС $E_0 = E_{0(0)} + E_0$ (канал 1, точки Т1, Т5), падения напряжения $U_{R_б} = I_{б}R_б$ на резисторе $R_б$ (канал 2, точки Т2, Т1), напряжения база–эмиттер $U_{бэ}$ (канал 3, точки Т2, Т5), напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ}$ (канал 4, точки

ТЗ, Т5) и падения напряжения $U_{R_k} = I_k R_k$ на сопротивлении нагрузки R_k (канал 5, точки Т4, ТЗ), при этом осциллограммы каналов 2, 5 пропорциональны изменениям во времени токов базы I_b и коллектора I_k БТ.

Мгновенные значения напряжений и токов БТ отображаются также на графиках входной и выходной динамических ВАХ измерителя ВАХ.

Подберите удобное для анализа и проведения курсорных измерений число периодов развертки сигналов осциллографа, равное, например, одному периоду.

Определите по осциллограммам, каким является усилительный каскад – инвертирующим или неинвертирующим, а также в каком соотношении находятся фазы напряжения коллектор–эмиттер и тока коллектора.

5.3.2. Проведите курсорные измерения по выведенным осциллограммам напряжений. Перемещая курсорную линию вдоль осциллограмм и контролируя показания связанных с нею цифровых индикаторов мгновенных значений напряжений, найдите ближайшее положение линии, при котором осциллограммы напряжений на входах каналов осциллографа принимают свои экстремальные (максимальные или минимальные) значения. Это положение соответствует моменту времени t_1 , равному $1/4$ периода сигнала T .

Сохраните для отчета лицевую панель виртуального лабораторного стенда. Сохраните измеренные ВАХ и осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.3.2.

5.3.3. Не изменяя положения курсорной линии, переведите входы каналов осциллографа в режим «Закрытые».

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов по пункту 5.3.3, необходимые для определения постоянных составляющих токов и напряжений.

5.3.4. Перемещая далее курсорную линию вдоль осциллограмм и контролируя показания курсорных индикаторов напряжений, найдите второе положение линии, при котором осциллограммы напряжений на входах каналов также принимают экстремальные (но противоположные предыдущему) значения. Это положение соответствует моменту времени t_2 , равному $3/4$ периода сигнала T .

Сохраните для отчета измеренные ВАХ и осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.3.4.

5.3.5. Не изменяя положения курсорной линии, переведите входы каналов осциллографа в режим «Закрытые».

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов по пункту 5.3.5, необходимые для определения постоянных составляющих токов и напряжений¹.

¹ Постоянная составляющая тока I_* или напряжения U_* определяется как разность измеренных по осциллограмме значений тока или напряжения при открытых и закрытых входах каналов осциллографа, соответствующих одному и тому же моменту времени (t_1 или t_2). При определении I_* , U_* по двум моментам времени их значения $I_{-(1)}$, $I_{-(2)}$, $U_{-(1)}$, $U_{-(2)}$, полученные в моменты времени t_1 , t_2 , необходимо усреднить: $I_* = (I_{-(1)} + I_{-(2)})/2$, $U_* = (U_{-(1)} + U_{-(2)})/2$.

5.3.6. Переведите входы каналов осциллографа в режим «Открытые». Установите амплитуду переменной составляющей ЭДС E_m (амплитуду входного сигнала) равной нулю ($E_m = 0$).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы¹.

При успешном завершении измерения сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.3.6.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.3

По результатам измерения определите:

- значения тока базы $I_{б(0)}$, тока коллектора $I_{к(0)}$ и напряжений база–эмиттер $U_{бэ(0)}$ и коллектор–эмиттер $U_{кэ(0)}$ в исходной рабочей точке (точке покоя);
- средние значения (постоянные составляющие) напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ-}$ и тока коллектора $I_{к-}$, напряжения база–эмиттер $U_{бэ-}$ и тока базы $I_{б-}$ (по разности значений токов или напряжений в заданной точке осциллограммы при открытых и закрытых входах осциллографа, см. примечание к пункту 5.3.5);
- амплитуды напряжений база–эмиттер $U_{бэ м}$, коллектор–эмиттер $U_{кэ м}$ и тока базы $I_{б м}$, тока коллектора $I_{к м}$ (по размаху соответствующих им осциллограмм);
- коэффициент передачи (усиления) по напряжению $K_U = U_{кэ м}/U_{бэ м}$;
- коэффициент передачи (усиления) по току $K_I = I_{к м}/I_{б м}$;
- среднюю крутизну $S_{(0)} = I_{к м}/U_{бэ м}$;
- входное сопротивление $R_{вх} = U_{бэ м}/I_{б м}$;
- разности средних и исходных значений тока базы, тока коллектора и напряжений база–эмиттер и коллектор–эмиттер: $\Delta U_{бэ(0)} = U_{бэ-} - U_{бэ(0)}$; $\Delta U_{кэ(0)} = U_{кэ-} - U_{кэ(0)}$; $\Delta I_{б(0)} = I_{б-} - I_{б(0)}$; $\Delta I_{к(0)} = I_{к-} - I_{к(0)}$;
- мощность переменной составляющей выходного сигнала $P_{\sim} = (I_{к м} U_{кэ м})/2$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в динамическом режиме, $P_{к.рас-} = I_{к-} U_{кэ-}$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в режиме покоя, $P_{к.рас.(0)} = I_{к(0)} U_{кэ(0)}$;
- мощность, потребляемую от источника питания в динамическом режиме, $P_{потр-} = I_{к-} E_K$;
- мощность, потребляемую от источника питания в режиме покоя, $P_{потр(0)} = I_{к(0)} E_K$;
- коэффициент полезного действия каскада: $\eta = P_{\sim}/P_{потр-}$.

5.4. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада при разных положениях исходной рабочей точки БТ в режиме малого сигнала без насыщения и отсечки тока.

¹ Осциллограммы и показания цифровых индикаторов по пункту 5.3.6 соответствуют значениям токов и напряжений в рабочей точке БТ. Если эти значения измерены ранее, то выполнение пункта 5.3.6 не является обязательным.

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.4.1. Установите входы каналов осциллографа в положение «Закрытые». Задайте амплитуду входного сигнала $E_m = E_{m\max}/3$. Оставьте установленное в пункте 5.3 положение исходной рабочей точки в середине рабочего участка динамической ВАХ, соответствующее значению ЭДС смещения базы $E_{0(0)}$ (рабочая точка 0).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.2. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения, установив курсорную линию в положение, соответствующее моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ совместно с графиками ВАХ по пункту 5.4.2.

5.4.3. Установите ЭДС смещения базы $E_{0(1)}$, соответствующую значению тока базы $I_{б(1)} = I_{б.\text{нач}} + (I_{б.\text{кон}} - I_{б.\text{нач}})/6$ в нижней области рабочего участка ВАХ (рабочая точка 1).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.4. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения, установив курсорную линию в положение, соответствующее моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ совместно с графиками ВАХ по пункту 5.4.4.

5.4.5. Установите ЭДС смещения базы, $E_{0(2)}$, соответствующую значению тока базы $I_{б(2)} = I_{б.\text{кон}} + (I_{б.\text{кон}} - I_{б.\text{нач}})/6$, в верхней области рабочего участка ВАХ (рабочая точка 2).

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.4.6. По выведенным осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения, установив курсорную линию в положение, соответствующее моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов и индикаторов измерителя ВАХ совместно с графиками ВАХ по пункту 5.4.6.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.4

По результатам измерения для трех положений исходной рабочей точки ($l = 0, 1, 2$) определите:

- значения тока базы $I_{б(l)}$, тока коллектора $I_{к(l)}$ и напряжений база–эмиттер $U_{бэ(l)}$ и коллектор–эмиттер в исходных рабочих точках $U_{кэ(l)}$;
- амплитуды напряжений база–эмиттер $U_{бэ\text{ м}(l)}$, коллектор–эмиттер $U_{кэ\text{ м}(l)}$ и тока базы $I_{б\text{ м}(l)}$, тока коллектора $I_{к\text{ м}(l)}$;
- коэффициент передачи (усиления) по напряжению $K_{U(l)} = U_{кэ\text{ м}(l)}/U_{бэ\text{ м}(l)}$;
- коэффициент передачи (усиления) по току $K_{I(l)} = I_{к\text{ м}(l)}/I_{б\text{ м}(l)}$;
- динамическую крутизну $S_{(l)} = I_{к\text{ м}(l)}/U_{бэ\text{ м}(l)}$;

- входное сопротивление $R_{вх(l)} = U_{бэ м(l)} / I_{б м(l)}$.

Постройте графики зависимости коэффициентов усиления K_U , K_I , динамической крутизны S и входного сопротивления $R_{вх}$ от значения тока коллектора в рабочей точке $I_{к(l)}$, то есть от режима работы БТ по постоянному току.

5.5. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада, соответствующих работе биполярного транзистора в режиме большого сигнала с отсечкой тока (в режиме, близком к режиму В).

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.5.1. Установите ЭДС смещения базы $E_{0(3)}$, соответствующую нижнему граничному значению тока базы $I_{б(3)} = I_{б.нач}$, на рабочем участке ВАХ (рабочая точка 3).

Задайте значение амплитуды входного сигнала $E_m = 2E_{m \max}$.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.5.1.

5.5.2. Проведите курсорные измерения при положении курсорной линии, соответствующем моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.5.2.

5.5.3. Переведите входы осциллографа в режим «Закрытые». Проведите курсорные измерения при положении курсорной линии, соответствующем моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов по пункту 5.5.3.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.5

По результатам измерения определите:

- значения тока базы $I_{б(3)}$, тока коллектора $I_{к(3)}$ и напряжений база–эмиттер $U_{бэ(3)}$ и коллектор–эмиттер в исходной рабочей точке (точке покоя) $U_{кэ(3)}$;
- средние значения (постоянные составляющие) напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ-}$ и тока коллектора $I_{к-}$, напряжения база–эмиттер $U_{бэ-}$ и тока базы $I_{б-}$;
- разности средних и исходных значений тока базы, тока коллектора и напряжений база–эмиттер и коллектор–эмиттер: $\Delta U_{бэ(3)} = U_{бэ-} - U_{бэ(3)}$; $\Delta U_{кэ(3)} = U_{кэ-} - U_{кэ(3)}$; $\Delta I_{б(3)} = I_{б-} - I_{б(3)}$; $\Delta I_{к(3)} = I_{к-} - I_{к(3)}$;
- минимальное (по модулю) значение напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ \min}$;
- амплитуду напряжения коллектор–эмиттер $U_{кэ м} = E_k - U_{кэ \min}$ и тока коллектора $I_{к м}$;
- амплитуду первой гармоники тока коллектора $I_{к1 м} \approx I_{к м} / 2$;
- коэффициенты использования транзистора по напряжению и по току $\psi = I_{к1 м} / I_{к-}$, $\xi = U_{кэ м} / E_k$;
- мощность первой гармоники выходного сигнала $P_{-1} = (I_{к1 м})^2 R_k / 2$;

- мощность, рассеиваемую на транзисторе в динамическом режиме, $P_{\text{рас-}} = I_{\text{к-}} U_{\text{к-}}$;
- мощность, рассеиваемую на транзисторе в режиме покоя, $P_{\text{рас.(3)}} = I_{\text{к(3)}} U_{\text{к0(3)}}$;
- мощность, потребляемую от источника питания в динамическом режиме, $P_{\text{потр}} = I_{\text{к-}} E_{\text{к}}$;
- мощность, потребляемую от источника питания в режиме покоя, $P_{\text{потр(3)}} = I_{\text{к(3)}} E_{\text{к}}$.

5.6. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада, соответствующих работе биполярного транзистора в ключевом режиме (с отсечкой тока и насыщением).

Указания по проведению измерений, сохранению и обработке полученных результатов

5.6.1. Установите значение ЭДС смещения базы $E_{0(4)}$, соответствующее пороговому напряжению база–эмиттер $U_{\text{бэ,пор}}$ при котором ток базы и ток коллектора транзистора практически равны нулю (рабочая точка 4, находящаяся в области отсечки).

Задайте максимально возможное значение амплитуды входного сигнала E_m , ограниченное максимально возможным током коллектора транзистора и максимальным обратным напряжением база–эмиттер.

Измерьте осциллограммы напряжений в контрольных точках схемы.

5.6.2. Проведите курсорные измерения при положении курсорной линии, соответствующем моменту времени t_1 (см. пункт 5.3.2).

Сохраните для отчета осциллограммы напряжений с показаниями цифровых курсорных индикаторов совместно с графиками ВАХ и показаниями цифровых индикаторов измерителя ВАХ по пункту 5.6.2.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.6

По результатам измерения определите:

- значения тока базы $I_{\text{б(4)}}$, тока коллектора $I_{\text{к(4)}}$ и напряжений база–эмиттер $U_{\text{бэ(4)}}$ и коллектор–эмиттер $U_{\text{кэ(4)}}$ в исходной рабочей точке (точке покоя);
- значение напряжения коллектор–эмиттер в режиме отсечки $U_{\text{кэ,отс}}$;
- значение напряжения коллектор–эмиттер в режиме насыщения $U_{\text{кэ,нас}}$;
- значение напряжения база–эмиттер в режиме отсечки $U_{\text{бэ,отс}}$;
- значение напряжения база–эмиттер в режиме насыщения $U_{\text{бэ,нас}}$;
- значение тока коллектора в режиме насыщения $I_{\text{к,нас}}$;
- максимальное значение тока базы в режиме насыщения $I_{\text{б,нас}}$.

5.7. Выполните измерение осциллограмм напряжений в исследуемой схеме усилительного каскада в режиме анимации при различных сопротивлениях нагрузки $R_{\text{к}} = 100, 300, 600 \text{ Ом}$.

5.7.1. Включите режим «Анимация». Выберите сопротивление нагрузки $R_{\text{к}} = 300 \text{ Ом}$. Установите входы каналов осциллографа в положение «Закрытые». Задайте амплитуду входного сигнала $E_m = E_{m \text{ max}}/3$. Установите ЭДС смещения базы E_0 , соответствующую значению тока базы $I_{\text{б(0)}}$, в середине рабочего участка ВАХ (рабочая точка 0).

Путем нажатия клавиши «Принять» выведите на экран осциллограммы напряжения, вычисленные по входному сигналу и ВАХ БТ.

5.7.2. По осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения и сохранение результатов измерения аналогично пункту 5.4.2.

5.7.3. Выберите сопротивление нагрузки $R_k = 600 \text{ Ом}$. Увеличьте (по модулю) ЭДС источника питания цепи коллектора E_k до значения, при котором отображаемая на графиках измерителя ВАХ выходная динамическая характеристика (линия нагрузки) пройдет через ту же рабочую точку 0, что и при сопротивлении нагрузки $R_k = 300 \text{ Ом}$.

Путем нажатия клавиши «Принять» выведите на экран осциллограммы напряжения, вычисленные по входному сигналу и ВАХ БТ.

5.7.4. По осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения и сохранение результатов измерения аналогично пункту 5.4.2.

5.7.5. Выберите сопротивление нагрузки $R_k = 100 \text{ Ом}$. Уменьшите ЭДС источника питания цепи коллектора E_k до значения, при котором отображаемая на графиках измерителя ВАХ выходная динамическая характеристика (линия нагрузки) пройдет через ту же рабочую точку 0, что и при сопротивлении нагрузки $R_k = 300 \text{ Ом}$.

Путем нажатия клавиши «Принять» выведите на экран осциллограммы напряжения, вычисленные по входному сигналу и ВАХ БТ.

5.7.6. По осциллограммам напряжений проведите курсорные измерения и сохранение результатов измерения аналогично пункту 5.4.2¹.

Задание для обработки результатов измерений по пункту 5.7

По результатам измерения для каждого из сопротивлений нагрузки $R_k = 100, 300, 600 \text{ Ом}$ определите:

- значения тока базы $I_{б(0)}$, тока коллектора $I_{к(0)}$ и напряжений база–эмиттер $U_{бэ(0)}$ и коллектор–эмиттер $U_{кэ(0)}$ в исходной рабочей точке;
- амплитуды напряжений база–эмиттер $U_{бэ м}$, коллектор–эмиттер $U_{кэ м}$ и тока базы $I_{б м}$, тока коллектора $I_{к м}$;
- коэффициент передачи (усиления) по напряжению $K_U = U_{кэ м} / U_{бэ м}$;
- коэффициент передачи (усиления) по току $K_I = I_{к м} / I_{б м}$;
- динамическую крутизну $S = I_{к м} / U_{бэ м}$;
- входное сопротивление $R_{вх} = U_{бэ м} / I_{б м}$.

Постройте графики зависимости коэффициентов усиления K_U , K_I , динамической крутизны S и входного сопротивления $R_{вх}$ от сопротивлений нагрузки R_k .

¹ Если при исходном значении ЭДС источника питания цепи коллектора E_k в пункте 5.7.1 (равном 7,5 В или –7,5 В в зависимости от типа транзистора) не удастся установить одинаковый при разных сопротивлениях нагрузки режим работы транзистора по постоянному току, то значение E_k в пункте 5.7.1 нужно уменьшить (по модулю) до значения, при котором данное условие достигается. Можно также выбрать и другой, одинаковый при всех нагрузках режим работы транзистора по постоянному току. Необходимые значения ЭДС источника питания при разных сопротивлениях нагрузки можно найти предварительно с помощью динамических ВАХ, а затем уже выполнять измерения по пунктам 5.7.1–5.7.6.

5.8. Аналогичным образом проведите измерения по пунктам 5.3–5.6 при другом значении ЭДС источника питания цепи коллектора E_k (в соответствии с индивидуальным вариантом).

5.9. По *индивидуальному заданию* проведите измерения для биполярного транзистора другого типа. Для этого закройте лицевую панель виртуального лабораторного стенда, нажав клавишу «Выход». В открывшемся титульном экране лабораторной работы выберете нужный тип биполярного транзистора. Снова откройте лицевую панель стенда нажатием клавиши «Начать выполнение».

5.10. С помощью клавиш «Выход» и «Завершение работы» на лицевой панели и титульном экране завершите выполнение лабораторного задания по экспериментальному исследованию работы биполярного транзистора на переменном токе.

6. Задание для исследования работы биполярного транзистора на переменном токе с помощью моделирования на ПЭВМ

С помощью программных средств моделирования системы *OrCAD* исследовать осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках моделируемой схемы усилительного каскада с общим эмиттером при значениях параметров моделирования, соответствующих одному из пунктов 5.3–5.7 задания по его экспериментальному исследованию (по выбору или по индивидуальному заданию преподавателя).

При исходных данных на моделирование, соответствующих пункту 5.4.1 (исследование работы усилительного каскада в линейном режиме – режиме малых сигналов), исследовать осциллограммы напряжений и токов при значении частоты сигнала, близкой к предельной для данного биполярного транзистора.

Сопоставить результаты измерения и моделирования.

Указания по выполнению задания

При выполнении задания руководствуйтесь описанной в главе 4 общей технологией исследования полупроводниковых приборов с помощью программных средств моделирования *OrCAD* (параграф 4.1) и методиками исследования работы биполярного транзистора на переменном токе, приведенными в параграфе 4.5.3.

Сохраните для отчета полученные путем моделирования осциллограммы напряжений и токов в контрольных точках.

Задание для обработки результатов исследования по пункту 6

Сравните осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме усилительного каскада на биполярном транзисторе, полученные путем измерения и моделирования, отметьте наблюдаемые качественные и количественные отличия.

Оцените степень уменьшения коэффициента усиления каскада при значении частоты сигнала, близком к предельной для данного биполярного транзистора.

7. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе оформляется в виде электронного документа в текстовом редакторе *Word*.

В отчете должны быть приведены:

- 1) общие задачи выполнения лабораторной работы, типы исследуемых биполярных транзисторов, их параметры, расчетные выражения, необходимые для обработки результатов измерения;
- 2) вид сохраненной лицевой панели виртуального лабораторного стенда;
- 3) результаты измерений и обработки по пунктам выполнения лабораторных заданий 5.3–5.7;
- 4) результаты моделирования и обработки по пункту 6, включающие:
 - осциллограммы напряжений и токов в исследуемой схеме усилительно-го каскада;
 - наблюдаемые качественные и количественные отличия осциллограмм, полученных путем измерения и моделирования, их объяснение;
 - значения коэффициентов усиления каскада на низкой частоте и частоте сигнала, близкой к предельной для данного биполярного транзистора;
- 5) выводы по лабораторной работе о степени близости результатов экспериментального исследования и моделирования работы биполярного транзистора на переменном токе и соответствии их теоретическим и физическим представлениям и закономерностям.

Контрольные вопросы¹

1. Какие возможны схемы включения биполярных транзисторов?
2. Что такое динамические вольт-амперные характеристики усилительного каскада и как они строятся?
3. Что такое нагрузочная характеристика каскада, как она описывается и строится?
4. Как задается положение рабочей точки на нагрузочной характеристике?
5. На каком участке ВАХ необходимо выбирать рабочую точку биполярного транзистора при использовании его для усиления электрических сигналов?
6. На каком участке ВАХ необходимо выбирать рабочую точку транзистора при использовании его в качестве электронного ключа?
7. Какие возможны режимы работы биполярного транзистора в зависимости от положения исходной рабочей точки, в чем заключаются их особенности?
8. Как графически и аналитически определить коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе?
9. Как графически определить амплитуды выходного напряжения и выходного тока усилительного каскада на биполярном транзисторе при заданной амплитуде входного гармонического сигнала?

¹ Отвечая на контрольные вопросы, используйте относящиеся к ним результаты лабораторной работы, приведенные в отчете.

10. Что понимается под средней крутизной и средним коэффициентом усиления по току и напряжению биполярного транзистора при работе в режиме большого сигнала?
11. Как графически определить полезную выходную мощность усилительного каскада на биполярном транзисторе при заданной амплитуде входного гармонического сигнала?
12. Как графически определить мощность, потребляемую от источника питания, и коэффициент полезного действия усилительного каскада на биполярном транзисторе при заданной амплитуде входного гармонического сигнала?
13. Как зависит коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада на биполярном транзисторе от значения тока покоя?
14. Как и почему зависит коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе от частоты сигнала?
15. Какими параметрами определяются частотные свойства полевых транзисторов и как они учитываются в их математических моделях?
16. Как зависит коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада на биполярном транзисторе от сопротивления нагрузки?
17. Что усиливают биполярные транзисторы – напряжение или ток?
18. От чего возможны искажения формы сигналов в усилительном каскаде на биполярном транзисторе?
19. Какие характерные области можно выделить на ВАХ биполярных транзисторов?
20. Какие положения исходной рабочей точки на ВАХ соответствуют различным применениям биполярных транзисторов? Приведите примеры.
21. Какой режим работы биполярного транзистора относится к режиму А?
22. Какой режим работы биполярного транзистора относится к режиму В?

Выполнение лабораторных исследований на базе сетевой лаборатории



6.1. Основные функциональные характеристики

Сетевая лаборатория Сибирского федерального округа [www.alpsib.ru] посредством набора интерфейсов и специального инструментария позволяет получить общую информацию о лабораторной работе, методических указаниях, приступить к выполнению работы с помощью доступа к конкретному АПК, а также получить доступ к дополнительным сервисам: ПО по моделированию и тестированию; электронным образовательным ресурсам по различным областям учебного процесса, с которыми связан лабораторный практикум, и т. п.

В состав сетевой лаборатории входят открытые интерфейсы (группы ресурсов), доступные для всех пользователей (посетителей), и закрытые интерфейсы (группы ресурсов), доступные только для авторизованных пользователей лаборатории определенных категорий (табл. 6.1).

Открытая группа ресурсов обеспечивает общее информационное сопровождение пользователей, находится в режиме «только для чтения» и в соответствии с табл. 6.1 решает частные задачи: освещение наиболее значимых событий и изменений в работе сетевой лаборатории и системы лабораторных практикумов, публикация перечня доступных лабораторных работ, обеспечение обратной связи, организация расписания работы отдельных АПК, а также авторизация пользователей.

Закрытая группа ресурсов распределяется между следующими категориями пользователей: *администратор ЦУ АПК УД, администратор ЦКП УД, преподаватель (тьютор), студент.*

Обобщенная структура всех ресурсов сетевой лаборатории приведена на рис. 6.1.

Распределение ресурсов сетевой лаборатории позволяет оперативно управлять учебным процессом, строго регламентировать возможности пользователей каждого ЦКП (учебное заведение или структурное подразделение вуза), разгра-

Таблица 6. 1. Распределение основных ресурсов сетевой лаборатории

Открытая группа ресурсов (общие ресурсы)	Закрытая группа ресурсов (персонифицированные ресурсы)
Лента новостей	Учебно-методическое обеспечение лабораторного практикума
Общая информация о проекте	Интерфейс администратора центрального узла АПК
Каталог доступных для выполнения лабораторных работ	Интерфейс администратора ЦКП
Информация о сетевой лаборатории и о проекте в целом	Кабинет преподавателя
Контактная информация	Рабочий стол студента
Форум (открытые разделы)	Форум (закрытые разделы)
Каталог АПК	—
Расписание работы АПК	Электронные образовательные ресурсы по дисциплинам и модулям учебных курсов
Интерфейс авторизации пользователей	Учебно-методические материалы по тематике развития информационных технологий и их применения в образовании

ничить *интернет*-трафик, административные и образовательные ресурсы, сделать их персонифицированными. Каждый зарегистрированный в сетевой лаборатории ЦКП получает возможность доступа к лабораторному практикуму в соответствии со своими направлениями подготовки и изучаемыми дисциплинами.

Все категории пользователей получают доступ к персонифицированным управляемым укрупненным группам ресурсов в виде специализированных интерфейсов. Характеристика, сводные права и функции категории пользователей «Администратор ЦКП УД», «Преподаватель» и «Студент» представлены в табл. 6.2.

В сетевой лаборатории для работы каждой категории пользователей реализованы специализированные интерфейсы (рис. 6.2):

- «Рабочий стол студента»;
- «Кабинет преподавателя»;
- «Интерфейс администратора ЦКП УД»;
- «Интерфейс администратора ЦУ АПК УД».

Авторизовавшись как «Студент», пользователь получает доступ к виртуальному рабочему столу студента. Основная работа студента в сетевой лаборатории заключается в изучении методических материалов и выполнении лабораторного практикума по своей специальности в составе учебной группы. Виртуальный рабочий стол студента является средством доступа к описаниям, методическому обеспечению, выполнению дистанционного лабораторного практикума в режиме удаленного доступа, а также дополнительным сервисам.

Для всех лабораторных работ, размещенных в сетевой лаборатории, разработано методическое обеспечение в соответствии со следующей структурой:

- «Название лабораторной работы»;
- «Цель, задачи лабораторной работы»;
- «Краткие теоретические сведения»;

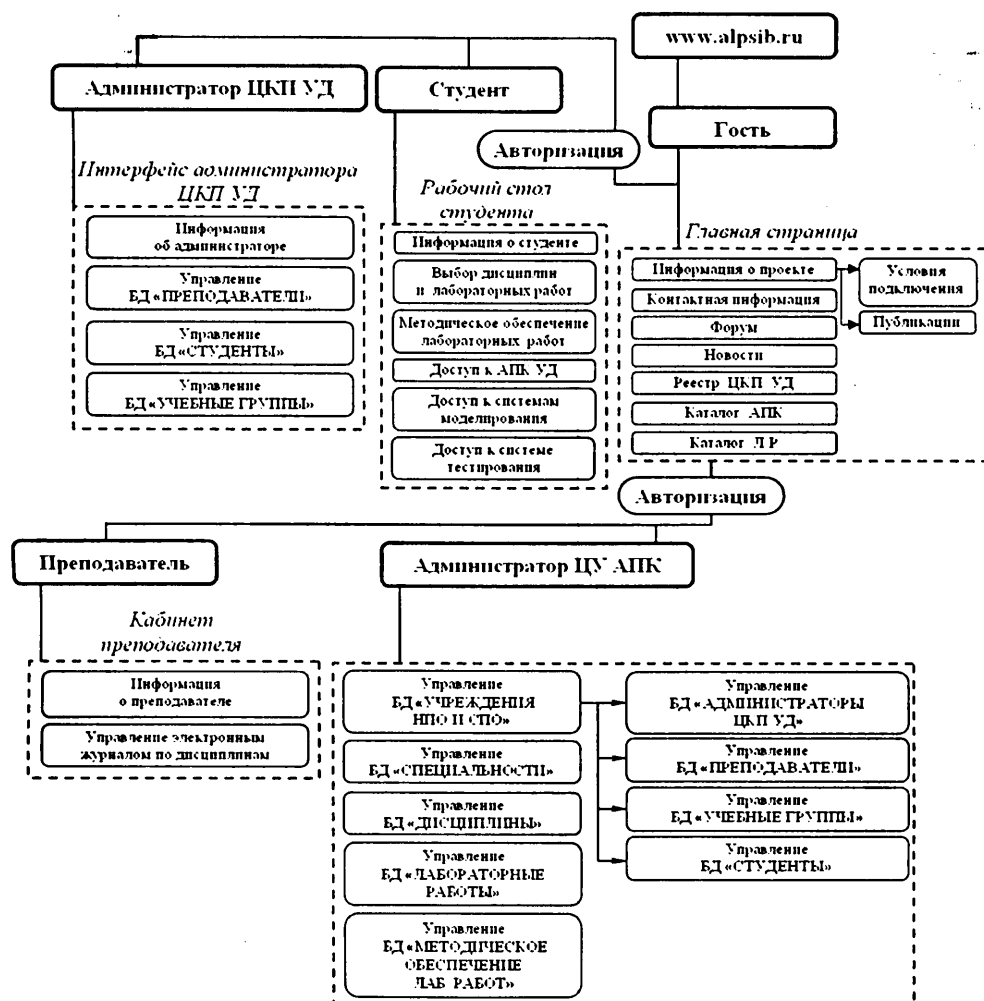


Рис. 6.1. Обобщенная структурная схема сетевой лаборатории

- «Описание аппаратно-программного комплекса»;
- «Исследование посредством математического моделирования на ПЭВМ»;
- «Задание для лабораторной работы»;
- «Порядок выполнения работы»;
- «Требования к оформлению отчета»;
- «Контрольные вопросы»;
- «Список литературы и Internet-ресурсов».

Все разделы методического обеспечения каждой лабораторной работы представлены в сетевой лаборатории в виде гипертекстовых документов, адаптированных для использования внутри сетевого пространства.

Таблица 6.2. Пользователи сетевой лаборатории

Категория пользователей	Название категории пользователей	Характеристика, сводные права и функции
II	Администратор ЦКП с удаленным доступом	Выполняет обязанности по администрированию учебного процесса, протекающего на базе соответствующего центра коллективного пользования. Обладает правами по регистрации категорий пользователей «Преподаватель», «Студент», а также правами по регистрации учебных групп по соответствующим специальностям. Выполняет обязанности по регистрации всех пользователей на базе ЦКП. Взаимодействует с администратором ЦУ АПК при ошибках регистрации пользователей
III	Преподаватель (тьютор)	Выполняет функции по организации процесса выполнения лабораторных работ студентами во время учебного процесса на базе ЦКП УД, а также изучения методического обеспечения лабораторного практикума. Осуществляет руководство студентами по выполнению соответствующих лабораторных работ, принимает отчеты студентов, обеспечивает их проверку и рецензирование на базе ЦКП УД, при необходимости возвращает отчет студенту на доработку. Организует процедуру прикрепления файла-отчета (после защиты лабораторной работы) и отправку его в базу данных центрального узла АПК (этапы выполнения студентом каждой лабораторной работы отражаются преподавателем в электронном журнале). Определяет статус выполнения и защиты лабораторной работы студента в соответствии с организацией учебного процесса. Добавляет комментарии в электронный журнал студента
IV	Студент	Выполняет предусмотренные учебным процессом лабораторные работы по указанию преподавателя. Пользуется всеми необходимыми для учебного процесса учебно-методическими материалами, размещенными как в виртуальном пространстве сетевой лаборатории, так и на других сетевых ресурсах, функционирующих в рамках работы системы ЦКП УД, выполняет процедуру отправки файла-отчета в базу данных сетевой лаборатории

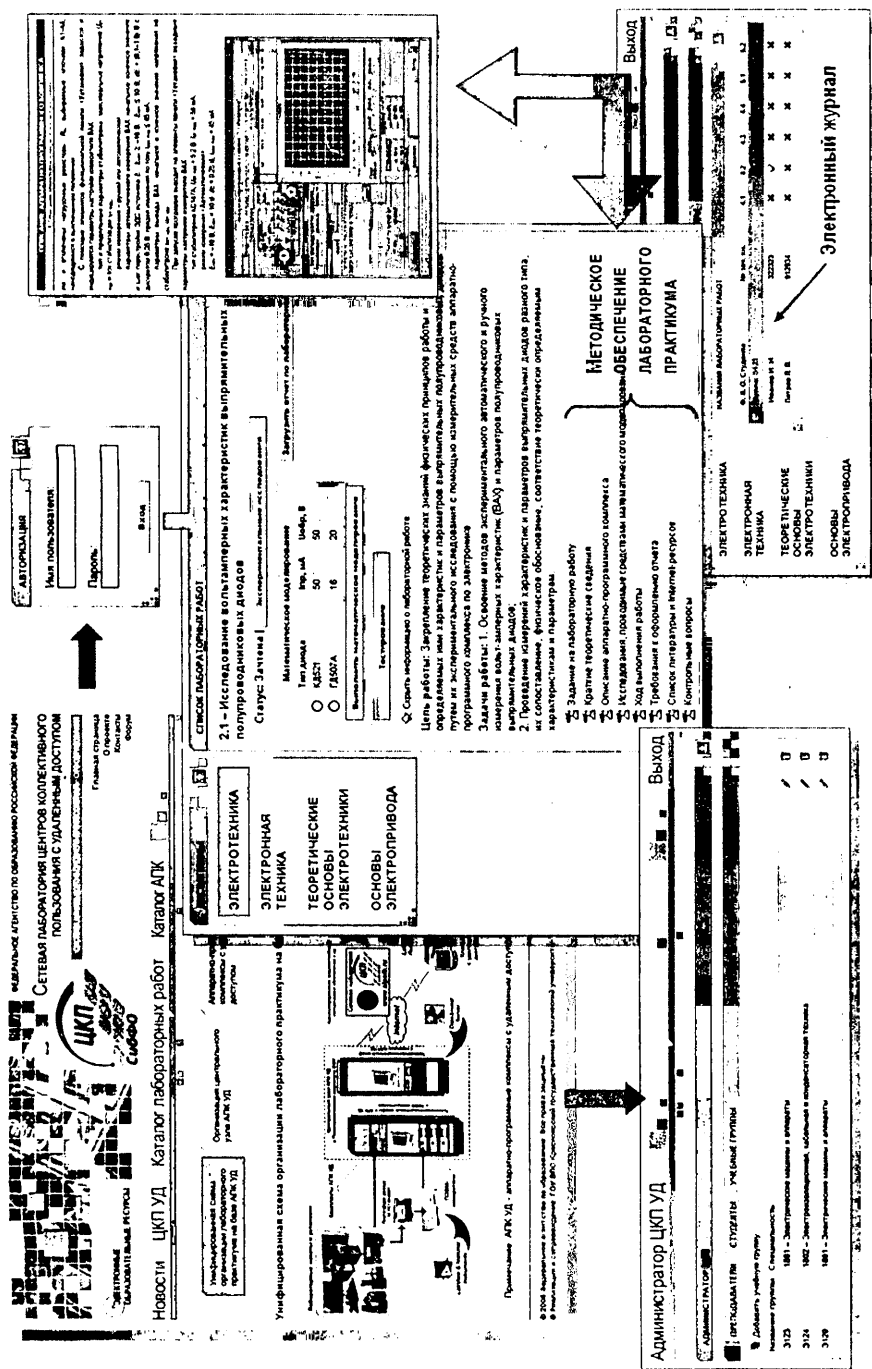


Рис. 6.2. Интерфейсы пользователей сетевой лаборатории

Авторизовавшись как «Преподаватель», пользователь получает доступ к виртуальному кабинету преподавателя. Кабинет преподавателя является специализированным интерфейсом, позволяющим осуществлять мониторинг и установку статуса выполнения лабораторных работ студентами в составе учебных групп с помощью электронного журнала. Электронный журнал в табличной форме содержит Ф. И. О. каждого студента, номер зачетной книжки в составе учебных групп. В этой же области приведены номера лабораторных работ и показан статус их выполнения.

Авторизовавшись как «Администратор ЦКП УД» пользователь получает доступ к специализированному интерфейсу администратора ЦКП УД. Интерфейс позволяет управлять списками преподавателей, студентов и учебных групп. Администратор ЦКП УД технологически привязан к соответствующему ЦКП, следовательно, он имеет возможность управлять списками только соотношенного с ним ЦКП.

Администратор центрального узла АПК УД сетевой лаборатории имеет возможность управлять любыми модулями сетевой лаборатории (рис. 6.1) для всей сети ЦКП.

6.2. Методика проведения лабораторных исследований

На базе сетевой лаборатории возможно проведение экспериментальных лабораторных исследований с применением АПК УД «Электроника» (глава 3) и проведение лабораторных исследований средствами математического моделирования (глава 4).

Подробное методическое обеспечение всех лабораторных работ без привязки к особенностям выполнения лабораторного практикума на базе сетевой лаборатории приводится в главе 5 данного пособия. Ниже рассматриваются методические аспекты, связанные с применением закрытой группы ресурсов лаборатории категории пользователей «Студент».

Задание на лабораторные исследования определяются преподавателем согласно приложению 3.

6.2.1. Экспериментальные исследования

Для проведения лабораторных исследований с применением АПК УД «Электроника» студенту, после получения от преподавателя задания для лабораторных исследований, необходимо выполнить ряд последовательных действий.

1. Получить у администратора ЦКП имя и пароль для доступа к закрытым ресурсам сетевой лаборатории (табл. 6.1, 6.2).
2. В сети *Интернет* войти в лабораторию www.alsib.ru и выполнить авторизацию под выделенным именем и паролем (рис. 6.3).
3. По согласованию с преподавателем в разделе «Дисциплины» выбрать необходимую дисциплину, а в разделе «Список лабораторных работ» – лабораторную работу.

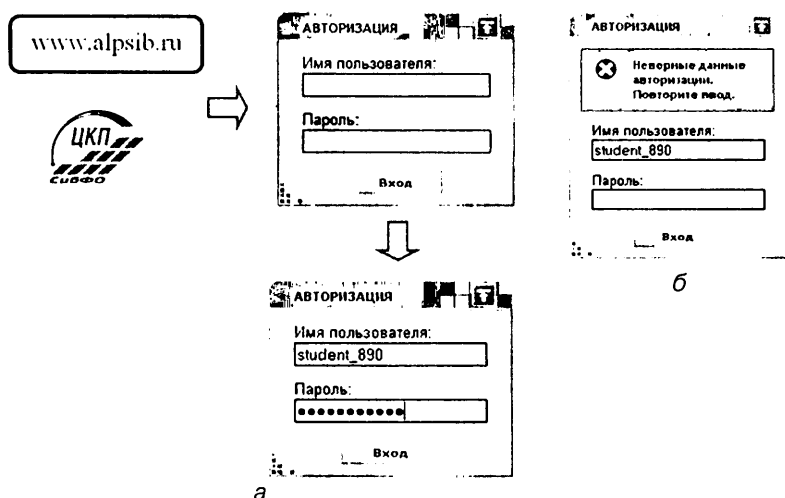


Рис. 6.3. Процедура авторизации в сетевой лаборатории:

а – ввод имени пользователя и пароля; б – информация об ошибке авторизации

4. Ознакомиться с методическими указаниями, которые представлены набором файлов (рис. 6.4), доступных студенту в сетевом пространстве. Доступ к данным файлам можно получить посредством активизации пункта меню «Список лабораторных работ». В данном пункте меню каждая лабораторная работа содержит набор файлов с разделами методического обеспечения.
5. Активизировать клавишу «Экспериментальные исследования». Активизация клавиши приводит к автоматическому запуску клиентского ПО – запуск программы *электроника.exe* (см. параграф 3.3). После этого на экране монитора появится титульный экран (рис. 3.7).
6. С помощью титульного экрана выполнить ряд операций (подключение к серверу, выбор типа исследуемого полупроводникового прибора и т. п.), перечень которых приведен в параграфе 3.3 данного пособия. Конечной целью выполнения перечисленных операций является появление на экране монитора виртуального лабораторного стенда, с помощью которого проводятся экспериментальные исследования определенной группы параметров и характеристик конкретного типа полупроводникового прибора. Подробные методики настройки и работы с виртуальными лабораторными стендами изложены в параграфах 3.4–3.6 данного пособия.
7. В соответствии с методическими указаниями, приведенными в главе 6, выполнить экспериментальные исследования.
8. Для выполнения процедуры тестирования активизировать клавишу «Тестирование», которая находится в разделе конкретной лабораторной работы пункта меню «Список лабораторных работ» (рис. 6.4).
9. После выполнения лабораторных исследований сформировать файл-отчет и загрузить его в базу сетевой лаборатории через окно загрузки файла-отчета (рис. 6.4).

Рабочий стол студента

Выход

ИВАНОВ ИВАН ИВАНОВИЧ

Логин: student_126

Фамилия: Иванов

Имя: Иван

Отчество: Иванович

Учебное заведение: ГОУ СПО «Канский политехнический колледж»

Шифр группы: 3123

Специальность: 1801 - Электрические машины и аппараты

Номер зачетной книжки: 322323

ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОННАЯ
ТЕХНИКА

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА

СПИСОК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 – Исследование вольтамперных характеристик выпрямительных полупроводниковых диодов

Статус: Зачтена | Экспериментальное исследование

Математическое моделирование

Тип диода | Iпр, мА | Uобр, В

☐ КД521	50	50
☐ ГД507А	16	20

Выполнить математическое моделирование

Загрузить отчет по лабораторной работе

Тестирование

Скрыть информацию о лабораторной работе

Цель работы: Закрепление теоретических знаний физических принципов работы и определяемых ими характеристик и параметров выпрямительных полупроводниковых диодов путем их экспериментального исследования с помощью измерительных средств аппаратно-программного комплекса по электронике.

Задачи работы: 1. Освоение методов экспериментального автоматического и ручного измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и параметров полупроводниковых выпрямительных диодов;
2. Проведение измерений характеристик и параметров выпрямительных диодов разного типа, их сопоставление, физическое обоснование, соответствие теоретически определяемым характеристикам и параметрам.

- Задание на лабораторную работу
- Краткие теоретические сведения
- Описание аппаратно-программного комплекса
- Исследования, проводимые средствами математического моделирования
- Ход выполнения работы
- Требования к оформлению отчета
- Список литературы и Internet-ресурсов
- Контрольные вопросы

Рис. 6.4. Интерфейс рабочего стола студента

6.2.2. Исследования, проводимые средствами математического моделирования

1. Выполнить по аналогии с параграфом 6.2.1 действия, перечисленные в пунктах 1–4.
2. Активизировать клавишу «Математическое моделирование» (рис. 6.4), выбрать типонамнал полупроводникового прибора (определяется заданием

на лабораторные исследования /см. приложение 3/). В соответствии с методическими указаниями, приведенными в главах 4 и 5, выполнить исследования на ПЭВМ посредством активизации клавиши «Выполнить математическое моделирование».

3. Для выполнения процедуры тестирования активизировать клавишу «Тестирование».
4. После выполнения лабораторных исследований сформировать файл-отчет и загрузить его в базу сетевой лаборатории через окно загрузки файла-отчета (рис. 6.4).

Процессу исследований характеристик и параметров полупроводниковых приборов на ПЭВМ предшествует процесс установки демонстрационной версии системы OrCAD 9.1 на ПЭВМ ЦКП (клиентские ПЭВМ). Инструкции по установке системы OrCAD 9.1 поставляются администратором ЦУ администратору ЦКП УД на инсталляционном DVD.

6.2.3. Дополнительные возможности

Перед выполнением лабораторных исследований студенту целесообразно изучить основные характеристики АПК «Электроника» при помощи ИЭТР (см. параграф 1.4.3), которое устанавливается администратором ЦКП на клиентские ПЭВМ с инсталляционного DVD. Краткая характеристика ИЭТР доступна через раздел лаборатории «Электронные образовательные ресурсы».

Результаты выполнения каждого лабораторного исследования отмечаются преподавателем в электронном журнале (рис. 6.2). При этом каждому лабораторному исследованию преподавателем может быть присвоен статус «Зачтено». Статус «На рассмотрении» системой присваивается автоматически после отправки студентом отчета преподавателю.

Используя раздел «Форум» [www.alpsib.ru/Forum.aspx] (рис. 6.5), пользователи и посетители сетевой лаборатории в режиме офф-лайн общения могут обсу-

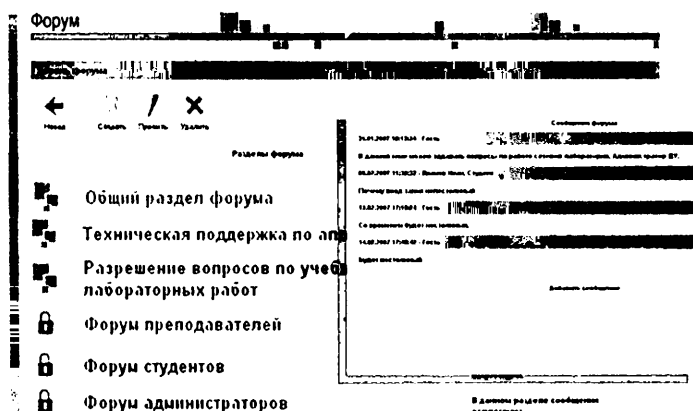


Рис. 6.5. Форум сетевой лаборатории

дить различные аспекты, связанные с работой сетевой лаборатории. Удобство данного форума заключается в том, что доступ к нему и идентификация производятся автоматически для всех зарегистрированных пользователей ЦКП. Данный сектор виртуального пространства сетевой лаборатории обеспечивает возможность обмена информацией для всех пользователей ЦКП. Форум также позволяет оперативно разрешить все спорные вопросы, которые могут возникнуть как при работе с сетевой лабораторией, так и при выполнении конкретных лабораторных исследований.

ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ	РЕЖИМ РАБОТЫ	АПК
ГОУ СПО «Канский политехнический колледж» ГОУ СПО «Красноярский политехнический техникум» ГОУ СПО «Томский политехнический техникум» ГОУ СПО «Бердский электромеханический техникум» ГОУ СПО «Саяногорский политехнический техникум» ГОУ СПО «Ачинский политехнический техникум» ГОУ СПО «Железногорский промышленный колледж» ГОУ СПО НПО «Ачинский колледж отраслевых технологий и бизнеса» ГОУ СПО «Канский технологический техникум» ГОУ СПО «Новосибирский авиационный колледж»	Среднее время занятости АПК на одну лабораторную работу (одно измерение) 1 мин ПН 9:00 - 17:00 ВТ 9:00 - 17:00 СР НЕ ДОСТУПЕН ЧТ 9:00 - 17:00 ПТ 9:00 - 17:00 СБ 10:00 - 15:00 ВС НЕ ДОСТУПЕН Техническая поддержка по АПК Форум: Техническая поддержка АПК "Учебный робототехнический комплекс" Телефон горячей линии: (8-3912) 912-046 во время доступности АПК	АПК «УРК» АПК робот «ТУР-10» АПК «Тракт усиления звуковой частоты» АПК «Электрические цепи», «Стабилизаторы», «Выпрямители» АПК «Дюид», «Стабилизатор», «Транзистор»

Рис. 6.6. Пример структуры раздела «Расписание работы АПК» для одного из ЦКП с удаленным доступом

Входящие в состав сетевой лаборатории АПК УД могут быть привязаны к расписанию работы АПК УД, представленного отдельным подразделом в сетевой лаборатории (рис. 1.14 и рис. 6.6). Расписание для разных АПК УД связано с возможным снижением нагрузки на один АПК УД или с техническими особенностями АПК УД, ориентированных на исследование процессов управления объектами, например такими, как робот или электропривод.

Заключение



Рассмотренный в данной книге лабораторный практикум по исследованию характеристик и параметров полупроводниковых приборов на основе информационно-телекоммуникационных технологий открывает широкие перспективы для использования технологий *e-learning* в подготовке специалистов технического профиля. Данные технологии позволяют более гибко формировать индивидуальную траекторию обучения студента за счет удаленного доступа по сети *Интернет* практически с любого компьютера к лабораторным макетам и установкам.

Описанная в книге сетевая лаборатория включает в свой состав различные АПК УД («Устройства приема и обработки сигналов», «Тракт усиления звуковой частоты», «Аналоговая схемотехника», «Учебный робототехнический комплекс» и др.), функционирующие по принципам, аналогичным АПК УД «Электроника». В конце 2007 – начале 2008 г. сетевая лаборатория войдет в состав портала автоматизированного лабораторного практикума Сибирского федерального округа. В рамках портала будет функционировать комплекс сетевых лабораторий, ориентированных на:

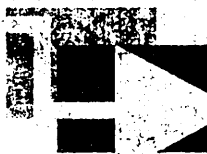
- систему школьного образования;
- систему начального профессионального и среднего профессионального образования;
- систему высшего профессионального образования;
- систему переподготовки и повышения квалификации кадров.

В числе сетевых лабораторий, кроме описанной в данной книге, будут функционировать следующие специализированные лаборатории: «Физика», «Электротехника», «Радиоэлектроника», «Интеллектуальная робототехника», «Автоматизация технологических процессов», «Механика».

Количество вводимых в эксплуатацию лабораторий определяется созданием на базе регионального инновационного центра «Центр технологий *National Instruments*» АПК УД, а также учебно-методическим обеспечением лабораторных исследований, выполняемых на их основе.

Информацию о вводе в эксплуатацию новых АПК УД и их краткую характеристику можно найти в разделе «Новости» сетевой лаборатории [www.alpsib.ru], а в перспективе – и в разделе «Новости» создаваемого портала, в который можно будет зайти через адрес указанной сетевой лаборатории.

Список литературы



1. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 5-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2001. – 480 с.: ил.
2. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): учеб. / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров; ред. О. П. Глудкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 768 с.: ил.
3. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: учеб. пособие / В. А. Гуртов. – 2-е изд., доп. – М.: Техносфера, 2005. – 408 с.
4. Долгих Э. А. Основы применения CALS-технологий в электронном приборостроении: учеб. пособие / Э. А. Долгих, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 137 с.
5. Измерения и автоматизация. Каталог. – *National Instruments Corp.*, 2007.
6. Суранов А. Я. *LabVIEW 7*: справ. по функциям / А. Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 512 с.
7. Применение информационно-коммуникационных технологий в образовании: учеб.-метод. пособие / А. В. Сарафанов, А. Г. Суковатый, И. Е. Суковатая и др. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 186 с.
8. Концепция типовых решений при построении автоматизированных лабораторных практикумов с удаленным доступом (на примере дисциплин радиотехнических специальностей) / С. А. Подлесный, А. В. Сарафанов, В. А. Комаров. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005.
9. Латышев, П. Н. Каталог САПР. Программы и производители / П. Н. Латышев. – М.: СОЛОН – ПРЕСС, 2006. – 608.: ил. (Системы проектирования.)
10. Унифицированная система компьютерной проверки знаний тестированием UniTest. Версия 2.5.0: руководство пользователя / А. Н. Шниперов, Б. М. Бидус. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 80 с.
11. www.alpsib.ru – сетевая лаборатория Сибирского федерального округа.
12. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И. П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.: ил.
13. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справ. / общ. ред. Н. А. Горюнов. – М.: Энергониздат, 1987. – 743 с.

14. Жеребцов И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. – 352 с.: ил.
15. Мусонов В. М. Электрорадионизмерения: учеб. пособие для вузов / В. М. Мусонов, В. А. Чижилов; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2005. – 244 с.
16. Метрология и радионизмерения: учеб. для вузов / В. И. Нефедов и др.; под ред. В. И. Нефедова. – М.: Высшая школа, 2003. – 526 с.
17. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерения / Ф. Мейзда. – М.: Мир, 1990.
18. Норенков И. П. Информационные технологии в образовании / И. П. Норенков, А. М. Зимин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 352 с.
19. Практикум по основам измерительных технологий (с компьютерными моделями в среде LabVIEW): учеб. пособие / В. К. Баторвин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин, В. Ф. Пакуловский; ред. В. К. Баторвин / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)». – М., 2004. – 172 с.
20. ОСТ 9.2–98. Учебная техника для образовательных учреждений системы автоматизированного лабораторного практикума.
21. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М.: Солон-Р, 2001.
22. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Электроника» Версия 1.0. [Электронный ресурс]: интерактивное электронное техническое руководство / Ю. А. Капустин-Богданов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов и др.; Сиб. федер. ун-т. – Электрон. дан. (1,25 ГБ). – Красноярск: СФУ, 2007. 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – Систем. требования: *Intel Pentium* 2000 МГц; 512 МБ оперативной памяти; видеосистема 128 МБ; привод *CD-ROM*; операционная система *Windows 98/2000/XP*. – Номер госрегистрации в НТЦ «Информрегистр» 0320 702618.

Приложение 1

Список используемых сокращений



АЛМ	– автоматизированный лабораторный макет
АЛП	– автоматизированный лабораторный практикум
АЛП УД	– автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом
АМП	– аналоговый мультиплексор
АПК	– аппаратно-программный комплекс
АПК УД	– аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом
АССОД	– автоматизированная система сбора и обработки данных
АЦП	– аналогово-цифровой преобразователь
БЗУ	– буферное запоминающее устройство
ВАХ	– вольт-амперная характеристика
ИО	– исследуемый объект
ИЭТР	– интерактивное электронное техническое руководство
ОМ	– объектный модуль
ПА	– программируемый аттенюатор
ПО	– программное обеспечение
ПК	– персональный компьютер
ПЛИС	– программная логическая интегральная схема
ПУ	– программируемый усилитель
РД	– регистр данных
ПЭВМ	– персональная электронно-вычислительная машина
УВХ	– устройство выборки-хранения
УСД	– устройство сбора данных
ФНЧ	– фильтр низких частот
ЦАП	– цифровой аналоговый преобразователь
ЦКП	– центр коллективного пользования
ЦУ	– цифровое устройство
ЭДС	– электродвижущая сила
API	– <i>Application Programming Interface</i> – набор методов (функций), который программист может использовать для доступа к функциональности программной компоненты (программы, модуля, библиотеки)

<i>CAM</i>	– <i>Computer Aided Manufacturing</i> – компьютерная поддержка производства изделий
<i>CASE</i>	– <i>Computer Aided Software Engineering</i> – компьютерная поддержка разработки программных средств
<i>DAQms</i>	– последняя версия драйвера <i>NI-DAQ</i> с новыми функциями и инструментами для управления измерительными устройствами
<i>DataSocket</i>	– протокол обмена, поддерживаемый <i>LabVIEW</i> , для совместного использования динамически меняемых данных
<i>DVD</i>	– <i>Digital Versatile Disc</i> – цифровой многоцелевой диск. Носитель информации в виде диска, внешне схожий с компакт-диском, однако имеющий возможность хранить больший объем информации за счет использования лазера с меньшей длиной волны, чем для обычных компакт дисков
<i>LabVIEW</i>	– <i>Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench</i> – среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы <i>National Instruments</i> (США)
<i>NI</i>	– <i>National Instruments</i>
<i>PXI</i>	– <i>Compact PCI Extension For Instrumentation</i> – расширение шины <i>Compact PCI</i> для использования в инструментальных системах (модульная аппаратная платформа, активно использующая возможности шины <i>Compact PCI</i> (модификация шины <i>PCI</i>) и программных технологиях <i>Microsoft Windows</i>)
<i>TCP</i>	– <i>Transport Control Protocol</i> – транспортный протокол
<i>IP</i>	– <i>Internet Protocol</i> – интернет-протокол
<i>USB</i>	– <i>Universal Serial Bus</i> – универсальная последовательная шина, предназначенная для периферийных устройств. Шина <i>USB</i> представляет собой последовательный интерфейс передачи данных для среднескоростных и низкоскоростных периферийных устройств

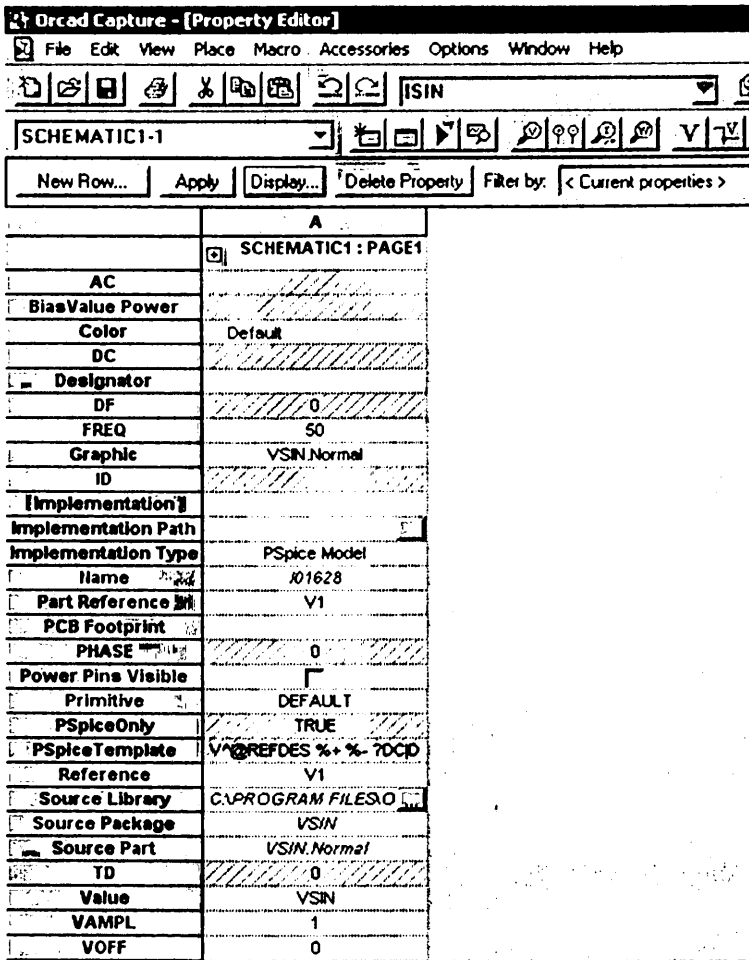


Рис. П.2.3. Фрагмент окна свойств модели источника синусоидального напряжения

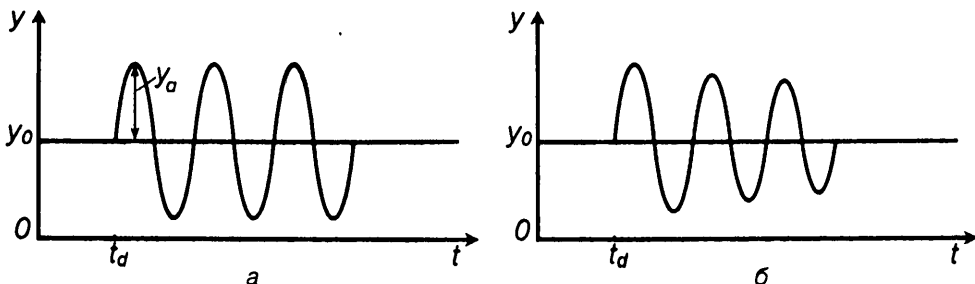


Рис. П.2.4. Незатухающая (а)/ $d_i = 0$ и затухающая; (б)/ $d_i > 0$ синусоидальные функции

Модель конденсатора

Конденсатор используется как идеальный элемент или как встроенная модель.

В реальной модели учитываются температурные коэффициенты и зависимости емкости от приложенного напряжения:

$$\langle C_{\text{ном}} \rangle \cdot C \cdot (1 + V_{C1} \cdot V + V_{C2} \cdot V^2) \cdot [1 + T_{C1} \cdot (t - t_{\text{ном}}) + T_{C2} \cdot (t - t_{\text{ном}})^2],$$

где $C_{\text{ном}}$ – номинальная емкость; C – масштабный множитель емкости; V – приложенное напряжение; V_{C1} и V_{C2} – линейный и квадратичный коэффициенты напряжения; T_{C1} и T_{C2} – линейный и квадратичный температурный коэффициенты емкости (берутся из справочника исходя из типонминала элемента).

Зависимость $C(V)$ учитывается только при расчете переходных характеристик. При расчете частотных характеристик $V_{C1} = V_{C2} = 0$.

Модель диода

Схема замещения полупроводникового диода (рис. П.2.5) состоит из идеального диода, изображенного в виде нелинейного зависимого источника тока $I(V)$, емкости p – n -перехода C и объемного сопротивления R_S . Параметры математической модели диода приведены в табл. П.2.2

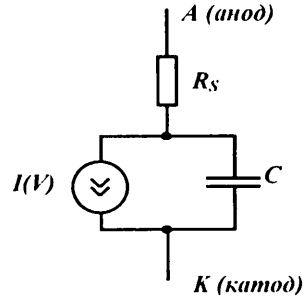


Рис. П.2.5. Нелинейная модель полупроводникового диода

Таблица П.2.2. Параметры модели диода

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
A_F	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	–	1
B_V	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)	В	е
C_{JO}	Барьерная емкость при нулевом смещении	Ф	0
E_G	Ширина запрещенной зоны	эВ	1.11
F_C	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещенного перехода	–	0,5
I_{BV}	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению B_V	А	10^{-10}
I_{BVL}	Начальный ток пробоя низкого уровня	А	0
I_{KF}	Предельный ток при высоком уровне инжекции	А	е
I_S	Ток насыщения при температуре 27 °С	А	10^{-14}
I_{SR}	Параметр тока рекомбинации	А	0
K_F	Коэффициент фликкер-шума	–	0

Таблица П.2.2. Параметры модели диода (окончание)

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
M	Коэффициент лавинного умножения	–	0.5
N	Коэффициент инжекции	–	1
N_{BV}	Коэффициент неидеальности на участке пробоя	–	1
N_{BV2}	Коэффициент неидеальности на участке пробоя низкого уровня	–	1
N_R	Коэффициент эмиссии для тока I_{SR}	–	2
R_S	Объемное сопротивление	Ом	0
T_{BV1}	Линейный температурный коэффициент B_V	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{BV2}	Квадратичный температурный коэффициент B_V	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	0
T_{IKF}	Линейный температурный коэффициент I_{KF}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{RS1}	Линейный температурный коэффициент R_S	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{RS2}	Квадратичный температурный коэффициент R_S	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	0
T_T	Время переноса заряда	с	0
$T\_MEASURED$	Температура измерений	$^{\circ}\text{C}$	–
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	$^{\circ}\text{C}$	–
T_REL_LOCAL	Разность между температурой диода и модели-прототипа	$^{\circ}\text{C}$	–
V_J	Контактная разность потенциалов	В	1
X_n	Температурный коэффициент тока насыщения	–	3

Температурная зависимость

Зависимость параметров элементов эквивалентной схемы диода от температуры устанавливается с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 I_S(T) &= I_S \exp \{ E_G(T) / [N \cdot V_i(T)] T / T_{\text{ном}} - 1 \} \cdot (T / T_{\text{ном}})^{X_n/N}; \\
 I_{SR}(T) &= I_{SR} \exp \{ E_G(T) / [N \cdot V_i(T)] T / T_{\text{ном}} - 1 \} \cdot (T / T_{\text{ном}})^{X_n/N}; \\
 I_{KF}(T) &= I_{KF} [1 + T_{IKF}(T - T_{\text{ном}})]; \\
 B_V(T) &= B_V [1 + T_{BV1}(T - T_{\text{ном}}) + T_{BV2}(T - T_{\text{ном}})^2]; \\
 R_S(T) &= R_S [1 + T_{RS1}(T - T_{\text{ном}}) + T_{RS2}(T - T_{\text{ном}})^2]; \\
 V_J(T) &= V_J T / T_{\text{ном}} - 3 V_i(T) \ln(T / T_{\text{ном}}) - E_G(T_{\text{ном}}) T / T_{\text{ном}} T + E_G(T); \\
 C_{JO}(T) &= C_{JO} \{ 1 + M [0,0004 (T - T_{\text{ном}}) + 1 - V_J(T) / V_J] \}; \\
 K_F(T) &= K_F V_J(T) / V_J; \\
 A_F(T) &= A_F V_J(T) / V_J; \\
 E_G(T) &= E_{G0} - aT^2 / (b + T),
 \end{aligned}$$

где $E_G(T_{\text{ном}})$ – ширина запрещенной зоны при номинальной температуре (1,11 эВ для кремния; 0,67 эВ для германия; 0,69 эВ для диодов с барьером Шоттки при температуре 27 $^{\circ}\text{C}$). Значения параметров I_S , V_i , V_J , C_{JO} , K_F , A_F , E_G берутся для номи-

нальной температуры $T_{\text{ном}}$; для кремния $E_{G0} = 1,16$ эВ, $a = 7 \cdot 10^{-4}$, $b = 1108$; $X_{\text{П}} = 3$ для диодов с $p-n$ -переходом и $X_{\text{П}} = 2$ для диодов с барьером Шоттки.

Приведенные выше выражения описывают диоды с $p-n$ -переходом, включая и стабилитроны. Диоды с барьером Шоттки также характеризуются этими зависимостями, но они обладают очень малым временем переноса $T_T \rightarrow 0$ и более чем на два порядка большими значениями тока диода I . При этом ток насыщения определяется зависимостью $I_S = K \cdot T \cdot \exp(-\phi_b / V_i)$, где K – эмпирическая константа; ϕ_b – высота барьера Шоттки.

Модель биполярного транзистора

В программе OrCAD 9.2 используется схема замещения биполярного транзистора в виде адаптированной модели Гуммеля – Пуна, которая по сравнению с исход-

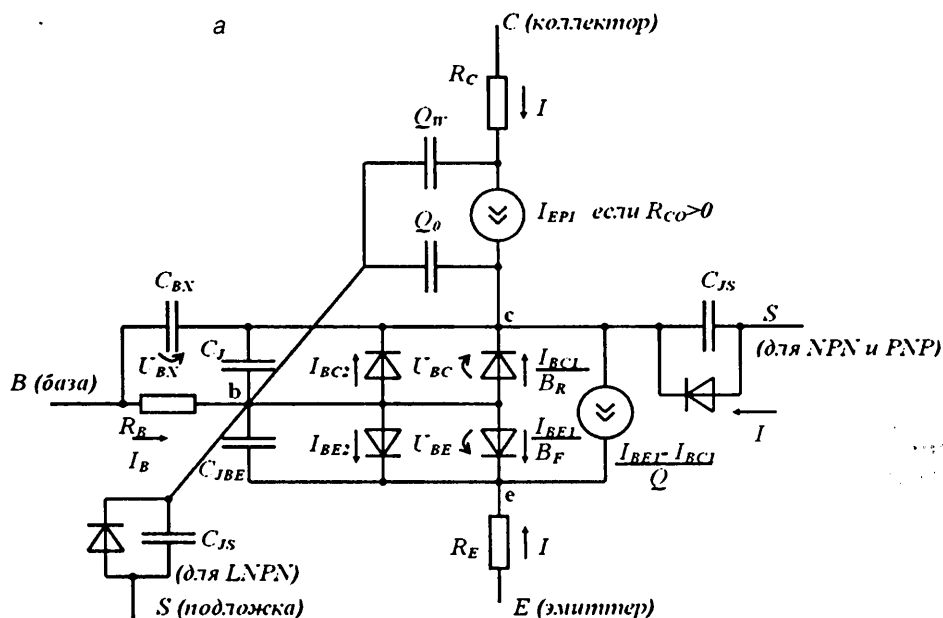


Рис. П.2.6. Схема замещения биполярного $p-n-p$ -транзистора: а – модель Гуммеля – Пуна; б – передаточная модель Эберса – Молла; принятые обозначения: I_B – ток базы; I_C – ток коллектора; I_{BE} – ток коллектора в нормальном режиме; I_{BC1} – ток коллектора в инверсном режиме; I_{BE2} , I_{BC2} – составляющие тока перехода база–эмиттер, вызванные неидеальностью перехода; I_S – ток подложки; U_{BE} , U_{BC} – напряжения на переходе внутренняя база–эмиттер и внутренняя база–коллектор; U_{BS} – напряжение внутренняя база–подложка; U_{BN} – напряжение внутренняя база–подложка для режима квазинасыщения; U_{BS} – напряжение база–внутренний коллектор; U_{CB} – напряжение внутренний коллектор–внутренний эмиттер; U_{JS} – напряжение внутренний коллектор–подложка для NPN-транзистора, напряжение внутренняя подложка–коллектор для PNP-транзистора или напряжение внутренняя база–подложка для LPNP-транзистора

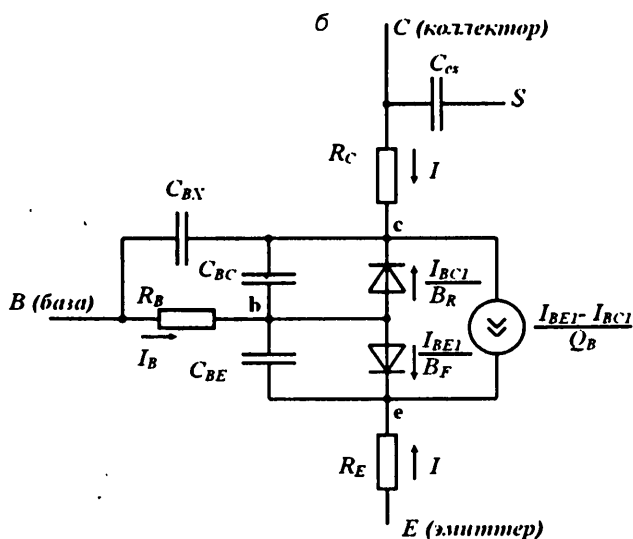


Рис. П.2.6. Схема замещения биполярного n - p - n -транзистора (окончание)

ной моделью позволяет учесть эффекты, возникающие при больших смещениях на переходах. Эта модель автоматически упрощается до более простой модели Эберса – Молла, если опустить некоторые параметры. Эквивалентные схемы этих моделей для n - p - n -структуры изображены на рис. П.2.6. Параметры полной математической модели биполярного транзистора приведены в табл. П.2.3.

Таблица П.2.3. Параметры модели биполярного транзистора

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
A_F	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	–	1
B_F	Максимальный коэффициент передачи тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ (без учета токов утечки)	–	100
B_R	Максимальный коэффициент передачи тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ	–	1
C_{JC}	Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	Ф	0
C_{JE}	Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	пФ	0
$C_{JS} (C_{CS})$	Емкость коллектор–подложка при нулевом смещении	Ф	0

Таблица П.2.3. Параметры модели биполярного транзистора (продолжение)

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
E_G	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
F_C	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов		0,5
$GAMMA$	Коэффициент легирования эпитаксиальной области	А	10^{-11}
$I_{KF}(I_K)^*$	Ток начала спада зависимости B_F от тока коллектора в нормальном режиме		∞
I_{KR}^*	Ток начала спада зависимости B_R от тока эмиттера в инверсном режиме	А	∞
I_{RB}^*	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50% полного перепада между Rb и Rbm	А	∞
I_S	Ток насыщения при температуре 27 °С	А	10^{-16}
$I_{SC}(C4)^*$	Ток насыщения утечки перехода база–коллектор	А	0
$I_{SE}(C2)^*$	Ток насыщения утечки перехода база–эмиттер	А	0
I_{SS}	Обратный ток p – n -перехода подложки	А	0
I_{TF}	Ток, характеризующий зависимость T_F от тока коллектора при больших токах	А	0
K_F	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума		0
$M_{JC}(M_C)$	Коэффициент, учитывающий плавность коллекторного перехода		0,33
$M_{JE}(M_E)$	Коэффициент, учитывающий плавность эмиттерного перехода		0,33
$M_{JS}(M_S)$	Коэффициент, учитывающий плавность перехода коллектор–подложка		0
N_C^*	Коэффициент неидеальности коллекторного перехода		1,5
N_E^*	Коэффициент неидеальности перехода база–эмиттер		1,5
N_F	Коэффициент неидеальности в нормальном режиме		1
N_K	Коэффициент, определяющий множитель Q_B		0,5
N_R	Коэффициент неидеальности в инверсном режиме		1

Таблица П.2.3. Параметры модели биполярного транзистора (продолжение)

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
N_S	Коэффициент неидеальности перехода подложки		1
P_{TF}	Дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора $f_{гр} = 1 / (2\pi TF)$	град.	0
Q_{CO}	Множитель, определяющий заряд в эпитаксиальной области	Кл	0
R_B	Объемное сопротивление базы (максимальное) при нулевом смещении перехода база-эмиттер	Ом	0
R_{BM}^*	Минимальное сопротивление базы при больших токах	Ом	RB
R_C	Объемное сопротивление коллектора	Ом	0
R_{CO}	Сопротивление эпитаксиальной области	Ом	0
R_E	Объемное сопротивление эмиттера	Ом	0
T_F	Время переноса заряда через базу в нормальном режиме	с	0
T_R	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме	с	0
T_{RB1}	Линейный температурный коэффициент R_B	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{RB2}	Квадратичный температурный коэффициент R_B	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	0
T_{RC1}	Линейный температурный коэффициент R_B	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{RC2}	Квадратичный температурный коэффициент R_C	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	0
T_{RE1}	Линейный температурный коэффициент R_E	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{RE2}	Квадратичный температурный коэффициент R_E	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	0
T_{RM1}	Линейный температурный коэффициент R_{BM}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	0
T_{RM2}	Квадратичный температурный коэффициент R_{BM}	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	0
T_{ABS}	Абсолютная температура	$^{\circ}\text{C}$	-
$T_{MEASURED}$	Температура измерений	$^{\circ}\text{C}$	-
T_{REL_GLOBAL}	Относительная температура	$^{\circ}\text{C}$	-
T_{REL_LOCAL}	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа	$^{\circ}\text{C}$	-
$V_{AF}(V_A)^*$	Напряжение Эрли в нормальном режиме	В	∞
$V_{AR}(V_B)^*$	Напряжение Эрли в инверсном режиме	В	∞

Таблица П.2.3. Параметры модели биполярного транзистора (окончание)

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
$V_{JC}(P_C)$	Контактная разность потенциалов перехода база–коллектор	В	0,75
$V_{JE}(P_E)$	Контактная разность потенциалов перехода база–эмиттер	В	0,75
$V_{JS}(P_S)$	Контактная разность потенциалов перехода коллектор–подложка	В	0,75
V_O	Напряжение, определяющее перегиб зависимости тока эпитаксиальной области	В	10
V_{TF}	Напряжение, характеризующее зависимость T_F от смещения база–коллектор	В	∞
X_{QJC}	Коэффициент расщепления емкости база–коллектор C_{JC}	–	1
X_{QCS}	Коэффициент расщепления емкости база–коллектор C_{JC}	–	1
X_{TB}	Температурный коэффициент B_F и B_R	–	0
X_{TF}	Коэффициент, определяющий зависимость T_F от смещения база–коллектор	–	0
$X_{TI}(P_T)$	Температурный коэффициент I_S	–	3

* Только для модели Гуммеля – Пуна.

Примечание. В круглых скобках в левой графе таблицы указаны альтернативные обозначения параметров. Параметр R_B для модели Эберса – Молла имеет смысл объемного сопротивления базы, не зависящего от тока базы. Остальные параметры имеют одинаковый смысл для моделей Эберса – Молла и Гуммеля – Пунна.

Температурная зависимость

Зависимость параметров элементов эквивалентной схемы биполярного транзистора от температуры устанавливается с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 I_S(t) &= I_S \cdot \exp[E_G(t) / V_i(t) \cdot (t / t_{\text{ном}} - 1)] \cdot (t / t_{\text{ном}})^{X_{TI}}; \\
 I_{SE}(t) &= (I_{SE} / b_f) \cdot \exp[E_G(t) / (N_E \cdot V_i(t)) \cdot (t / t_{\text{ном}} - 1)] \cdot (t / t_{\text{ном}})^{X_{TI}/N_E}; \\
 I_{SC}(t) &= (I_{SC} / b_f) \cdot \exp[E_G(t) / (N_C \cdot V_i(t)) \cdot (t / t_{\text{ном}} - 1)] \cdot (t / t_{\text{ном}})^{X_{TI}/N_C}; \\
 I_{SS}(t) &= (I_{SS} / b_f) \cdot \exp[E_G(t) / (N_S \cdot V_i(t)) \cdot (t / t_{\text{ном}} - 1)] \cdot (t / t_{\text{ном}})^{X_{TI}/N_S}; \\
 B_F(t) &= B_F \cdot b_f, B_R(t) = B_R \cdot b_f, b_f = (t / t_{\text{ном}})^{X_{TB}}; \\
 R_E(t) &= R_E [1 + T_{RE1}(t - t_{\text{ном}}) + T_{RE2}(t - t_{\text{ном}})^2]; \\
 R_B(t) &= R_B [1 + T_{RB1}(t - t_{\text{ном}}) + T_{RB2}(t - t_{\text{ном}})^2]; \\
 R_{BM}(t) &= R_{BM} [1 + T_{RM1}(t - t_{\text{ном}}) + T_{RM2}(t - t_{\text{ном}})^2]; \\
 R_C(t) &= R_C [1 + T_{RC1}(t - t_{\text{ном}}) + T_{RC2}(t - t_{\text{ном}})^2];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{JE}(t) &= V_{JE} \cdot t / t_{\text{ном}} - 3 \cdot V_i \cdot \ln(t / t_{\text{ном}}) - E_G(t_{\text{ном}}) \cdot t / t_{\text{ном}} + E_G(t); \\
 V_{JC}(t) &= V_{JC} \cdot t / t_{\text{ном}} - 3 \cdot V_i \cdot \ln(t / t_{\text{ном}}) - E_G(t_{\text{ном}}) \cdot t / t_{\text{ном}} + E_G(t); \\
 V_{JS}(t) &= V_{JS} \cdot t / t_{\text{ном}} - 3 \cdot V_i \cdot \ln(t / t_{\text{ном}}) - E_G(t_{\text{ном}}) \cdot t / t_{\text{ном}} + E_G(t); \\
 C_{JE}(t) &= C_{JE} \{ 1 + M_{JE} [0,0004(t - t_{\text{ном}}) + 1 - V_{JE}(t) / V_{JE}] \}; \\
 C_{JC}(t) &= C_{JC} \{ 1 + M_{JC} [0,0004(t - t_{\text{ном}}) + 1 - V_{JE}(t) / V_{JC}] \}; \\
 C_{JS}(t) &= C_{JS} \{ 1 + M_{JS} [0,0004(t - t_{\text{ном}}) + 1 - V_{JE}(t) / V_{JS}] \}; \\
 K_F(t) &= K_F V_{JC}(t) / V_{JC}; \\
 A_F(t) &= A_F V_{JC}(t) / V_{JC}.
 \end{aligned}$$

Модель полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (*JunctionFET*) описываются моделью Шихмана – Ходжеса в соответствии с эквивалентной схемой, представленной на рис. П.2.7. Параметры модели полевого транзистора приведены в табл. П.2.4.

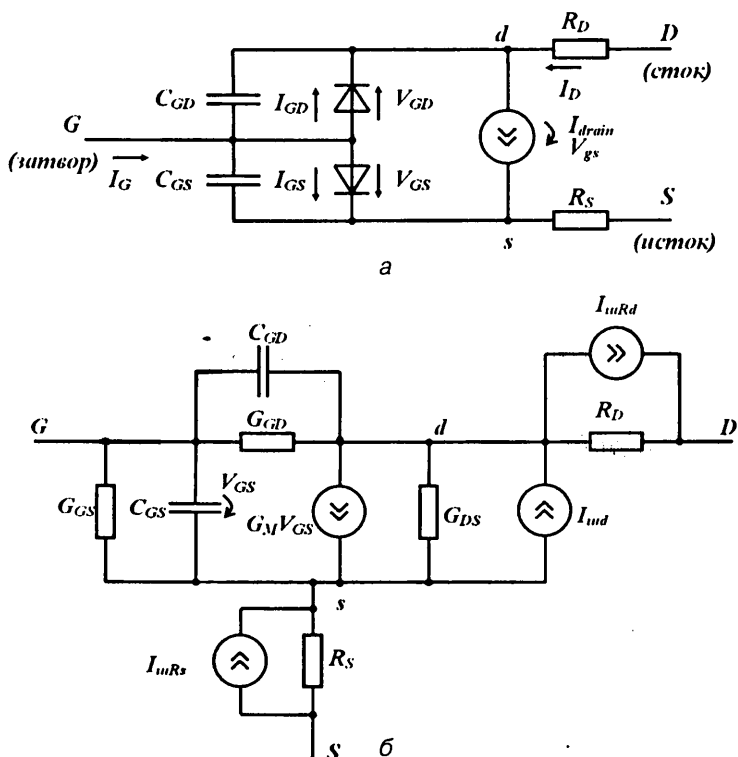


Рис. П.2.7. Нелинейная (а) и линейная (б) схемы замещения полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и каналом *n*-типа

Таблица П.2.4. Параметры модели полевого транзистора

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
A_f	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	–	1
$ALFA$	Коэффициент ионизации	В	0
$BETA$	Коэффициент пропорциональности	А/В	10^{-4}
$BETATCE$	Температурный коэффициент BETA	%/°C	0
C_{GD}	Емкость перехода затвор–сток при нулевом смещении	Ф	0
C_{GS}	Емкость перехода затвор–исток при нулевом смещении	Ф	0
F_c	Коэффициент нелинейности емкостей переходов при прямом смещении	–	0,5
I_s	Ток насыщения p – n -перехода затвор–канал	А	10^{-14}
I_{SR}	Параметр тока рекомбинации p – n -перехода затвор–канал	А	0
K_f	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума	–	0
$LAMBDA$	Параметр модуляции длины канала	1/В	0
M	Коэффициент лавинного умножения обедненного p – n -перехода затвор–канал	–	0,5
N	Коэффициент неидеальности p – n -перехода затвор–канал	–	1
N_R	Коэффициент эмиссии для тока I_{SR}	–	2
P_B	Контактная разность потенциалов p – n -перехода затвора	В	1
R_D	Объемное сопротивление области стока	Ом	0
R_S	Объемное сопротивление области истока	Ом	0
T_{ABS}	Абсолютная температура	°C	–
$T_{MEASURED}$	Температура измерений	°C	–
T_{REL_GLOBAL}	Относительная температура	°C	–
T_{REL_LOCAL}	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа	°C	–
V_K	Напряжение ионизации для перехода затвор–канал	В	0
V_{T0}	Пороговое напряжение	В	–2
V_{T0TC}	Температурный коэффициент V_{T0}	В / °C	0
X_{T1}	Температурный коэффициент тока I_s	–	3

Полевой транзистор обедненного типа характеризуется отрицательными значениями $V_{T0} < 0$ (для каналов p - и n -типа), а транзистор обогащенного типа – положительными $V_{T0} \geq 0$.

На схеме, приведенной на рис П2.7б, дополнительно включены источники флуктуационных токов. Тепловые шумы, создаваемые резисторами R_S , R_D , имеют спектральные плотности: $S_{RS} = 4kT / R_S$, $S_{RD} = 4kT / R_D$.

Источник тока I_{wd} , характеризующий дробовой и фликкер-шум, имеет спектральную плотность $S_D = 8kT \cdot G_M / 3 + K_F I_{drain}^A / f$, где $G_M = dI_{drain} / dV_{GS}$ – дифференциальная проводимость в рабочей точке по постоянному току.

Температурная зависимость

$$V_{TO}(t) = V_{TO} + V_{TOTC} \cdot (t - t_{nom});$$

$$BETA(t) = BETA \cdot 1,01^{BETATCE(t - t_{nom})};$$

$$I_S(t) = I_S \cdot \exp[E_C(t_{nom}) / (N \cdot V_t) \cdot (t / t_{nom} - 1)] \cdot (t / t_{nom})^{X_{TI}/N};$$

$$I_{SR}(t) = I_{SR} \cdot \exp[E_C(t_{nom}) / (N_R \cdot V_t) \cdot (t / t_{nom} - 1)] \cdot (t / t_{nom})^{X_{TI}/N_P};$$

$$P_B(t) = P_B \cdot t / t_{nom} - 3V_t \ln(t / t_{nom}) - E_C(t_{nom}) \cdot t / t_{nom} + E_C(t);$$

$$C_{GS}(t) = C_{GS} \{1 + M[0,0004(t - t_{nom}) + 1 - P_B(t) / P_B]\};$$

$$C_{GD}(t) = C_{GD} \{1 + M[0,0004(t - t_{nom}) + 1 - P_B(t) / P_B]\};$$

$$K_F(t) = K_F \cdot P_B(t) / P_B;$$

$$AF(t) = A_F \cdot P_B(t) / P_B.$$

Модель полевого транзистора с изолированным затвором

Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы, *MOSFET*) описываются шестью разными системами уравнений, выбор которых осуществляется параметром *LEVEL*, принимающим значения 1–6. Модель первого уровня (*LEVEL* = 1) используется в тех случаях, когда не предъявляются высокие требования к точности моделирования вольт-амперных характеристик транзистора, в частности при моделировании МОП-транзисторов с коротким или узким каналом. Модели второго (*LEVEL* = 2) и третьего (*LEVEL* = 3) уровней учитывают более тонкие физические эффекты. Параметры модели четвертого–шестого уровней (*LEVEL* = 4 – 6) рассчитываются по справочным данным с помощью специальной программы идентификации. Все модели имеют одну и ту же эквивалентную схему, изображенную на рис. П.2.8а.

Параметры моделей МОП-транзистора уровней 1–4 приведены в табл. П.2.5.



6

Таблица П.2.5. Параметры модели МОП-транзистора

Имя параметра	Уровень модели	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
A_F	1–4	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	–	1
C_{BD}	1–4	Емкость донной части перехода сток–подложка при нулевом смещении	Ф	0
C_{BS}	1–4	Емкость донной части перехода исток–подложка при нулевом смещении	Ф	0
C_{GB0}	1–4	Удельная емкость перекрытия затвор–подложка (за счет выхода затвора за пределы канала)	Ф/м	0

Таблица П.2.5. Параметры модели МОП-транзистора (продолжение)

Имя параметра	Уровень модели	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
$C_{\text{до}}$	1–4	Удельная емкость перекрытия затвор–сток на длину канала (за счет боковой диффузии)	Ф/м	0
$C_{\text{со}}$	1–4	Удельная емкость перекрытия затвор–исток (за счет боковой диффузии)	Ф/м	0
C_j	1–4	Удельная емкость донной части p – n -перехода сток (исток) – подложка при нулевом смещении (на площадь перехода)	Ф/м ²	0
C_{jsw}	1–4	Удельная емкость боковой поверхности перехода сток (исток) – подложка при нулевом смещении (на длину периметра)	Ф/м	0
Δ	2,3	Коэффициент влияния ширины канала на пороговое напряжение	–	0
η	3	Параметр влияния напряжения сток–исток на пороговое напряжение (статическая обратная связь)	–	0
F_c	1–4	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода подложки	–	0,5
γ	1–3	Коэффициент влияния потенциала подложки на пороговое напряжение	–	Вычисляется
I_s	1–4	Ток насыщения p – n -перехода сток–подложка (исток–подложка)	А/м ²	10 ^{–14}
J_s	1–4	Плотность тока насыщения перехода сток (исток) – подложка	А/м ²	0
J_{ssw}	1–4	Удельная плотность тока насыщения (на длину периметра)	А/м	0
κ	3	Параметр модуляции длины канала напряжением сток–исток	–	0,2
K_p	1–3	Параметр удельной крутизны	–	2–10 ⁵
K_f	1–4	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума	–	0
L	1–4	Длина канала	м	DEFL
λ	1,2	Параметр модуляции длины канала	1/В	0
L_D	1–3	Длина области боковой диффузии	м	0
M_j	1–4	Коэффициент, учитывающий плавность перехода подложка–сток (исток)	–	0,5
M_{jsw}	1–4	Коэффициент наклона боковой поверхности перехода подложка–сток (исток)	–	0,3
N	1–4	Коэффициент неидеальности перехода подложка–сток	–	1

Таблица П.2.5. Параметры модели МОП-транзистора (продолжение)

Имя параметра	Уровень модели	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
N_{EFF}	2	Эмпирический коэффициент коррекции концентрации примесей в канале	–	1
N_{FS}	2,3	Плотность быстрых поверхностных состояний на границе кремний – подзатворный оксид	1/см ²	0
N_{SS}	2,3	Плотность медленных поверхностных состояний на границе кремний – подзатворный оксид	1/см ²	Нет
N_{SUB}	1–3	Уровень легирования подложки	1/см ³	Нет
P_B	1–4	Напряжение инверсии приповерхностного слоя подложки	В	0,8
P_{BSW}	1–4	Напряжение инверсии боковой поверхности p – n -перехода	В	P_B
P_{HI}	1–3	Поверхностный потенциал сильной инверсии	В	0,6
R_B	1–4	Объемное сопротивление подложки	Ом	0
R_{DS}	1–4	Сопротивление утечки сток–исток	Ом	∞
R_G	1–4	Объемное сопротивление затвора	Ом	0
R_S	1–4	Объемное сопротивление истока	Ом	0
R_{SH}	1–4	Удельное сопротивление диффузионных областей истока и стока	Ом/кв	0
T_{HETA}	3	Коэффициент модуляции подвижности носителей под влиянием вертикального поля	1/В	0
T_{OX}	1–3	Толщина оксида	м	Вычисляется
T_{IN}	2,3	Легирование затвора (+1 – примесью того же типа, как и для подложки; –1 – примесью противоположного типа; 0 – металл)	–	1
T_{ABS}	1–4	Абсолютная температура	°С	–
T_{REL_GLOBAL}	1–4	Относительная температура	°С	–
T_{REL_LOCAL}	1–4	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа	°С	–
U_{CRIT}	2	Критическая напряженность вертикального поля, при которой подвижность носителей уменьшается в два раза	В/см	10 ⁴
U_{EXP}	2	Эмпирическая константа, определяющая подвижность носителей	–	0
U_O	1–3	Подвижность носителей тока в инверсном слое канала	см ² /В/с	600
V_{MAX}	2,3	Максимальная скорость дрейфа носителей	м/с	∞
V_{TD}	1–3	Пороговое напряжение при нулевом смещении подложки	В	1

Таблица П.2.5. Параметры модели МОП-транзистора (окончание)

Имя параметра	Уровень модели	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
W	1–4	Ширина канала	м	DEFW
W_D	1–3	Ширина области боковой диффузии	м	0
X_j	2,3	Глубина металлургического перехода областей стока и истока	м	0
X_{QC}	2,3	Доля заряда канала, ассоциированного со стоком	0	

По умолчанию, если параметр *LEVEL* не указан при описании модели, используется модель МОП-транзистора первого типа.

Параметры модели, характерные только для модели четвертого типа, приведены в табл. П.2.6.

Таблица П.2.6. Параметры модели МОП-транзистора

Имя параметра	Параметр	Размерность
D_{ELL}	Уменьшение ширины переходов стока и истока по умолчанию	м
D_L	Уменьшение эффективной длины канала	м
D_W	Уменьшение эффективной ширины канала	м
E_{TA}	Коэффициент, отражающий зависимость порогового напряжения от смещения подложка–сток	–
V_{FB}	Напряжение плоских зон	В
P_{III}	Контактная разность потенциалов инверсного слоя перехода	В
K_1	Коэффициент влияния подложки	–
K_2	Коэффициент разделения заряда обедненной области между стоком и истоком	–
M_{US}	Подвижность носителей при нулевом смещении на подложке и $V_{DS} = V_{DD}$	$\text{см}^2/\text{В}^2 \cdot \text{с}$
M_{UZ}	Подвижность носителей при нулевом смещении	$\text{см}^2/\text{В}^2 \cdot \text{с}$
N_B	Чувствительность коэффициента наклона проходной характеристики в субпороговом режиме к смещению на подложке	–
N_D	Чувствительность коэффициента наклона проходной характеристики в субпороговом режиме к смещению на стоке	–
N_0	Коэффициент наклона проходной характеристики в субпороговом режиме при нулевом смещении на подложке	–
<i>TEMP</i>	Температура, при которой измерены параметры транзистора	°С
T_{ox}	Толщина оксида затвора	м
U_0	Коэффициент, отражающий изменение подвижности от напряженности вертикального поля	В

Таблица П.2.6. Параметры модели МОП-транзистора (окончание)

Имя параметра	Параметр	Размерность
U_1	Коэффициент, определяющий степень насыщения скорости носителей от напряжения на стоке	м/В
V_{DD}	Коэффициент влияния напряжения смещения	–
DF	Ширина переходов стока и истока по умолчанию	м
X_{PRT}	Флаг, определяющий распределение зарядов между стоком и истоком (при $X_{PRT} = 0$ устанавливается соотношение зарядов сток–исток, равное 40/60, при $X_{PRT} = 1$ – соотношение 0/100)	–
$X2_E$	Чувствительность уровня индуцированного слоя к смещению на подложке	В
$X2_{MS}$	Чувствительность подвижности носителей к смещению на подложке при $V_{DS} = 0$	см ² /В ² ·с
$X2_{MZ}$	Чувствительность подвижности носителей к смещению на подложке при $V_{DS} = 0$	см ² /В ² ·с
$X2_{CO}$	Чувствительность критической подвижности носителей к смещению на подложке	В ⁻²
$X2_{U1}$	Чувствительность максимальной скорости носителей к напряжению смещения на подложке	м/В ²
$X3_E$	Чувствительность уровня индуцированного слоя к смещению на стоке при $V_{DS} = V_{DD}$	В
$X3_{MS}$	Чувствительность подвижности носителей к смещению на стоке при $V_{DS} = V_{DD}$	см ² /В ² ·с
$X3_{U1}$	Чувствительность максимальной скорости носителей к напряжению смещения на стоке при $V_{DS} = V_{DD}$	м/В ²

Примечание. V_{DD} – напряжение, при котором проводятся измерения (обычно оно равно напряжению питания).

При включении МОП-транзистора в схему можно указать значения обязательных параметров (см. табл. П.2.7).

Таблица П.2.7. Необязательные параметры модели МОП-транзистора

Имя параметра	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
A_D	Площадь диффузионной области стока	м ²	DEFAD
A_S	Площадь диффузионной области истока	м ²	DEFAS
L	Длина канала	м	DEFL
M	Масштабный коэффициент	–	1
N_{RD}	Удельное относительное сопротивление стока	–	1
N_{RS}	Удельное относительное сопротивление истока	–	1
N_{RG}	Удельное относительное сопротивление затвора	–	0
N_{RB}	Удельное относительное сопротивление подпояски	–	0
P_D	Периметр диффузионной области стока	м	0
P_S	Периметр диффузионной области истока	м	0
W	Ширина канала	м	DEFW

Температурная зависимость

$$I_S(t) = I_S \cdot \exp\{[E_G(t_{\text{nom}}) \cdot t / t_{\text{nom}} - E_G(t)] / V_T\};$$

$$J_S(t) = J_S \cdot \exp\{[E_G(t_{\text{nom}}) \cdot t / t_{\text{nom}} - E_G(t)] / V_T\};$$

$$J_{SSW}(t) = J_{SSW} \cdot \exp\{[E_G(t_{\text{nom}}) \cdot t / t_{\text{nom}} - E_G(t)] / V_T\};$$

$$P_B(t) = P_B \cdot t / t_{\text{nom}} - 3V_t \ln(t / t_{\text{nom}}) - E_G(t_{\text{nom}}) \cdot t / t_{\text{nom}} + E_G(t);$$

$$P_{BSW}(t) = P_{BSW} \cdot t / t_{\text{nom}} - 3V_t \ln(t / t_{\text{nom}}) - E_G(t_{\text{nom}}) \cdot t / t_{\text{nom}} + E_G(t);$$

$$P_{HI}(t) = P_{HI} \cdot t / t_{\text{nom}} - 3V_t \ln(t / t_{\text{nom}}) - E_G(t_{\text{nom}}) \cdot t / t_{\text{nom}} + E_G(t);$$

$$E_G(T) = 1,16 - 0,000702 T^2 / (T + 1108);$$

$$C_{BD}(t) = C_{BD} \{1 + M_j [0,0004(t - t_{\text{nom}}) + 1 - P_B(t) / P_B]\};$$

$$C_{BS}(t) = C_{BS} \{1 + M_j [0,0004(t - t_{\text{nom}}) + 1 - P_B(t) / P_B]\};$$

$$C_f(t) = C_f \{1 + M_j [0,0004(t - t_{\text{nom}}) + 1 - P_B(t) / P_B]\};$$

$$C_{JSW}(t) = C_{JSW} \{1 + M_{JSW} [0,0004(t - t_{\text{nom}}) + 1 - P_B(t) / P_B]\};$$

$$K_P(t) = K_P \cdot (t - t_{\text{nom}})^{-3/2};$$

$$U_O(t) = U_O \cdot (t - t_{\text{nom}})^{-3/2};$$

$$K_F(t) = K_F \cdot P_B(t) / P_B;$$

$$AF(t) = A_F \cdot P_B(t) / P_B;$$

$$M_{US}(t) = M_{US} \cdot (t - t_{\text{nom}})^{-3/2};$$

$$M_{UZ}(t) = M_{UZ} \cdot (t - t_{\text{nom}})^{-3/2};$$

$$X3_{MS}(t) = X3_{MS} \cdot (t - t_{\text{nom}})^{-3/2}.$$

Приложение 3 Предельные эксплуатационные данные исследуемых полупроводниковых приборов



Выпрямительные диоды

	КД521В	ГД507А
Постоянное обратное напряжение	50 В	20 В
Постоянный или средний прямой ток	50 мА	16 мА
Температура окружающей среды	От 213 до 398 К	От 233 до 333 К

Стабилитроны

	КС147А	КС133А
Минимальный ток стабилизации	3 мА	3 мА
Максимальный ток стабилизации при температуре: от 213 до 323 К	58 мА	81 мА
при 398 К	19 мА	27 мА
Рассеиваемая мощность при температуре: от 213 до 323 К	300 мВт	300 мВт
при 398 К	100 мВт	100 мВт
Температура окружающей среды	От 213 до 373 К	От 213 до 373 К

Полевые транзисторы

	КП103М	КП305Д
Постоянный ток стока	12 мА	15 мА
Постоянное напряжение затвор-исток	15 В	±15 В
Постоянное напряжение сток-исток	10 В	15 В
Постоянное напряжение затвор-сток	17 В	±15 В

	КП103М	КП305Д
Постоянная рассеиваемая мощность транзистора	120 мВт	150 мВт
Температура окружающей среды	От 218 до 358 К	От 213 до 398 К

Биполярные транзисторы

	2Т312А	ГТ308Б
Постоянный ток коллектора	30 мА	50 мА
Постоянное напряжение эмиттер–база	4 В	3 В
Постоянное напряжение коллектор–база	20 В	20 В
Постоянное напряжение коллектор–эмиттер	20 В	12 В
Постоянная рассеиваемая мощность коллектора	225 мВт	150 мВт
Температура окружающей среды	От 213 до 393 К	От 213 до 343 К

Приложение 4

Варианты заданий



Таблица П.4. Варианты заданий на выполнение лабораторных исследований

Номер варианта	Вид исследования	Тип полупровод- никового прибора	Номер прибора
ДИОД			
1	Экспериментальные исследования	КД521В	1
2		КД521В	2
3		КД521В	3
4		КД521В	4
5		ГД507А	1
6		ГД507А	2
7		ГД507А	3
8		ГД507А	4
9	Исследования на основе математического моделирования	КД521В	—
10		ГД507А	—
11	Экспериментальные исследования и исследования на основе математи- ческого моделирования	КД521В	1
12		КД521В	2
13		КД521В	3
14		КД521В	4
15		ГД507А	1
16		ГД507А	2
17		ГД507А	3
18		ГД507А	4
СТАБИЛИТРОН			
19	Экспериментальные исследования	КС147А	1
20		КС147А	2
21		КС147А	3
22		КС147А	4
23		КС133А	1
24		КС133А	2
25		КС133А	3
26		КС133А	4
27	Исследования на основе математического моделирования	КС147А	—
28		КС133А	—

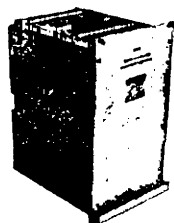
Таблица П.4. Варианты заданий на выполнение лабораторных исследований (продолжение)

Номер варианта	Вид исследования	Тип полупровод- никового прибора	Номер прибора
29	Экспериментальные исследования и исследования на основе математического моделирования	КС147А	1
30		КС147А	2
31		КС147А	3
32		КС147А	4
33	Экспериментальные исследования и исследования на основе математического моделирования	КС133А	1
34		КС133А	2
35		КС133А	3
36		КС133А	4
ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР			
37	Экспериментальные исследования	КП103М	1
38		КП103М	2
39		КП103М	3
40		КП103М	4
41		КП305Д	1
42		КП305Д	2
43		КП305Д	3
44		КП305Д	4
45	Исследования на основе математического моделирования	КП103М	–
46		КП305Д	–
47	Экспериментальные исследования и исследования на основе математического моделирования	КП103М	1
48		КП103М	2
49		КП103М	3
50		КП103М	4
51		КП305Д	1
52		КП305Д	2
53		КП305Д	3
54		КП305Д	4
БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР			
55	Экспериментальные исследования	2Т312А	1
56		2Т312А	2
57		2Т312А	3
58		2Т312А	4
59		ГТ308В	1
60		ГТ308В	2
61		ГТ308В	3
62		ГТ308В	4
63	Исследования на основе математического моделирования	2Т312А	–
64		ГТ308В	–
65	Экспериментальные исследования и исследования на основе математического моделирования	2Т312А	1
66		2Т312А	2
67		2Т312А	3
68		2Т312А	4
69		ГТ308В	1
70		ГТ308В	2
71		ГТ308В	3
72		ГТ308В	4

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ «ТРАКТ УСИЛЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ»

Назначение АПК

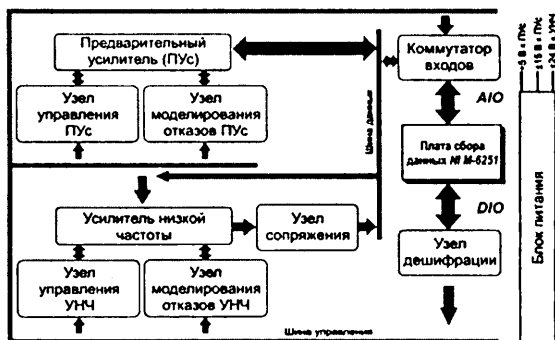
Выполнение цикла лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом для учреждений среднего и высшего профессионального образования по следующим дисциплинам: «Аналоговая схемотехника», «Диагностика РЭА», «Надежность РЭА», «САПР РЭА» и др.



Обобщенная структурная схема АПК

АПК разработан с применением последних достижений в области компьютерных измерительных технологий, обеспечивающих на системной основе применение в учебном процессе методов электронного обучения.

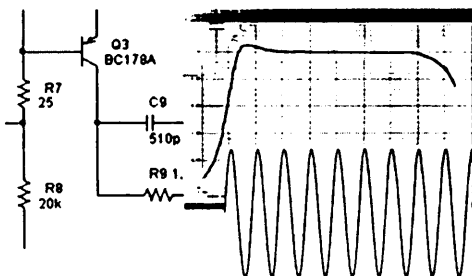
В АПК входят: предварительный усилитель (ПУс); узел управления ПУс; узел моделирования отказов ПУс; усилитель низкой частоты (УНЧ); узел управления УНЧ, обеспечивающий реконфигурацию УНЧ; узел моделирования отказов УНЧ, обеспечивающий моделирование структурных и параметрических отказов УНЧ; узел сопряжения, обеспечивающий расширение динамического диапазона платы сбора данных; коммутатор и узел дешифрации, обеспечивающие разветвление и дешифрацию сигналов управления.



Функциональные возможности АПК

Исследование характеристик ПУс и УНЧ: амплитудной характеристики, АЧХ, коэффициента усиления, полосы пропускания, коэффициента нелинейных искажений, спектра выходного сигнала. При этом для ПУс возможны: трехпозиционное регулирование АЧХ на трех частотах (50, 1000, 12000 Гц), установка трех значений коэффициента усиления.

Исследование выходного каскада УНЧ: при нескольких типоминималах транзисторов выходного каскада, нескольких значениях тока покоя и различных сопротивлениях нагрузки; измерение напряжения в ряде контрольных точек для расчета коэффициентов электрической нагрузки ЭРЭ, используемых при анализе показателей надежности.



Исследование отказов: моделирование параметрических и структурных изменений в различных каскадах УНЧ и ПУс.

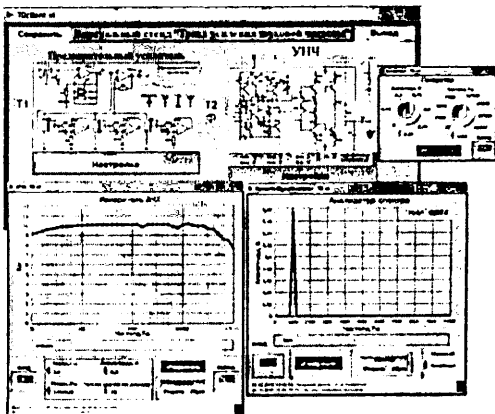
Исследование совместной работы предварительного усилителя и УНЧ.

Проведение всех вышеперечисленных исследований на основе иерархической математической модели, сформированной для системы OrCAD 9.1.

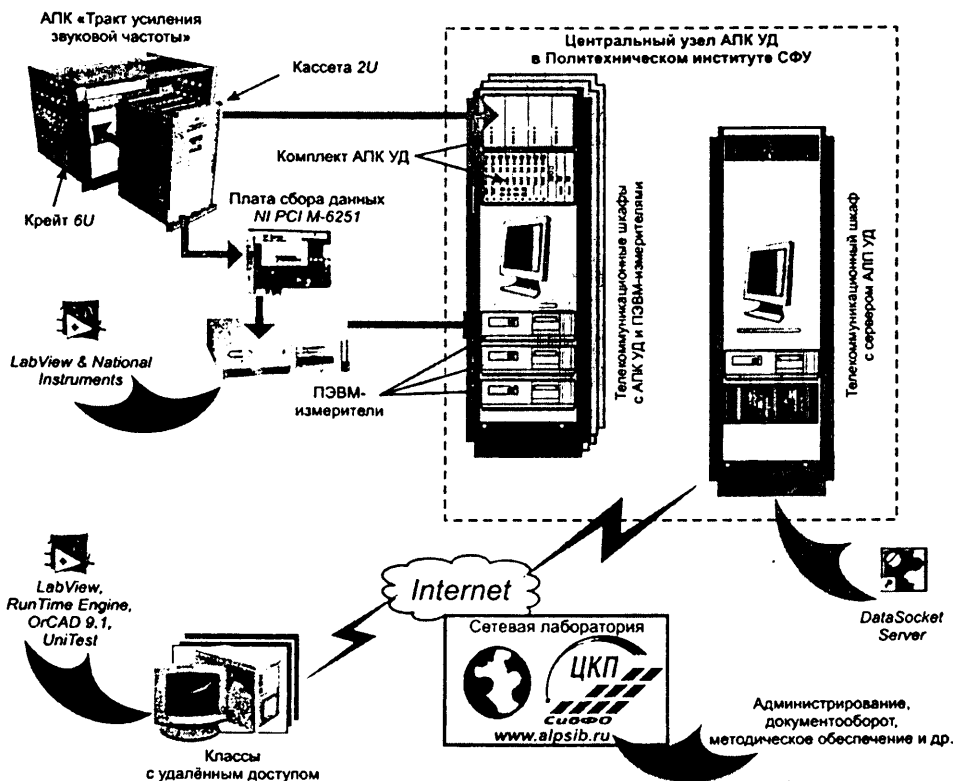
Виртуальные инструменты

Для исследования характеристик предварительного усилителя и УНЧ используется комплекс виртуальных стендов и измерительных приборов (измеритель АЧХ, генератор, осциллограф, анализатор спектра), разработанных в среде LabView.

Программное обеспечение АПК позволяет сохранять результаты измерений в формате MS Word для формирования отчетов.



Организация лабораторного практикума на базе АПК



Сетевая лаборатория [www.alpsib.ru]

Сопровождение учебного процесса с применением АПК осуществляется на базе сетевой лаборатории, которая представляет собой комплекс интерфейсов, интерактивных форм и инструментов управления учебным процессом, связанных между собой на основе системы управления базами данных посредством телекоммуникаций, позволяющих получить доступ к лабораторным практикумам по сети *Internet / Intranet*.

Сетевая лаборатория обеспечивает:

- авторизованный регламентированный доступ к образовательному контенту (методические указания, представленные в виде электронного ресурса);

- доступ к актуальной информации по вопросам работы систем АЛП УД;

- непосредственное выполнение лабораторных исследований в режиме удаленного доступа на основе АПК УД;

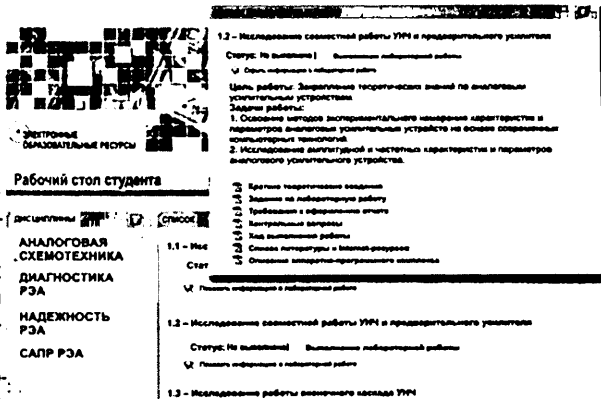
- выполнение лабораторных исследований посредством математического моделирования на ПЭВМ;

- выполнение процедуры проверки знаний студентов при помощи электронной системы тестирования UniTest;

- получение общей информации о доступных для выполнения лабораторных работах в зависимости от выбранной специальности и дисциплины;

- виртуальное общение преподавателей, студентов и административного персонала;

- организацию централизованной технической и методической поддержки преподавателей, студентов и администраторов по вопросам работы системы АЛП УД «Тракт УЗЧ» и других систем АЛП.



Интерактивное электронное техническое руководство

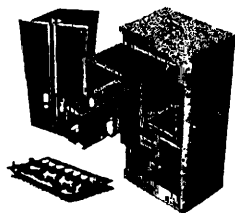
Интерактивное электронное техническое руководство, подготовленное в системе *TG Builder (Technical Guide Builder)*, позволяет получить студенту подробную информацию об АПК:

- описание структурной схемы АПК;

- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК лабораторных исследований;

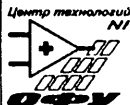
- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов и измерительных приборов;

- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК, 3D-модель конструкции АПК в целом с реализацией функций ее декомпозиции на



Форма сотрудничества

Организация доступа к АПК по сети *Internet* на согласованных условиях



660074, г. Красноярск, 74, ул. акад. Киренского, 26
тел.: +7(3912) 912-120, 912-045, факс 912-521
www.alpsib.ru, e-mail: sav@ntf.kgtu.runnet.ru



Приложение 2

Описание моделей радиокомпонентов и их параметров

При задании номиналов резисторов, конденсаторов, индуктивностей, частоты, времени и т. д. применяется масштабирование чисел с помощью следующих приставок: фемпто- $f = 10^{-15}$; пико- $p = 10^{-12}$; нано- $n = 10^{-9}$; микро- $\mu = 10^{-6}$; милли- $m = 10^{-3}$; кило- $k = 10^3$; мега- $meg = 10^6$; гига- $g = 10^9$; тера- $t = 10^{12}$.

Модели источников сигналов

Источники постоянного тока и напряжения

В системе моделирования применяют источники постоянного напряжения (VDC) и источники постоянного тока (IDC) (рис. П.2.1). Первые имеют внутреннее сопротивление, равное нулю, вторые – равное бесконечности. Параметром, характеризующим источник напряжения, является разность потенциалов, создаваемая на клеммах, для источника тока это – сила тока.



Рис. П.2.1. Модели источников постоянного питания:
I1 – источник постоянного тока; V2 – источник постоянного напряжения

Источник синусоидального сигнала

Синусоидальная функция описывается выражениями:

$$y(t) = y_0 + y_a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t / 360) \text{ при } 0 \leq t \leq t_d,$$

$$y(t) = y_0 + y_a \cdot \exp[-(t - t_d) \cdot d_f] \cdot \sin[2\pi \cdot f \cdot (t - t_d) + 2\pi \cdot \varphi / 360] \text{ при } t \leq t_d.$$

Параметры функции приведены в табл. П.2.1.

Внешние виды источников, описывающих синусоидальную зависимость тока и напряжения, приведены на рис. П.2.2.

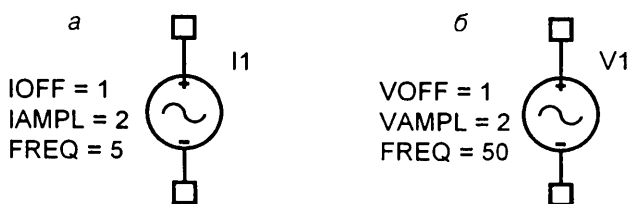


Рис. П.2.2. Источники синусоидального сигнала:
 а – источник напряжения; б – источник тока:
 VOFF, IOFF – постоянная составляющая сигнала;
 VAMPL, IAMPL – амплитуда; FREQ – частота

Таблица П.2.1. Параметры гармонического сигнала

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
y_0	Постоянная составляющая	В или А	
y_a	Амплитуда	В или А	
f	Частота	Гц	1/TSTOP
t_d	Задержка	с	0
d_f	Коэффициент затухания	1/с	0
ϕ	Фаза	град.	0

Параметры сигнала t_d , d_f , ϕ при необходимости вводятся в окне свойств (параметров) модели (рис. П.2.3).

На рис. П.2.4 приведены графики функции при различных значениях d_f :

Модель резистора

В программе OrCAD 9.2 используются две модели резисторов – идеальная и реальная. Идеальная модель резистора – это идеальный элемент, обладающий только заданным сопротивлением. В реальной модели учитываются температурные коэффициенты сопротивления, которые рассчитываются по формуле:

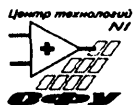
$$<R_{\text{ном}}> \cdot R[1 + T_{C1}(t - t_{\text{ном}}) + T_{C2}(t - t_{\text{ном}})],$$

где $R_{\text{ном}}$ – номинальное сопротивление; R – масштабный множитель сопротивления; T_{C1} и T_{C2} – линейный и квадратичный температурные коэффициенты сопротивления – $1/^\circ\text{C}$, $1/^\circ\text{C}^2$ (берутся из справочника исходя из типонаминала элемента, например $1200 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ для резисторов МЛТ-0,5); $t_{\text{ном}}$ – номинальная температура окружающей среды (по умолчанию 27°C); t – текущая (рабочая) температура.

Если указан экспоненциальный температурный коэффициент сопротивления, то сопротивление резистора рассчитывается по формуле

$$<R_{\text{ном}}> \cdot R \cdot 1,01^{T_{CE}(t - t_{\text{ном}})},$$

где T_{CE} – экспоненциальный температурный коэффициент.



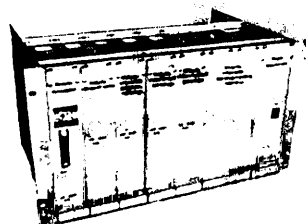
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
 Политехнический институт, радиотехнический факультет
 Красноярский региональный центр новых информационных технологий
 Региональный инновационный центр «Центр технологий National Instruments»
 Лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов



АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ «УСТРОЙСТВА ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ»

Назначение АПК

Выполнение 11 лабораторных работ в многопользовательском режиме с удалённым доступом по дисциплинам «Устройства приема и обработки сигналов», «Прием и обработка сигналов», «Методы и устройства приема сигналов» и им аналогичные.

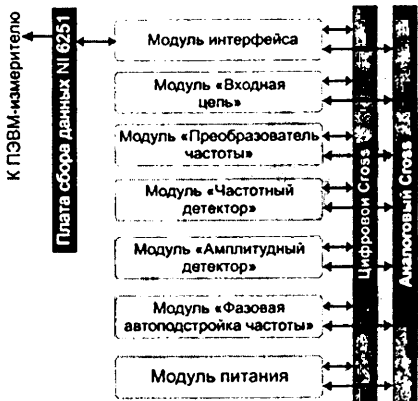


Обобщенная структурная схема АПК

АПК разработан с применением последних достижений в области компьютерных измерительных технологий, которые позволяют на системной основе применения в учебном процессе методов электронного обучения.

В состав АПК «Устройства приема и обработки сигналов», входят модули: «Частотный детектор» (введен в эксплуатацию); «Входная цепь» (введен в эксплуатацию); «Амплитудный детектор» (в стадии ввода в эксплуатацию); «Преобразователь частоты» (в стадии ввода в эксплуатацию); «Фазовая автоподстройка частоты» (в стадии разработки).

Плата сбора данных обеспечивает оцифровку аналоговых сигналов и формирование цифровых управляющих сигналов.

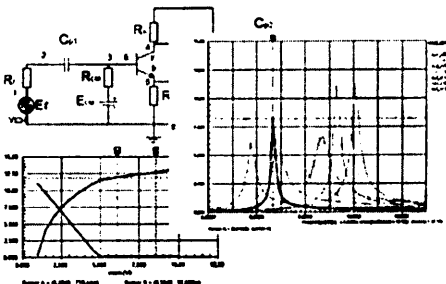


Функциональные возможности АПК

Исследование одноконтурных входных цепей, работающих в диапазоне сотен килогерц - единиц мегагерц с ненастроенной антенной и электронной перестройкой собственной частоты контура, выполненных по схемам с внешнеемкостной связью, индуктивной связью антенны с контуром (в режиме удлинения) и комбинированной связью.

Исследование процесса преобразования частоты входного сигнала на основе: аналогового перемножения входного сигнала и сигнала гетеродина на дифференциальном каскаде; аналогового перемножения с помощью двойного балансного смесителя; нелинейного преобразования на диодном кольцевом балансном смесителе.

Исследование процесса детектирования ЧМ-сигналов, выполняемого на основе: преобразования изменения частоты колебания в изменение амплитуды или фазы с последующим детектированием с помощью амплитудного детектора.



Исследование основных характеристик и параметров амплитудных детекторов.

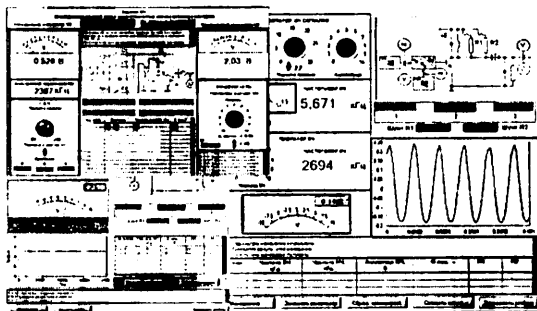
Исследование процесса фазовой автоподстройки частоты.

Проведение всех вышеперечисленных исследований на основе математической модели, сформированной для системы *OrCAD 9.1*.

Виртуальные инструменты

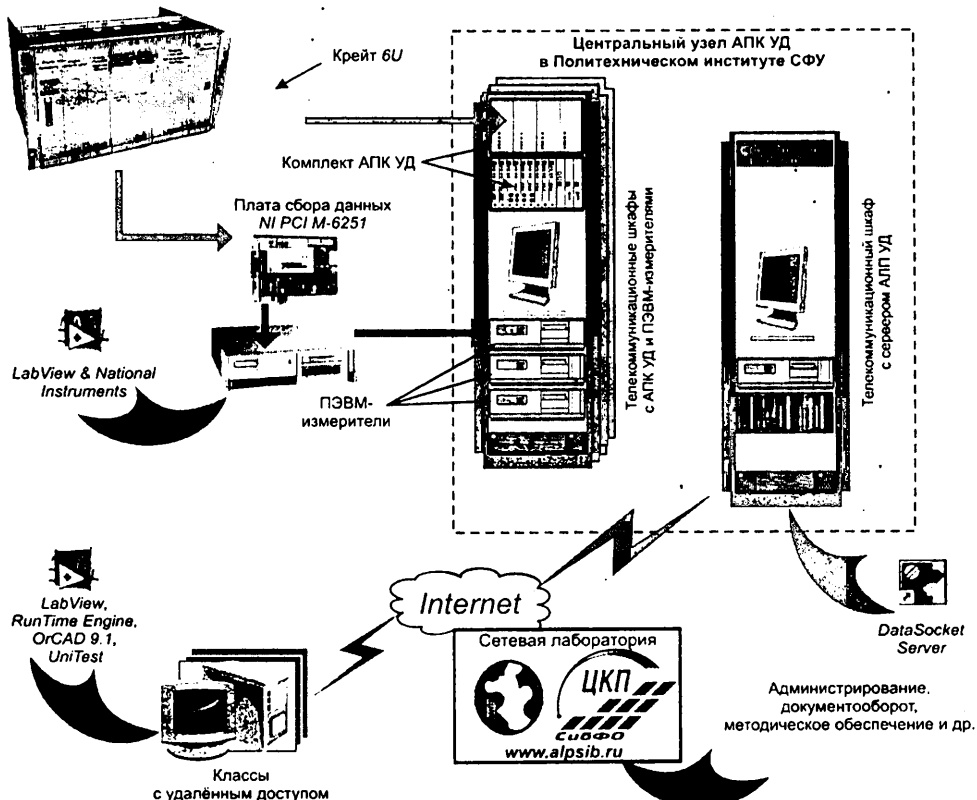
Для исследования характеристик и параметров, а также процессов протекающих в основных модулях устройств приема и обработки сигналов, используется комплекс виртуальных стендов, разработанных в среде *LabView*.

Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word* для формирования отчетов.



Организация лабораторного практикума на базе АПК

АПК «Устройства приема и обработки сигналов»



Сетевая лаборатория [www.alpsib.ru]

Сопровождение учебного процесса с применением АПК осуществляется на базе сетевой лаборатории, которая представляет собой комплекс интерфейсов, интерактивных форм и инструментов управления учебным процессом, связанных между собой на основе системы управления базами данных посредством телекоммуникаций, позволяющих получить доступ к лабораторным практикумам по сети *Internet / Intranet*.

Сетевая лаборатория обеспечивает:

- авторизованный регламентированный доступ к образовательному контенту (методические указания, представленные в виде электронного ресурса);
- доступ к актуальной информации по вопросам работы систем АПП УД;
- непосредственное выполнение лабораторных исследований в режиме удаленного доступа на основе АПК УД;
- выполнение лабораторных исследований посредством математического моделирования на ПЭВМ;
- выполнение процедуры проверки знаний студентов при помощи электронной системы тестирования UniTest;
- получение общей информации о доступных для выполнения лабораторных работах в зависимости от выбранной специальности и дисциплины;
- виртуальное общение преподавателей, студентов и административного персонала;
- организацию централизованной технической и методической поддержки преподавателей, студентов и администраторов по вопросам работы систем АПП УД.

Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство, подготовленное в системе *TG Builder (Technical Guide Builder)*, позволяет получить студенту подробную информацию об АПК:

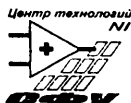
- описание структурной схемы АПК;
- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК лабораторных работ;
- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов и измерительных приборов;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК, 3D-модель конструкции АПК в целом с реализацией функций ее декомпозиции на составные элементы; видеоролики и др.).

Форма сотрудничества

Организация доступа к АПК по сети *Internet* на согласованных условиях

660074, г. Красноярск, 74, ул. акад. Киренского, 26
тел.: (3912) 912-120, (3912) 912-045, факс (3912) 912-521
www.alpsib.ru, e-mail: sav@rtf.kgtu.runnet.ru

Красноярский региональный центр новых информационных технологий



Список лабораторных работ

4.2 – Исследование процессов детектирования ЧМ – сигналов

Статус: Не выполнен | Выполнение лабораторной работы

Цель работы: Изучение принципов исследования процессов детектирования ЧМ-сигналов, выполненного на основе при формировании и изменении частоты, влияющей на изменение амплитуды в исследуемых детектировании с помощью логического детектора.

Задачи работы: 1. Измерение детекторных характеристик частотного детектора на основе разностного контура (тип 1). 2. Измерение детекторных характеристик частотного детектора на основе фазового детектора (тип 2). 3. Измерение детекторных характеристик фазового частотного детектора (тип 3).

Краткие теоретические сведения

Задачи на лабораторную работу

Требования к оформлению отчета

Контрольные вопросы

Имя выполненной работы

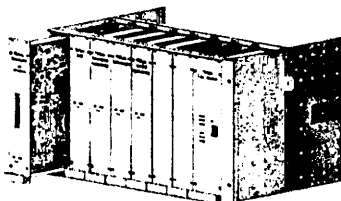
Список литературы и интернет-ресурсы

Описание аппарата программного обеспечения

4.1 – Исс

Стат

4.3 – Исследование зависимости выходного напряжения от частоты модуляции для 3-х типов ЧД



Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «АЛЬЯНС-КНИГА» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу: 123242, Москва, а/я 20 или по электронному адресу: orders@alians-kniga.ru.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя. Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в Internet-магазине: www.alians-kniga.ru.

Оптовые закупки: тел. (495) 258-91-94, 258-91-95; электронный адрес books@alians-kniga.ru.

Глинченко Александр Семенович
Егоров Николай Михайлович
Комаров Владимир Александрович
. Сарафанов Альберт Викторович

Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
 dm@dmk-press.ru
Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Чаннова А. А.*
Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Подписано в печать 10.01.2007. Формат 70×100 1/16.
Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 33. Тираж 1500 экз.

Издательство ДМК Пресс
Web-сайт издательства: www.dmk-press.ru
Internet-магазин: www.abook.ru

Заказ №10
Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Арт-диал»
143980, Московская обл, г. Железнодорожный,
ул. Керамическая, д. 3