

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Карагандинский государственный технический университет

Утверждаю  
Первый проректор  
\_\_\_\_\_ А.З. Исагулов  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2006г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ  
ПРЕПОДАВАТЕЛЯ**

по дисциплине «Электроника»

для студентов специальности 050718 «Электроэнергетика»  
050702 «Автоматизация и управление»

Факультет электромеханический

Кафедра «Автоматизации производственных процессов»

2006

## Предисловие

Учебно-методический комплекс дисциплины преподавателя разработан:  
к.т.н., доцентом Федорашко И.Н.,  
к.т.н., ст. преподавателем Федорашко Ю.И.

Обсужден на заседании кафедры «Автоматизации производственных процессов»

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006г.

Зав. кафедрой  
Брейдо И.В. \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006г.

Одобрено методическим бюро электромеханического факультета

Протокол № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006г.

Председатель  
Умбеталин Т.С. \_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006г.

## Содержание

### Глоссарий

### Типовая учебная программа дисциплины

1. Рабочая учебная программа дисциплины
2. График выполнения и сдачи заданий по дисциплине
3. Конспект лекций
4. Методические указания для выполнения практических (семинарских) занятий
5. Методические указания для выполнения лабораторных работ
6. Тематический план самостоятельной работы студента с преподавателем
7. Материалы для контроля знаний студентов в период рубежного контроля и итоговой аттестации
8. Методические указания для выполнения курсового проекта

## Глоссарий

В настоящем учебно-методическом комплексе дисциплины установлены следующие термины с соответствующими определениями:

- **пререквизиты** – перечень предшествующих дисциплин, необходимых для освоения изучаемой дисциплины;

- **постреквизиты** – перечень последующих дисциплин, при освоении которых используются знания, полученные при изучении данной дисциплины;

- **промежуточная аттестация** – комплексная оценка успешности освоения обучающимися дисциплины, совокупно учитывающая результаты текущего, рубежного и итогового видов контроля;

- **политика курса** – требования, предъявляемые к студенту в процессе изучения дисциплины;

- **рабочая программа дисциплины (Syllabus)** – основной учебно-методический документ, включающий в себя описание изучаемой дисциплины, цели и задачи дисциплины, краткое ее содержание, темы и продолжительность каждого занятия, задания для выполнения самостоятельной работы, время консультаций, требования преподавателя, критерии оценки уровня знаний обучающихся, порядок проведения рубежного контроля и список литературы;

- **рабочий учебный план** – документ, разрабатываемый высшим учебным заведением на основе типового учебного плана с дополнениями и уточнениями, учитывающими условия конкретной профессиональной деятельности, этапы учебного процесса, содержащий полный перечень учебных дисциплин и служащий основой для расчета трудоемкости учебной работы преподавателей;

- **рубежный контроль успеваемости** – периодическая проверка учебных достижений обучающихся, проводимая преподавателем, ведущим учебное занятие, согласно утвержденному академическому календарю;

- **самостоятельная работа студента (СРС)** – деятельность по определенному перечню тем, отведенных на самостоятельное изучение, обеспеченных учебно-методической литературой и рекомендациями, контролируемая в виде тестов, контрольных работ, коллоквиумов, рефератов, сочинений и отчетов;

- **самостоятельная работа студента под руководством преподавателя (СРСР)** – внеаудиторная деятельность обучающегося под руководством преподавателя, указанная в расписании в зависимости от категории обучающегося;

- **типовой учебный план** – основной документ, являющийся составной частью государственного общеобразовательного стандарта образования, устанавливающий обязательные компоненты по циклам дисциплин и определяющий последовательность и трудоемкость изучения учебных дисциплин;

- **учебно-методический комплекс (УМК) специальности (дисциплины)** – пакет основной учебно-методической документации, способствующий успешному освоению специальности (дисциплины);

- **учебно-методический комплекс дисциплины преподавателя (УМКДП)** – пакет учебно-методической информации и документации, содержащий типовую рабочую программу дисциплины, программу дисциплины (силлабус), график

выполнения и сдачи заданий по дисциплине, методические указания для проведения лекционных, практических и лабораторных занятий, СРС, материалы для контроля знаний студентов, глоссарий и др..

## Типовая учебная программа дисциплины

### **ЭЛЕКТРОНИКА**

3 кредита (135 ч.)

#### **Авторы:**

к.ф.-м.н., профессор Нурманов М.Ш., ст. преподаватель Луганская С.П.

#### **Рецензенты:**

д.т.н., профессор КазНТУ имени К.И. Сатпаева Исенбергенов Н.Т. д.ф.-м.н., профессор КБТУ Умаров Ф.Ф.

### **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**Цель курса** - формирование у студентов знаний по основам электроники методов проектирования и расчета электронных устройств.

**Задачи изучения дисциплины.** В результате изучения курса студент должен освоить принципы устройства и физические основы работы полупроводниковых приборов, их характеристики и параметры, а также основные принципы построения аналоговых электронных схем, генераторов сигналов, принципы работы интегральных микросхем, кроме того студент должен изучить принципы построения и функционирования интегральных логических элементов, методы синтеза логических устройств комбинационного и последовательностного типов.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- знать: устройство полупроводниковых приборов, особенности и основные параметры дифференциальных и операционных усилителей, основные цифровые устройства;
- уметь: строить многокаскадные усилители, решающие усилители, генераторы электрических колебаний, синтезировать различные узлы цифровых устройств;
- иметь опыт: снятия основных характеристик полупроводниковых приборов, усилителей и определения параметров различных электронных схем, выбора элементной базы;
- иметь представление: о принципе действия современных аналоговых и цифровых интегральных схем.

Материал дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении курсов «Физика», «Математика», «Теория электрических цепей» и используется при изучении дисциплин «Вычислительные сети и системы», «Элементы и средства автоматизации», «Технические средства обработки информации», «Микропроцессорные системы» и др., в курсовом и дипломном проектировании.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

**Иметь представление** об основных тенденциях и направлениях развития электронной техники её связь с автоматизацией и управление.

#### **Знать:**

основы электроники, в том числе устройство и принцип действия электронных компонентов;

методы и средства автоматизированного моделирования и проектирования электронных схем;  
проводить исследования и анализировать физические явления в электронных схемах.

**Уметь:**

проектировать электронные узлы, понимать и уметь читать простые схемы типовой электронной аппаратуры,  
использовать различные электронные приборы в электрических схемах, выбирать типы электронных приборов в зависимости от особенностей их применения;

эксплуатировать электронные схемы;

анализировать работу электронных схем, определять их особенности связи с выполняемой функцией и их условиями эксплуатации;

работать технической литературой, справочниками, ГОСТами и технической документацией.

**СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Введение
2. Вспомогательные, пассивные элементы электронных схем.
3. Полупроводниковые приборы основные базовые элементы электронных схем.

4. Основной элементный базис аналоговых и цифровых устройств.  
Примерные темы лабораторных занятий.

Примерные темы практических занятий.

Примерные темы курсовых проектов.

Литература.

Введение.

Цель, задачи и содержание дисциплины. Краткая история развития электроники. Задачи курса по изучению полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и электронных устройств. Роль электронных устройств, при автоматизации технологических процессов и производств. Тенденция и перспективы развития микроэлектроники.

**2. Вспомогательные, пассивные элементы электронных схем**

Устройство и разновидности резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, трансформаторов, тензорезисторы, их назначение, маркировка и особенности эксплуатации. Применение пассивных элементов, как вспомогательных элементов электроники.

**3. Полупроводниковые приборы - основные базовые элементы электронных схем.**

Электропроводность полупроводников. Электронно-дырочный p-n переход. Основные характеристики и параметры p-n перехода. Полупроводниковые диоды: выпрямительный, высокочастотный, стабилитрон, импульсный, варикап, туннельный, диод Шоттки.

Биполярные транзисторы. Схемы включения (ОБ, ОЭ, ОК). Статические характеристики, основные параметры, области применения и условные обозначения.

Полевые униполярные транзисторы. Полевой транзистор с управляющим р-п переходом. Полевой транзистор с изолированным затвором со встроенным и индуцированным каналом. Основные параметры и характеристики.

Фотоэлектронные приборы: фоторезистор, фотодиод, фототранзистор. Основы оптоэлектроники. Светодиод. Элементы оптоэлектроники: резисторный оптрон, диодный оптрон, транзисторный оптрон.

Тиристоры. Типы тиристоров, характеристики, параметры, области применения и условные обозначения.

Основы микроэлектроники. Компоненты и элементы ИМС. Деление ИМС по степени интеграции. Технология изготовления элементов и компонентов ИМС. Особенности ИМС и их обозначение. Перспективные направления функциональной микроэлектроники.

#### **4. Основной элементный базис аналоговых и цифровых устройств.**

Усилители. Классификация усилителей; усилители постоянного тока, усилитель мощности, дифференциальные усилители, операционные усилители. Основные параметры и характеристики усилителя. Активные фильтры операционного усилителя. Усиление и генерация электрических сигналов. Автогенераторы синусоидальных и импульсных колебаний. Комбинационные логические устройства: кодовые преобразователи, шифраторы и дешифраторы, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры. Последовательные логические устройства: триггеры, регистры, счетчики. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи. Источники питания. Стабилизаторы тока и напряжения. Основы расчета и проектирования электронных устройств, мощных каскадов, усилителей. Современные компьютерные методы схемотехнического моделирования.

#### **Примерные темы лабораторных занятий**

1. Исследование статических характеристик диодов и стабилитрона.
2. Исследование статических характеристик биполярного транзистора! общим эмиттером и общей базой.
3. Исследование характеристик полевого транзистора.
4. Исследование характеристик усилителей.
5. Исследование схем инвертирующих и неинвертирующих операционных усилителей.
6. Исследование генераторов синусоидальных колебаний.
7. Исследование схем выпрямителей.
8. Исследование схем с логическими элементами.

#### **Примерные темы практических занятий**

1. Электрофизические свойства полупроводников.
2. Полупроводниковые приборы.
3. Усилители.
4. Генераторы синусоидальных колебаний.



5. Выпрямители.
6. Логические элементы.

### **Примерные темы курсовых проектов**

1. Расчет усилителей мощности.
2. Проектирование усилителей напряжения на ОУ.
3. Проектирование активных фильтров.
4. Расчет и проектирование генераторов синусоидальных колебаний.
5. Проектирование измерителя частоты.
6. Проектирование делителя частоты на двоичных счетчиках с обратной связью.
7. Расчет генераторов прямоугольных импульсов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

#### **Основная:**

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. Пособие для вузов. М: Лаборатория базовых знаний, 2000.
2. Прянишников В.А. Электроника: курс лекций. -СПб.:КОРОНА принт. 1998..
3. Гусев В.Г., Гусев М.Ю. Электроника: -М.: Высш. Школа 1991. -495с.
4. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. -М: Радио и связь, 2002.
5. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник для вузов -Киев: Высш школа, 1989.
6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство- М.: Мир. 2000.
7. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов.- М.: Радио и связь, 1991.
8. Пейтон А.Дж, Волш.В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. -М.: Бином, 1994.
9. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС.- М.:Мир, 1985.
10. Алексенко А.Г. и др. Применение аналоговых ИС.-М.: Радио и связь. 1980.
- 11.Электроника и электротехника в экспериментах и упражнениях. Под редакцией Д.И.Панфилова.- Том 2 - М.: Додека. 2000,- том 2.

#### **Дополнительная:**

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника.- М.: Высшая школа, 1982.
2. Герасимов В.Г., Князьков О.М., Краснопольский А.Е., и др. - Основы промышленной электроники. М.: Высшая школа, 1986.
3. Токхейм Р. Основы цифровой электроники. М.: Мир, 1982.
4. Янсен И. Курс цифровой электроники: В 4-х томах. - М.: Мир, 1987.
5. Быстров Ю.А. и др. Электронные приборы и устройства на их основе: Справочная книга. – Мир.: ИП Радио Софт, 2002.

# 1 Рабочая учебная программа

## 1.1 Сведения о преподавателе и контактная информация

Федорашко Игорь Николаевич, к.т.н., доцент;

Федорашко Юрий Игоревич, к.т.н., старший преподаватель.

Кафедра автоматизации производственных процессов (АПП), находится в главном корпусе КарГТУ, Б.Мира 56, контактный телефон 565184

## 1.2 Трудоемкость дисциплины

Таблица 1.1 – Трудоемкость дисциплины

Семестр	Количество кредитов	Вид занятий					Количество часов СРС	Общее количество часов	Форма контроля
		количество контактных часов			количество часов СРСП	всего часов			
		лекции	практические занятия	лабораторные занятия					
Для студентов дневного отделения									
3	3	15	15	15	45	90	45	135	Экз.
Для студентов заочного отделения полного срока обучения									
5	3	6	6	6	-	18	117	135	Экз., конт. раб.
Для студентов заочного отделения сокращенного срока обучения									
3	3	6	4	6	-	16	119	135	Экз, конт. раб.
Для студентов заочного отделения на базе высшего образования									
1	3	6	4	6	-	16	119	135	Экз., конт. раб.

## 1.3 Характеристика дисциплины

Дисциплина «Электроника» является базовой теоретической учебной дисциплиной, изучаемой студентами электротехнических специальностей, данная дисциплина является фундаментальной. В ней излагаются принципы работы электронных элементов и построение на их основе устройств автоматизации производственных процессов.

## 1.4 Цель дисциплины

Целью изучения данной дисциплины является формирование у студентов знаний по основам электроники, методов проектирования и расчета электронных устройств.

## 1.5 Задачи дисциплины

Задачи дисциплины следующие:

- освоить принципы устройства и физические основы работы полупроводниковых приборов, их характеристики и параметры, а также основные принципы построения аналоговых электронных схем, генераторов сигналов, принципы работы интегральных микросхем;

- изучить принципы построения и функционирования интегральных логических элементов, методы синтеза логических устройств комбинационного и последовательностного типов.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

иметь представление о:

современных электронных компонентах и их возможностях;

знать:

устройство полупроводниковых приборов, особенности и основные параметры дифференциальных и операционных усилителей, основные цифровые устройства;

уметь:

строить многокаскадные усилители, решающие усилители, генераторы электрических колебаний, синтезировать различные узлы цифровых устройств;

приобрести практические навыки:

снятия основных характеристик полупроводниковых приборов, усилителей и определения параметров различных электронных схем, выбора элементной базы;

- иметь представление: о принципе действия современных аналоговых и цифровых интегральных схем.

### 1.6 Пререквизиты

Для изучения данной дисциплины необходимо усвоение следующих дисциплин (с указанием разделов (тем)):

Таблица 1.2 - Пререквизиты

Дисциплина	Наименование разделов (тем)
1 Физика	Строение вещества, электромагнетизм
2 Математика	Основы математического анализа, операционное исчисление
3 Теория электрических цепей	Законы постоянного тока, переходные процессы в линейных цепях
4 Информатика	Системы счисления, блок-схемы алгоритмов

### 1.7 Постреквизиты

Знания, полученные при изучении дисциплины “Электроника” используются при освоении следующих дисциплин:

“Вычислительные сети и системы”;

“Элементы и средства автоматизации”;

“Технические средства обработки информации”;

“Микропроцессорные системы”;

“Теория автоматического управления”.

### 1.8 Содержание дисциплины

#### 1.8.1 Содержание дисциплины по видам занятий и их трудоемкость

Таблица 1.3 - Содержание дисциплины по видам занятий

Наименование раздела, (темы)	Трудоемкость по видам занятий, ч.			
	лекции	лабораторные	СРСП	СРС
	1	2	3	4
1 Вспомогательные, пассивные элементы электронных схем	10	4	15	15

2 Полупроводниковые приборы - основные базовые элементы электронных схем	10	5	15	15
3 Основной элементный базис аналоговых и цифровых устройств	10	6	15	15
ИТОГО:	30	15	45	45

### 1.9 Список основной литературы

- 1 Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. Пособие для вузов. М: Лаборатория базовых знаний, 2000.
- 2 Прянишников В.А. Электроника: курс лекций. -СПб.:КОРОНА принт. 1998.
- 3 Гусев В.Г., Гусев М.Ю. Электроника: -М.: Высш. Школа 1991. -495с.
- 4 Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. -М: Радио и связь, 2002.
- 5 Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник для вузов -Киев: Высш школа, 1989.
- 6 Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство- М.: Мир. 2000.
- 7 Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов.- М.: Радио и связь, 1991.
- 8 Пейтон А.Дж, Волш.В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. -М.: Бином, 1994..
- 9 Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС.-М.:Мир, 1985.
- 10 Ю.Алексенко А.Г. и др. Применение аналоговых ИС.-М.: Радио и связь. 1980. с.
- 11 Электроника и электротехника в экспериментах и упражнениях. Под редакцией Д.И.Панфилова.- Том 2 - М.: Додека. 2000,- том 2.

### 1.10 Список дополнительной литературы

- 1 Забродин Ю.С. Промышленная электроника.- М.: Высшая школа, 1982.
- 2 Герасимов В.Г., Князьков О.М., Краснопольский А.Е., и др. - Основы промышленной электроники. М.: Высшая школа, 1986.
- 3 Токхейм Р. Основы цифровой электроники. М.: Мир, 1982.
- 4 Янсен И. Курс цифровой электроники: В 4-х томах. - М.: Мир, 1987.
- 5 Быстров Ю.А. и др. Электронные приборы и устройства на их основе: Справочная книга. - Мир,:ИП РадиоСофт, 2002.

### 1.11 Критерии оценки знаний студентов

Экзаменационная оценка по дисциплине определяется как сумма максимальных показателей успеваемости по рубежным контролям (до 50%) и итоговой аттестации (экзамену) (до 50%) и составляет значение до 100% в соответствии с таблицей.

Оценка по буквенной системе	Баллы	%-ное содержание	Оценка по традиционной системе
A цифровой эквивалент	4,0	95-100	Отлично
A-	3,67	90-94	
B+	3,33	85-89	Хорошо
B	3,0	80-84	
B-	2,67	75-89	
C+	2,33	70-74	Удовлетворительно
C	2,0	65-69	
C-	1,67	60-64	
D+	1,33	55-59	
D	1,0	50-54	
F	0	0-49	Неудовлетворительно

Рубежный контроль проводится на 5-й, 10-й и 15-й неделях обучения и складывается исходя из следующих видов контроля:

Вид контроля	% -ое содержание	Академический период обучения, неделя															Итого, %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Посещаемость	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
Рубежный контроль	30	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	30
СРСП	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
СРС	10	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	10
Экзамен	30	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	30
Всего	100																100

### 1.12 Политика и процедуры

При изучении дисциплины “Электроника” прошу соблюдать следующие правила:

1. Не опаздывать на занятия.
2. Не пропускать занятия без уважительной причины, в случае болезни прошу предоставлять справку, в других случаях - объяснительную записку.

3. Повышать свой уровень знаний посредством поиска новой литературы и материалов ИНТЕРНЕТ.
4. Активно участвовать в учебном процессе.
5. Быть терпимым, открытыми, откровенными и доброжелательными к сокурсникам и преподавателям.
6. Не пользоваться во время лекций сотовой связью.

### 1.13 Учебно-методическая обеспеченность дисциплины

Ф.И.О автора	Наименование учебно-методической литературы	Издательство, год издания	Количество экземпляров	
			в библиотеке	на кафедре
<b>Основная литература</b>				
Степаненко И.П.	Основы микроэлектроники: Учеб. Пособие для вузов	М.: 2000	15	1
Прянишников В.А.	Электроника: курс лекций.	СПб.:КОРОНА принт. 1998	2	1
Гусев В.Г., Гусев М.Ю.	Электроника	М.: Высш. Школа, 1991	1	1
Опадчий Ю.Ф. и др.	Аналоговая и цифровая электроника.	М: Радио и связь, 2002	10	1
Гершунский Б.С.	Основы электроники и микроэлектроники	Киев: Высш школа, 1989	15	1
Титце У., Шенк К.	Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство	М.: Мир. 2000	10	1
Коломбет Е.А.	Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов	М.: Радио и связь, 1991	5	1
Пейтон А.Дж, Волш.В.	Аналоговая электроника на операционных усилителях	М.: Бином, 1994	1	-
Фолкенберри Л.	Применение операционных усилителей и линейных ИС	М.:Мир, 1985	2	1
.Алексенко А.Г. и др	Применение аналоговых ИС	М.: Радио и связь.1980	10	1
Д.И.Панфилов	Электроника и электротехника в экспериментах и упражнениях	М.: Додека. 2000	1	1

Дополнительная литература				
Забродин Ю.С.	Промышленная электроника	М.: Высшая школа, 1982.	10	1
Герасимов В.Г., Князьков О.М., Краснопольский А.Е., и др.	Основы промышленной электроники	М.: Высшая школа, 1986	20	1
Токхейм Р. М.	Основы цифровой электроники	Мир, 1982	2	1
Янсен И.	Курс цифровой электроники: В 4-х томах	М.: Мир, 1987	2	-
Быстров Ю.А. и др.	Электронные приборы и устройства на их основе: Справочная книга	Мир, ИП РадиоСофт, 2002	2	-

## 2 График выполнения и сдачи заданий по дисциплине

Вид контроля	Цель и содержание задания	Рекомендуемая литература	Продолжительность выполнения	Форма контроля	Срок сдачи
Текущая аттестация №1	Проверка теоретической части	[1,2,3]	2 ч.	Модуль или контрольная	5 неделя
Текущая аттестация №2	Проверка теоретической части	[1,2,3,4]	2 ч.	Модуль или контрольная	10 неделя
Текущая аттестация №3	Проверка теоретической части	[1,2,3,4, 10]	2 ч.	Модуль или контрольная	15 неделя

## 3 Конспект лекций

### Конспект к модулю №1

#### История развития электроники

Строго говоря, эра электроники началась в 1883 г., когда Томас Альва Эдисон открыл названный его именем эффект, пытаясь продлить срок службы созданной им ранее лампы с угольной нитью введением в ее вакуумный баллон металлического электрода. При этом он обнаружил, что если приложить к электроду положительное напряжение, то в вакууме между этим электродом и нитью протекает ток. Это явление, которое, к слову сказать, было единственным фундаментальным научным открытием великого изобретателя, лежит в основе всех электронных ламп и всей электроники дотранзисторного периода.

Однако Эдисон не довел свое открытие до конечных результатов. С 1883 по 1904 г.г. не только Эдисон, но и никто другой не догадались использовать указанный эффект для создания электронной вакуумной лампы, способной детектировать и усиливать электрические сигналы. Возможно, к этому не было достаточных побудительных мотивов.

Итальянский радиотехник Гульельмо Маркони получил домашнее образование. Под влиянием работ Г. Герца об электромагнитных волнах, начал опыты в этой области. В 1896 г. переехал в Англию, где в этом же году подал заявку, а в 1897 г. получил патент (в Англии) на применение электромагнитных волн для беспроводной связи (А.С. Попов своё изобретение не патентовал). Благодаря большим материальным ресурсам и энергии Маркони добился широкого практического применения нового способа связи. В 1902 г. осуществил радиосвязь через Атлантический океан. В 1905 г. Маркони изобрел антенную решетку, которая обеспечивала эффективную направленную передачу и прием длинных волн. Маркони построил разрядник с вращающимися дисками, создававший практически незатухающие колебания. Используя эти разработки, он в октябре 1907 г. приступил к эксплуатации первой коммерческой системы трансатлантической беспроводной телеграфии. В 1912 г. благодаря радиоаппаратуре Маркони было спасено 712 человек с «Титаника». В 1927 г. фирма Маркони завершила создание глобальной сети коротковолновых станций направленного действия. В 1932г. Маркони обнаружил возможность приема еще более коротких волн далеко за горизонтом, гораздо дальше, чем предсказывала любая теория. Это явление в дальнейшем стало использоваться в системах рассеянного распространения радиоволн, повысив надежность связи в арктических регионах.

Его деятельность сыграла значительную роль в развитии радиотехники, в частности, в распространении радио, как средства связи. Обладатель различных почетных титулов, доктор четырнадцати университетов и член многих академий, президент двух итальянских академий, лауреат Нобелевской премии (1909 году, совместно с К.Ф. Брауном) и десятков других премий, кавалер орденов и медалей, включая орден Святой Анны – одну из высших наград Российской империи, - таково было признание Гульельмо Маркони.

Биография Александра Степановича Попова достаточно широко известна на территории стран СНГ, поэтому ограничимся лишь краткими сведениями о его научных достижениях.

Исследованиями электромагнитных волн А.С. Попов начал заниматься вскоре после сообщений об опытах Г. Герца. Весной 1890 г. он прочитал морским офицерам в Кронштадте серию публичных лекций под общим названием “Новейшие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями”. Лекции сопровождались опытами по распространению электромагнитных волн, их отражению, преломлению и поляризации. Для наглядной индикации приема электромагнитных волн А.С.



Попов применил газоразрядные трубки Гейслера, но они светились только в непосредственной близости от искрового передатчика.

Новый творческий импульс в совершенствовании методов приема электромагнитных волн дала А.С. Попову статья О. Лоджа в журнале “Electrician” за 1894 г. Используя имеющуюся в его распоряжении элементную базу, А.С. Попов, после ряда экспериментов с когерером, в апреле 1895 г., разработал электрическую схему и собрал свой первый когерерный приемник. Первая публичная демонстрация прибора А.С. Попова состоялась во время его доклада “Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям” 7 мая (25 апреля по старому стилю) на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества в Санкт-Петербургском университете. Его аппарат отличался от известных, на тот момент, конструкций наличием электромагнитного реле и ему удалось передать радиосообщение “Генрих Герц” на расстояние 300 м. Это событие задокументировано в ряде публикаций того времени.

Во время дальнейших опытов со своим аппаратом А.С. Попов заметил способность приемного устройства реагировать на электромагнитные сигналы атмосферного происхождения. Изучив это явление, он летом 1895 г. разработал новую модификацию своего прибора, добавив в него самописец с телеграфной лентой. Эта конструкция А.С. Попова вошла в историю под названием “грозоотметчик”.

Преследуя лишь научные цели и не помышляя о коммерческой выгоде, А.С. Попов не патентовал свои изобретения. В дальнейшем его усилия были направлены по практическому применению “беспроволочного телеграфа” для нужд Российского флота. Признание заслуг перед наукой и Россией пришло к А.С. Попову еще при жизни. Действительный статский советник, директор Санкт-Петербургского электротехнического института, председатель Русского электротехнического общества и Русского физико-химического общества, почетный член Русского технического общества, почетный инженер-электрик, кавалер орденов Святой Анны 2 и 3 ст., Святого Станислава 2 ст. – таков неполный послужной список талантливого русского ученого.

С того времени прошло более 100 лет, но до сих пор ведутся споры о том, кому из учёных (Г. Маркони или А.С. Попову) принадлежит приоритет открытия.

Если разобраться глубже, то радио началось не с Маркони и Попова. Как и многие другие успехи в электричестве и магнетизме, оно базируется на открытиях Майкла Фарадея и работах выдающегося математика Джеймса Кларка Максвелла. Среди многих открытий Фарадея было разъяснение им в 1831 г. принципа электромагнитной индукции.

Однако наука развивалась медленно, и лишь в 1855 г. он опубликовал статью «О силовых линиях Фарадея», а в 1864 г. дал миру свою ошеломляющую работу «Динамическая теория электромагнитного поля». Эта статья содержала то, что мы сейчас называем уравнениями Максвелла. Она объясняла все известные явления электромагнетизма, а также предсказывала существование

радиоволн и возможность их распространения со скоростью света. Д. Максвелл сумел представить теоретические обобщения этих процессов только к 1873 г.

В 1887 г. теоретические выводы Максвелла были экспериментально подтверждены Генрихом Герцем. В 1888 г. Была опубликована его знаменитая работа “Об электродинамических волнах в воздухе и их отражении”. Используя искровой передатчик и рамочную антенну с небольшим зазором в качестве приемника, он передавал и принимал радиоволны в своей лаборатории в Карлсруэ (Германия). Более того, он применил отражательное устройство для обнаружения стоячих волн и показал, что радиоволны подчиняются всем законам геометрической оптики, включая рефракцию и поляризацию. Поэтому неудивительно, что первым переданным сообщением Попова было имя Герца.

В тоже время, еще задолго до работ Г. Герца, в 1835 г. Шведский исследователь Мунк-ав- Росеншельд впервые обнаружил и описал явление сильного изменения проводимости плохих контактов между металлами при воздействии электрических разрядов. В 1879 г. это явление было повторно открыто американским профессором Д. Юзом, который, используя его, пытался выяснить природу излучения, вызываемого электрическим разрядом. Однако не создав эффективного излучателя, он не сумел получить тех результатов, которые были достигнуты Г. Герцем с его генератором электромагнитных волн – “вибратором Герца”. В 1875 г. американский физик Элайю Томсон также успешно провел опыты по беспроводной сигнализации на расстоянии до 30 м между разными этажами здания.

Уже после публикаций Г. Герца об экспериментальном доказательстве существования электромагнитных волн французский физик Э. Бранли вновь обратил внимание на эффект резкого изменения проводимости металлических порошков при воздействии на них электромагнитного излучения. В своих публикациях в 1890-1891 г.г. Э. Бранли установил, что совокупность “плохих” контактов между металлическими частицами порошка, под влиянием воздействующих электромагнитных волн, становилась хорошо проводящей и после окончания этого воздействия. Лишь в результате механического сотрясения порошок вновь оказывался плохо проводящей средой. Используя этот эффект, английский физик О. Лодж создал чувствительный индикатор электромагнитного излучения, названный им когерером. Когерер О. Лоджа представлял собой стеклянную трубку, наполненную металлическими опилками, с двумя электродами на концах. С помощью этого индикатора О. Лодж провел ряд экспериментов, подтвердивших и развивших далее результаты Г. Герца. При этом ему пришлось использовать специальное механическое устройство для непрерывного встряхивания когерера, чтобы он постоянно был готов к регистрации электромагнитного излучения. 1 июня 1894 г., в год безвременной смерти Г. Герца, О. Лодж прочел в Лондонском Королевском обществе лекцию, опубликованную под названием “Творение Герца”. В этой лекции он не только рассказал о работах Г. Герца, но и продемонстрировал излучение электромагнитных волн вибратором Герца и их регистрацию на расстоянии около 55 м с помощью своего приемника с когерером, а также повторил ряд опытов Герца по изучению природы и свойств электромагнитного

излучения. Хотя прием сигналов производился на небольшом расстоянии, лектор высказал мнение, что чувствительность приемника достаточна и при расстоянии около полумили. Использованный во время лекции приемник О. Лоджа стал, в сущности, решающим звеном в цепи изобретений, которые в дальнейшем позволили осуществить телеграфирование без проводов. Данное событие произошло значительно раньше, чем соответствующие демонстрации А.С. Попова и Г. Маркони. Таким образом, оглядываясь назад, мы видим, что “радио”, в нашем нынешнем понимании этого термина, не есть результат одноактового творения, а плод усилий многих ученых, исследователей, изобретателей. Свой достойный вклад в этот процесс естественно внесли и А.С. Попов и Г. Маркони, наравне с другими выдающимися учеными того времени. Однако считать “7 мая – всемирным днем радио”, как это пытались проповедовать в советские времена, было бы слишком наивно...

Для получения реальных практических результатов, с использованием описанных физических явлений, возникла необходимость в хорошем усилителе, что стало очевидным для всего мира.

Если первым шагом на пути создания такого усилителя было открытие эффекта Эдисона, то вторым шагом было изобретение Джоном Эмброузом Флемингом в 1904 г. вакуумного диода. Флеминг назвал свой термоионный вентиль выпрямителем высокочастотного переменного тока. И таким он был на самом деле. Как точечный кристаллический детектор и другие приемные устройства тех дней, он выпрямлял радиочастотные сигналы, но не был в состоянии их усилить.

Третий шаг в создании усилителя был осуществлен Ли де Форестом. 25 октября 1906 г. он подал заявку на выдачу патента на трехэлектродную вакуумную лампу – знаменитый аудион. Эта лампа была аналогична лампе Флеминга, за исключением весьма важной особенности – она содержала управляющую сетку между нитью накала и анодом.

Однако первые приборы Де Фореста имели настолько низкое усиление, что они были не намного лучше диодов. Необходимы были дополнительные усилия, чтобы превратить аудион в действительно полезный усилитель. На это ушло шесть лет, и тогда действительно началась эпоха радио и современной электроники.

Этим новым устройством была регенеративная схема Эдвина Говарда Армстронга. Она представляла не только ожидаемый всеми чувствительный приемник, но, кроме того, была также первым немеханическим генератором чистых непрерывных синусоидальных сигналов.

Регенерация, или положительная обратная связь, заключалась в передаче части сигнала с анода обратно на сетку для повышения усиления триода. Очевидно, что при достаточной обратной связи усилитель превращался в генератор. Впервые собранная в 1912 г. регенеративная схема Армстронга была быстро принята промышленностью.

В это же время получили известность Ирвинг Лангмюр из фирмы General Electric и Гарольд Арнольд из фирмы Western Electric, которые, улучшив вакуум в триоде, значительно повысили его коэффициент усиления.

С этого момента радиотехника стала развиваться более стремительно. Однополосная связь, супергетеродин, радионавигация, системы с поднесущими в телефонии, триггерная схема – все это только часть изобретений, сделанных в период с 1915 по 1920 г.

Однако два других электронных чуда – телевидение и компьютер находились в стадии эволюции, хотя еще были далеки от завершения. Перед тем как описать их рождение на основе вакуумных ламп, интересно вспомнить об их неэлектронных прообразах.

Необходимость быстрого и точного проведения трудоемких математических расчетов при составлении математических таблиц для астрономии и навигации, по-видимому, в значительной степени стимулировала в XIX веке разработку цифровых счетных машин. Первые попытки создать калькулятор были предприняты деловыми людьми, которые вынуждены были складывать и вычитать длинные колонки цифр и практически не занимались нелинейными функциями. И хотя работы над аналоговыми машинами для расчета приливных функций начались во второй половине XIX века, заметного прогресса в аналоговых машинах не наблюдалось до середины XX века.

Самый первый механический компьютер был всего лишь суммирующей машиной, которая могла складывать и вычитать, но не умела умножать и делить. Построенная Блезом Паскалем в 1642 г., эта машина использовалась для сложения колонок цифр в конторе его отца. Калькулятор имел числовые колеса, установленные на параллельных горизонтальных осях. Положения этих колес могли быть определены, а их суммы считывались через окна в кожухах. Числа вводились при помощи горизонтальных наборных колес, которые были связаны с числовыми колесами посредством штифтов. Большинство числовых колес работали в десятичной системе, каждое колесо было связано с колесом более высокого разряда при помощи храпового механизма переноса.

В 1673 г. Готфридом Вильгельмом Лейбницем, немецким философом и математиком, было создано счетное устройство, в котором использовался механизм, известный под названием колеса Лейбница. Счетная машина обеспечивала не только автоматическое сложение и вычитание, но также умножение и деление. Счетные машины с видоизмененными колесами Лейбница использовались вплоть до второй мировой войны.

По-видимому, первая серьезная работа в области первых цифровых компьютеров была выполнена английским математиком Чарльзом Бэбиджем по заказу британского правительства. В 1823 г. Бэбидж начал работать над «разностной машиной» - специализированным калькулятором, который должен был помочь британскому морскому ведомству в составлении различных мореходных таблиц. Это могли быть таблицы умножения, логарифмов, синусов, косинусов, а также таблицы результатов физических измерений и наблюдений.

Машина Бэбиджа должна была выполнять все арифметические операции, используя для этих целей 20 - разрядный регистр, и производить печать выходных данных. Однако математик, так и не закончив работу над «разностной машиной», приступил в 1833 г. к реализации проекта «аналитической машины»,

но эта идея не получила практического воплощения. Машина была задумана как универсальный компьютер и по своему замыслу очень напоминала компьютер Марк I, созданный век спустя в 1930 г. в Гарвардском университете. Бэбидж предсказал необходимость в двух отдельных устройствах – хранения (или память), где находятся информация и команды, введенные в машину с помощью перфокарт, и перерабатывающего блока или процессора, который выполняет операции, пользуясь находящимися в памяти информацией и командами. Бэбидж заимствовал идею перфокарт у Джозефа Мари Жаккарда, который в 1805 г. изобрел приспособление к ткацкому станку, автоматизирующее процесс получения узора на ткани. Жаккард использовал набор карт с пробитыми отверстиями, соответствующими необходимому рисунку. Крючки проходили через отверстия в картах и протягивали вниз нити основы, в результате чего челнок проходил над определенным образом выбранными нитями.

«Аналитическая машина» Бэбиджа должна была хранить в памяти 1000 слов, каждое из 50 разрядов, и при произвольном доступе к таблицам функций она должна была звонить, предупреждая оператора о необходимости ввода дополнительной информации.

Устройство, используя концепцию «разностной машины» Бэбиджа, было изготовлено Пьером Георгом Шетцем в Швеции в 1854 г., однако создать работающую модель «аналитической машины» удалось лишь через сто лет фирме International Business Machines (IBM).

До Джорджа Буля математические методы не позволяли удовлетворительно объяснить формальную логику, столь необходимую для работы вычислительных машин. Этот английский логик опубликовал труды «Математический анализ логики» в 1848 г. и «Исследование законов мышления» в 1854 г., которые легли в основу современной символической логики. Изложенная в этих трудах теория позволила выразить логические правила в виде простых алгебраических уравнений.

1890 г. ознаменовался зарождением двух современных компьютерных фирм: Burroughs и IBM. В этом году Уильям Барроуз изобрел «суммирующую листинговую машину» - весьма популярный конторский калькулятор, а Герман Холлерит оказал большую помощь в обработке информации переписи населения США 1890 г. своим ранее созданным процессором. В 1896 г. Холлерит организовал фирму Tabulating Machine, которая выпускала как вычислительные машины, так и используемые в них карты. В 1911 г. эта фирма слилась с компанией, производившей весы и промышленные часы, в результате чего образовалась фирма Computer-Tabulating-Recording. В 1924 г. под руководством Томаса Уотсона эта фирма получила название International Business Machines Corp.

Если цифровые компьютеры, которые, начав свое развитие с механических устройств, прошли короткую электромеханическую стадию в 1930-х годах и стали электронными только в 1940-х годах, то телевидение с самого начала было электрическим.

Попытки передать изображение на расстояние при помощи электричества относятся к 1876 г., когда Александр Грэхем Белл изобрел телефон. К этому времени было уже известно, что сопротивление селена изменяется в зависимости от количества падающей на него световой энергии. Поскольку Белл доказал возможность передачи на расстояние сложного сигнала, множество изобретателей начали разрабатывать способы «электрического видения», как гласил один из заголовков статьи того времени.

Первая полностью электронная система была описана Аланом Арчибальдом Кэмпбеллом-Свинтоном в статье журнала Nature за 18 июня 1908 г. Кэмпбелл-Свинтон не изготовил аппаратуру, но очень подробно описал свои идеи. Его идея была основана на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ), изобретенной в 1897 г. Карлом Фердинандом Брауном в Страссбурге. Кэмпбелл-Свинтон предложил использовать ЭЛТ как в передатчике, так и в приемнике. При этом он отметил, что главной проблемой является «создание эффективного передатчика, который под влиянием светлых и темных участков будет в достаточной степени изменять передаваемый электрический ток, чтобы обеспечить необходимую модуляцию электронного луча в приемном устройстве».

Еще дальше продвинулся к цели Борис Розинг, работавший в Технологическом институте Санкт-Петербургского университета в России, который в 1907 г. разработал телевизионную систему, использующую механическую развертку в передающем устройстве и электронно-лучевую трубку Брауна в приемнике. Его работы были продолжены одним из его учеником Владимиром Зворыкиным.

Наиболее важным изобретением Зворыкина была первая передающая трубка типа иконоскоп, запатентованная им в 1923 г. Принципиально важным в этой трубке было то, что фотокатоды из посеребренной слюды «запоминали» заряды, образуемые фокусируемым на них изображением, а сканирующий электронный луч нейтрализовал заряды и одновременно модулировался.

Через год после изобретения иконоскопа Зворыкин изобрел кинескоп – телевизионную приемную трубку, став тем самым создателем основных передающего и приемного элементов электронного телевидения.

Конечно, регулярное телевизионное вещание, которое было внедрено двадцать лет спустя, не удалось бы создать без сопутствующих передатчиков, приемников, модуляторов, демодуляторов и т.п. или без радиотехнических средств. Впервые мир оценил возможности такой радиосистемы в 1906 г., когда в канун Нового года Реджинальд Фессенден из Гарвардского университета осуществил первую официальную передачу речи и музыки. Для этих целей он применил генератор на 50 кГц системы Александерсона, изготовленный фирмой General Electric Co. Телеграфные операторы на судах, пересекающих Северную Атлантику этой исторической ночью, были несказанно удивлены, услышав музыку в наушниках, которые до этого ничего не издавали, кроме точек и тире. Для модуляции генератора с выходной мощностью 1кВт Фессенден просто включил микрофон последовательно с антенной своей экспериментальной радиостанции.

В 1915 г. Джон Карсон из фирмы America Telephone & Telegraph изобрел однополосную модуляцию (SSB), которая сэкономила как мощность, так и полосу пропускания в системах связи. Это изобретение явилось следствием математического анализа модулированной несущей. Таким образом, SSB важна не только сама по себе, но как пример, подтверждающий действенность математического анализа.

Карсон был главным участником и другого эпизода связанного с математическим анализом, но в этом случае сказались ограничения последнего. В 1922 г. он опубликовал статью, где доказал математически, что частотную модуляцию нецелесообразно использовать для узкополосной передачи. Этот вывод был верным, однако на основании своих математических расчетов Карсон пришел к заключению, что эта модуляция неизбежно приводит к искажениям, не поддающимся компенсации. В своей последующей статье (1928 г.) он утверждал, что «шум, как и бедность, является неизбежным явлением».

Армстронг доверял своей интуиции больше, чем математическим выводам Карсона, и именно поэтому он изобрел частотную модуляцию. Слабое место математических выводов Карсона было не в расчетах, а в том, что он решал не ту проблему, какую нужно. Карсон доказал, причем совершенно правильно, бесполезность узкополосной частотной модуляции. Армстронг изобрел широкополосную частотную модуляцию.

Во время первой мировой войны Армстронг, тогда капитан корпуса связи, находился во Франции, где он разработал и собрал первый супергетеродинный приемник. Он подал заявку на патент в США из Парижа 30 декабря 1918 г. и получил патент 8 июня 1920 г. Схема супергетеродина, являющаяся неотъемлемой частью любого современного радиоприемника, телевизора или радиолокатора, была, по-видимому, величайшим достижением Армстронга. Ее сущность состоит в использовании местного генератора, который в результате биений понижает частоту принимаемых сигналов до фиксированного промежуточного значения, после чего они могут быть усилены. Супергетеродин обеспечивает также хорошую избирательность и низкий уровень шумов, однако первоначально Армстронг разработал его с целью изыскать способ усиления сигналов на частотах, которые были недоступны для электронных ламп тех времен. С появлением супергетеродинной схемы радиотехника начала бурно развиваться. Следующим значительным этапом развития электроники было широкое использование полупроводников в технике.

### **Эра полупроводниковых приборов**

Долгий и трудный путь развития полупроводниковой электроники проходил от наблюдений Фарадея, описавшего причудливые свойства сульфида серебра еще в 1833 г., до разработки транзистора в 1947 г. и появления интегральных схем в конце пятидесятых годов. Для объяснения поведения полупроводников потребовалась квантовомеханическая теория Шредингера, а для их получения нужна была хорошо развитая технология производства. Полупроводниковая технология породила новую промышленность, давшую возможность

осуществить запуск ракет и выполнить программы космических исследований в шестидесятые годы, ускорила повсеместное распространение компьютеров в семидесятые годы.

Когда фирма Bell Telephone Laboratories объявила об изобретении транзистора, широкая пресса практически проигнорировала это событие. О новости на следующий день, 1 июля 1948 г., газета «Нью-Йорк Таймс» написала на предпоследней странице. Сообщение содержало четыре абзаца и было помещено в качестве последней заметки в колонке «Новости радио».

Текст заметки гласил:

«Вчера фирма Bell Telephone Laboratories впервые продемонстрировала изобретенный ею прибор под названием “транзистор”, который в некоторых случаях можно использовать в области радиотехники вместо электронных ламп.

Прибор был продемонстрирован в схеме радиоприемника, не содержащей обычных ламп. ...Транзистор, имеющий форму маленького металлического цилиндра длиной около 13 мм, не содержит полости, из которой откачан воздух, сетки, анода или стеклянного корпуса, предохраняющего от попадания в прибор воздуха. Он начинает работу мгновенно, без задержки на разогрев, так как в отличие от радиолампы в нем нет накала.

Рабочие элементы прибора состоят всего лишь из двух тонких проволочек, подходящих к кусочку твердого полупроводникового материала величиной с булавочную головку, припаянному к металлическому основанию. Вещество, помещенное на металлическом основании, усиливает ток, подводимый к нему по одной проволочке, а другая проволочка отводит усиленный ток».

Даже технические журналы не сразу оценили возможности транзистора. Для того чтобы вызвать больший энтузиазм по отношению к прибору, фирма Bell Telephone Laboratories предоставляла лицензии на него всем желающим и усиленно рекламировала его на семинарах и в статьях.

В лабораториях США и Европы, однако, интерес к тому, что позднее стало называться полупроводниками, имел глубокие корни. Первые исследования электрических свойств полупроводников были начаты в прошлом веке, когда некоторые ученые независимо изучали фотоэлектрические и выпрямляющие эффекты некоторых соединений, подобных сульфиду серебра или сульфиду цинка, а также элементов, подобных селену. После того как в 1833 г. Фарадей установил, что электропроводность сульфида серебра увеличивается с ростом температуры (в то время как в металлах имеет место обратное явление), в 1839 г. во Франции Александр-Эдмон Беккерель открыл возможность генерирования напряжения при освещении перехода между электролитом и тем, что только через сто лет было названо полупроводником.

В 1873 г. Уилоуби Смит заметил, что при освещении селен изменяет свою электропроводность, а еще через год Фердинанд Браун, профессор физики в Марбурге, в Германии, обнаружил выпрямляющие свойства области контакта металлического «усика» с сульфидом свинца. При этом был создан первый переход между металлом и полупроводником. Диодный детектор с проволочным усиком использовался в течение некоторого времени в качестве



несколько нестабильного «своенравного» детектора радиочастотных сигналов, генерировавшихся в то время передатчиками с искровым разрядным промежутком. Закат для этого прибора наступил после изобретения в 1904 г. Флемингом вакуумного диода, а окончательно его использование прекратилось после разработки в 1906 г. Ли де Форестом вакуумного триода. Оба этих прибора были гораздо более надежными.

После того как отпала необходимость в использовании детекторов с проволочными «усиками», не надо было заниматься поисками четкого понимания принципов их работы. Действительно, интерес к явлениям в полупроводниках не возобновлялся вплоть до конца первой мировой войны.

Когда интерес к полупроводникам стал возрождаться, фирма Bell Telephone Laboratories уже была среди любопытных. В 1936 г. у специалистов фирмы возникла идея замены в телефонных системах механических переключателей какими-нибудь электронными ключами, не являющимися в то же время радиолампами, а к 1945 г. руководство фирмы Bell спланировало методическую программу широких исследований в области физики твердого тела, нацеленную на разработку того, что впоследствии стало транзистором.

Однако успех лабораторных исследований не означал конца борьбы за рынок электроники. В 1948 г. радиолампа представляла собой весьма сложное коммерческое изделие. Она, правда, была хрупкой, но и первый транзистор также был хрупким. Кроме того, для транзисторов были нужны совершенно новые методы производства и новые пути разработки систем. На первых порах сами транзисторы были очень дорогими.

Тем не менее, благодаря малым размерам новых приборов, их небольшому весу и малой величине потребляемой мощности они сразу нашли применение в военной аппаратуре. Другой областью, в которой сразу стали применяться транзисторы, были слуховые аппараты. Полностью чаша весов склонилась в пользу транзисторов в результате влияния вычислительной техники, для которой были необходимы громадные количества миниатюрных маломощных переключателей. Существенную роль сыграл также перевод на цифровую технику большого числа систем.

Транзистор в большей степени, чем какой-либо другой электронный прибор, обязан своим происхождением научной теории, а не технологическим разработкам.

В 1900 г. Макс Планк постулировал квантовую гипотезу, ставшую основой атомной теории и впоследствии теории, объясняющей поведение электронов в твердых телах. Именно на основе работы Планка Альберт Эйнштейн смог объяснить в 1905 г. фотоэлектрический эффект Беккереля. Хотя первые исследователи и сумели установить, что фотоны могут вызвать эмиссию электронов из некоторых материалов, до Планка и Эйнштейна не существовало ответа на загадочный вопрос: почему, если число полученных электронов пропорционально интенсивности света, их энергия пропорциональна длине волны света? Квантовая теория предложила считать природу фотонов двойственной, обладающей свойствами как волн, так и частиц: если свет действительно состоит из небольших волновых пакетов, энергия которых

пропорциональна длине волны, то экспериментальные данные могут быть удовлетворительно объяснены.

Изучение фотоэлектрического эффекта проводилось в научных центрах всего мира. Р. В. Поль, молодой физик, работающий в Берлине, а также Вильгельм Рентген, немецкий физик, открывший лучи, впоследствии названные его именем, изучали этот эффект, а также люминесцентные свойства твердых тел. Проблемы, существовавшие в те времена, были теми же, что и трудности, стоявшие на пути исследователей в области физики твердого тела вплоть до появления транзистора: все они были связаны с отсутствием чистых веществ.

К началу 1920-х годов считалось общепринятым, что хорошая проводимость металлов объясняется наличием в них свободных электронов. В присутствии электрического поля эти электроны должны были переноситься в одном направлении и при этом проводить электричество; те же электроны аналогичным образом могли «переносить» кинетическую энергию и тем самым проводить тепло. Однако для количественного объяснения поведения электронов в твердых телах потребовалось знаменитое квантово-механическое уравнение Эрвина Шредингера, которое австрийский физик опубликовал в 1926 г. В течение следующих 10 лет это уравнение помогало энергичным физикам, так как оно позволяло связать все загадочные явления в твердых телах, открытые в предыдущем столетии.

В то время как теоретики распутывали представления об электронах, зонной теории и валентности, ученые, в меньшей степени склонные к математике, экспериментировали с различными материалами. В середине 20-х годов прошлого века, например, новые типы твердотельных выпрямителей могли работать с гораздо большими мощностями, чем чувствительные детекторы с проволочными «усиками». Эти выпрямители изготовлялись из столбиков медных пластин, каждая из которых окислялась с одной стороны. Несмотря на отсутствие понимания того, как работают эти выпрямители, изготовители выпускали их в 1930-х годах в больших количествах, и даже проблему, связанную с высоким сопротивлением столбиков в прямом направлении, удалось решить, заменив окисел селеном.

Затем в конце 1930-х годов такие физики, как Невил Ф. Мотт в Англии, Александр Сергеевич Давыдов в СССР и Вальтер Шоттки в Германии, начали работать в направлении поисков объяснения эффекта выпрямления в системах металл-полупроводник. Относительно механизма выпрямления было достигнуто единое мнение: в полупроводниковых материалах у перехода имеет место обеднение носителями тока, и в результате возникает эффективный барьер для равновесных электронов, проходящих через переход. Приложение электрического поля, снижающего барьер (более высокий потенциал со стороны полупроводника), позволяет электронам проходить через переход в то время, как изменение направления этого поля еще больше объединяет полупроводник и увеличивает высоту барьера для потока электронов.

Многие изобретатели бились над созданием кристаллического усилителя. Чаще пытались использовать полевой эффект скорее всего потому, что он был сходен с действием управляющей сетки в радиолампах. Первая

зафиксированная попытка в США относится к 1925 г., когда Юлиус Е. Лилиенфельд, бывший прежде профессором физики в Лейпцигском университете, начал работать над идеей твердотельного кристаллического усилителя. В США Лилиенфельд сумел получить несколько патентов на конструкцию усилителя, основанного на использовании сульфида меди. Он, однако, не был в состоянии привлечь к своей работе серьезный интерес промышленности. Большинство из тех, кто знакомился с его экспериментами, проводимыми в почти полной неизвестности в Бруклине, шт. Нью-Йорк, сомневались в том, что его приборы вообще будут работать.

Еще один патент изобретателю, который не мог объяснить теоретических основ работы своего прибора, был выдан в Англии в 1935 г. Оскару Хейлю на полевой триод. Хейль, немецкий изобретатель, предложил использовать управляющий электрод для регулировки тока через тонкий слой полупроводника. В качестве возможных для использования материалов им были предложены окись меди, пятиокись ванадия, теллур и йод. Хотя можно сомневаться в том, работал ли когда-нибудь действительно прибор Хейля, его конструкцию можно считать предшественницей полевого транзистора с изолированным затвором, так как управляющий электрод был изолирован от полупроводниковой подложки.

Удивительно, что хотя представление о полевом твердотельном усилителе чрезвычайно просто, реальный прибор этого типа был разработан лишь после того, как был изобретен гораздо более сложный усилитель – биполярный транзистор. Все, что нужно было для создания полевого транзистора, - это добиться модуляции тока, протекающего через кусок полупроводникового материала, путем инжекции носителей заряда через затвор, причем последний мог даже быть изолирован от этого куска. Оглядываясь в прошлое, нельзя считать удивительным, что первый практически применимый полупроводниковый усилитель был разработан фирмой Bell Telephone Laboratories, тогда размещавшейся в Нью-Йорке.

Исследования фирмы Bell в области физики твердого тела отпочковались от исследований в области радиоламп и были нацелены на изучение термоионной эмиссии и других поверхностных свойств металлов. Уолтер Х. Браттейн, один из трех людей, сыгравших ведущую роль в изобретении транзистора, был направлен на исследования в области радиоламп в 1929 г., когда он поступил в фирму Bell Telephone Laboratories.

Браттейн получил докторскую степень в университете шт. Миннесота, куда приезжали читать лекции по новой квантовомеханической теории такие физики, как Шредингер, Джеймс Франк и Арнольд Зоммерфельд. Хорошая подготовка Браттейна в области физики твердого тела пробудила его интерес к полупроводникам, и в 1931 г. он получил в фирме Bell новое назначение – он стал изучать купроксные выпрямители вместе с Дж. Беккером.

Браттейн и Беккер были убеждены, что выпрямляющее действие происходит непосредственно у перехода между металлом и окисью меди и что ток через сами материалы имеет омический характер. Эти открытия были подтверждены экспериментами по фотоэлектричеству, в которых ток вызывался

освещением только самого перехода, а не объема материалов, лежащих по его сторонам. Как и многие другие ученые тогда, исследователи фирмы Bell также искали пути введения в конструкцию выпрямителя третьего электрода (управляющей сетки), с тем чтобы выпрямитель можно было превратить в усилитель.

К счастью, в начале 1930-х годов, когда Браттейн проводил свои практические исследования в области выпрямителей, теоретическая работа успешно шла во всем мире. В 1931 г. английский физик Алан Х. Вильсон опубликовал свою теоретическую модель кристаллического полупроводника, в которой результаты прежних работ по движению электронов в металлах распространялись на изоляторы и полупроводники. В течение следующих нескольких лет работы по теории полупроводников были выполнены Моттом в Англии, Яковом Ильичом Френкелем и Давыдовым в СССР и Шоттки в Германии. Так как эти физики читали лекции и публиковали статьи, результаты их исследований быстро становились известными в университетах, где они быстро усваивались молодыми студентами старших курсов. Одним из таких студентов был Вильям Шокли, самый младший из трех основных разработчиков транзистора.

Шокли поступил в фирму Bell Telephone Laboratories сразу после получения докторской степени по физике в Массачусетском технологическом институте в 1936 г.

Пути Браттейна и Шокли неизбежно пересеклись в конце 1930-х годов. Шокли включился в исследования Браттейна и Беккера по купроксным выпрямителям и 29 декабря 1939 г. сделал в своем блокноте первую запись с предложением конструкции полупроводникового усилителя на основе окиси меди. Он изучил теорию области пространственного заряда, созданную Шоттки и описывающую свойства поверхностного слоя полупроводника вблизи от перехода между ним и металлом. Шокли отметил, что этот слой в присутствии потенциала, приложенного в обратном направлении, обедняется.

Браттейн и Шокли продолжали экспериментировать с окисью меди, а Рассел С. Оль, химик, работавший в исследовательской лаборатории фирмы Bell, в тоже время проводил работу с кремнием. Об этом материале в то время было мало что известно. Оль наблюдал поведение кремниевых детекторов с проволочными «усиками», которые фирма Bell предполагала использовать в качестве усовершенствованных сверхвысокочастотных детекторов. Он начал работать с металлургами фирмы Bell с целью усовершенствования выпрямляющих характеристик кремния.

Два металлурга, Дж. Х. Скафф и Х. С. Тойерер, обнаружили, что расплавляя кремний в вакууме, они могут получить сравнительно чистые слитки, хотя некоторые из образцов выпрямляли при одном знаке приложенного напряжения, некоторые – при другом, а некоторые – вообще не выпрямляли. Материал, который проводил лучше при отрицательном смещении, они назвали материалом n-типа, а тот, который проводил лучше при положительном смещении, они назвали материалом p-типа.

Скафф и Тойерер открыли впоследствии, что кремний n-типа и кремний p-типа отличаются друг от друга ничтожными количествами содержащихся в них примесей. Фактический уровень примесей, легировавших кремний p- или n-типа, был чрезвычайно низок. В то время он не поддавался определению даже спектроскопическими методами. Как говорит Браттейн, запах кремниевых слитков при их извлечении из печи заставил Скаффа подозревать, что они загрязнены фосфором.

Затем эти два металлурга обнаружили, что элементы, расположенные по обе стороны от четвертой группы периодической системы элементов (той, в которой находятся кремний и германий), наиболее легко позволяли получить желаемый эффект. Элементы пятой группы, подобные фосфору и мышьяку, обеспечивали избыток электронов, и поэтому их введение приводило к образованию материала n-типа; элементы из третьей группы, включая бор и индий, создавали избыток “дырок”, приводя к образованию материала p-типа. Браттейн был восхищен элегантною простотой этого открытия.

В своих экспериментах металлурги вырастили слиток наполовину n-, а наполовину p-типа, создав при этом p-n-переход. Оль вырезал часть этого слитка, включающую переход, и начал экспериментировать с ней.

В начале 1940 г. Келли, руководивший исследованиями в фирме Bell, пригласил Браттейна и его группу наблюдать за экспериментами Оля. Оль освещал середину кремниевой пластины, на концах которой были сделаны металлические контакты, присоединенные к вольтметру. Когда стрелка вольтметра отклонилась на полвольта, Браттейн был поражен. Это отклонение в 10 раз превосходило любое фотоэлектрическое напряжение, которое он когда-либо наблюдал. Более того, свет не падал ни на один из переходов металл – полупроводник. Он был сфокусирован где-то в центре выглядевшей совсем обычно черной пластины.

Конечно, свет падал на переход – невидимый p-n-переход в кремнии. Но только после того, как Браттейн получил для работы свой собственный кусок кремния с p-n-переходом, он по-настоящему поверил в то, что ему продемонстрировал Оль.

Хотя в тот момент, по-видимому, все было подготовлено для рождения полупроводникового триода, разразившаяся вторая мировая война прервала работу Шокли и Браттейна. Они были направлены в разные исследовательские группы, занимавшиеся разработкой радаров, предназначенных для обнаружения подводных лодок. Прошло около шести лет, прежде чем они смогли вернуться к своей работе над полупроводниковыми усилителями.

Как выяснилось, война оказала большое влияние на разработку транзистора. Для военных нужд усовершенствование полупроводниковых датчиков для РЛС (радиолокационных станций) было столь важно, что правительство США выделило средства на проведение программы по исследованию свойств кремния и германия. К 1943 г. не менее 30 лабораторий в университетах и промышленности занимались выполнением исследовательских программ, целиком направленных на исследования полупроводников, предназначенных

для использования в РЛС. Среди этих лабораторий выдающаяся роль принадлежала лаборатории университета Пэрдью.

Под руководством Карла Ларк-Горовца физики этой лаборатории начали свои исследования почти с нуля, и менее чем за четыре года группа ученых сумела настолько полно исследовать свойства германия, что электрические свойства можно было предсказать на основании данных о содержании в нем примесей. Было определено отношение подвижности дырок в этом материале к подвижности его электронов, а также были изготовлены диоды, в которых обратные пробивные напряжения достигли 150 В.

После конца войны исследования фирмы Bell Laboratories почти исключительно были сконцентрированы на германии, свойства которого к тому времени были изучены гораздо лучше, чем свойства кремния. 9 апреля 1945 г. в исследовательском центре фирмы Bell состоялось совещание по германиевым кристаллам. Всего лишь через несколько месяцев после этого в фирме Bell Laboratories была создана группа по исследованиям в области твердого тела, руководимая Шокли и Стенли О. Морганом. В группе было много подгрупп, в состав одной из которых, занимавшейся полупроводниками, входили Браттейн и Джеральд Пирсон, физик-экспериментатор. В конце 1945 г. к ним присоединился Джон Бардин, физик.

Одним из первых серьезных решений, которые приняла «полупроводниковая» группа, было ограничение работ исследованиями германия и кремния, наиболее простыми полупроводниками. Группа считала, что единственным объяснением продолжающегося непонимания сути явлений в полупроводниках, несмотря на интенсивные исследования, проводившиеся во всем мире, было то, что экспериментальные исследования были разбросаны и проводились на очень большом числе различных сложных материалов. С другой стороны, кремний и германий были простыми элементами. Кроме того, их атомная структура обнаружила ту же сильную ковалентную связь, что и структура алмаза. Поэтому в кристаллах этих элементов должны были почти полностью отсутствовать дефекты.

В начале в основу работы полупроводниковой группы была положена модель полевого триода, выдвинутая Шокли. Основываясь на теории выпрямления Мотта-Шоттки, группа считала, что, прикладывая электрическое поле между поверхностью полупроводника и металлическим электродом, изолированным от поверхности, можно будет управлять плотностью электронов вблизи от поверхности. Тем не менее все эксперименты кончились неудачно.

Браттейн и Бардин попытались объяснить эти неудачи. Путь по которому они пошли, исходил из теории полевого эффекта Шоттки, согласно которой число свободных электронов в полупроводнике было одним и тем же как на его поверхности, так и в объеме. В действительности, как установил Браттейн, теория Шоттки была несправедливой. Он обнаружил это, сравнивая выпрямляющие свойства различных металлических контактов с полупроводником. Тогда Бардин выдвинул гипотезу, которая вылилась впоследствии в один из его наиболее важных вкладов в электронику, а именно в теорию поверхностных состояний.

Бардин предложил, что поверхность полупроводника находится в равновесном состоянии еще до того, как к ней создан какой-либо электрический контакт. Это предположение позволило объяснить, почему выпрямление Шоттки происходило практически независимо от того, какой металл использовался для создания контакта с полупроводником; выпрямление объяснялось электростатической разностью потенциалов между внутренней частью полупроводника и его поверхностью.

Основываясь на этой новой теории, Браттейн и Бардин выполнили серию экспериментов для того, чтобы прийти к лучшему пониманию теории поверхностных состояний.

В качестве возможного решения было предложено весь аппарат (кусочек полупроводника с контактами, опорные электроды и провода, используемые для измерения контактных потенциалов и фотоэлектрических напряжений) погрузить в изолирующую жидкость или электролит. Изменяя потенциал между поверхностью полупроводника и опорным электродом, удалось добиться существенных изменений генерированного фотоэлектрического напряжения. Группа пришла к выводу, что ей удалось обнаружить полевой эффект Шокли. Изменение этого последнего эксперимента позволило создать фактически работающий усилительный триод. Потенциал, приложенный между каплей воды, окружающей металлический контакт кремния, и самой кремниевой пластиной, позволял регулировать ток, протекавший от полупроводника к контакту. Другие жидкости – электролиты – позволили получить еще лучшие результаты, однако группа знала, что в усилителе, который они хотели создать, нельзя было использовать жидкости. Были сделаны попытки использовать напыленную золотую пленку, окружавшую точечный контакт, но из-за очень малых размеров низковольтная дуга разрушила точечный контакт.

23 декабря 1947 г. группа достигла самого большого успеха. Бардин и Браттейн решили, что необходимо было разместить два контакта чрезвычайно близко друг к другу на поверхности полупроводника. По их расчетам расстояние не должно было превышать 50 мкм. Сделать это было не просто, так как самая тонкая проволока, с которой им приходилось работать, имела диаметр 125 мкм. Помогла изобретательность Браттейна.

Он приклеил золотую фольгу к краю полистиролового треугольника и очень осторожно разрезал ее бритвой вблизи от вершины треугольника. Затем эта вершина была опущена на поверхность полупроводника (в эксперименте был использован германий) и треугольник стали покачивать, пока оба конца фольги не пришли в хороший контакт с полупроводником. Один контакт стал эмиттером, а другой – коллектором, в то время как сама полупроводниковая пластина была базой.

Бардин и Браттейн еще раньше открыли, что небольшой потенциал на эмиттере, положительный по отношению к базе, вызывает инжекцию дырок в поверхность полупроводника и значительно повышает его способность проводить ток. Использование этого эффекта, подобного действию клапана, позволило получить в их усилителе коэффициент усиления по напряжению

порядка 100. При этом усилитель работал до верхней границы диапазона звуковых частот.

В тот же день была обсуждена оригинальная электрическая схема, и на следующий день она была использована для изготовления генератора. Единственной неотложной проблемой осталось придумать подходящее название для изобретенного прибора. Бардин и Браттейн хотели подобрать термин, похожий на варистор и термистор, но они не могли найти подходящего слова. Однажды этот вопрос всплыл вновь в присутствии Джон Пирса, он предложил для прибора название, которое отражало бы его сходство с радиолампами. Важным параметром лампы, как указал Пирс, является ее крутизна (*transconductance*), или отношение выходного тока к входному напряжению. В полупроводниковом усилителе усиление обеспечивается благодаря его переходному сопротивлению (*transresistance*). По этой причине Пирс предложил назвать его транзистором (*transistor*).

Только через семь месяцев фирма Bell Laboratories публично объявила о создании транзистора.

В дальнейшем развитие электроники было направлено главным образом на совершенствование полупроводниковой технологии, что в конечном итоге и привело к созданию интегральных микросхем и микропроцессоров, являющихся основными компонентами электроники в настоящее время.

### **Элементы электроники**

Любая конструкция РЭА (радиоэлектронной аппаратуры) включает элементы трех видов. Наиболее многочисленными в РЭА являются радиоэлементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы и полупроводниковые приборы), которые могут иметь достаточно сложное устройство, но не допускают разделения на части, имеющие самостоятельное функциональное назначение. Вторую группу составляют механические элементы (скобы, планки, оси, валы, подшипники и др.), предназначенные для механических соединений и передачи движений. В третьей группе элементов (выключатели, переключатели, соединители, реле) сочетается выполнение механических операций с электрическими.

Основными электрическими параметрами типовых радиоэлементов являются: номинальное значение основного параметра (электрического сопротивления для резистора, емкости для конденсатора и др.); допуск на основной параметр; электрическая прочность и способность длительно выдерживать электрическую нагрузку; величины, характеризующие потери, стабильность и надежность.

*Номинальные значения параметров* устанавливаются специальными рядами предпочтительных чисел — десятичными рядами геометрических прогрессий, первый член которых равен единице, а знаменатель  $M$  определяет количество номинальных значений в десятичном интервале:  $M = \sqrt[n]{10}$ , где  $n$  — номер ряда, которому присвоено обозначение. Например, для рядов E6, E12 и E24 знаменатели прогрессии соответственно равны  $M = \sqrt[6]{10} = 1,47$ ;  $M = \sqrt[12]{10} = 1,21$ ;  $M = \sqrt[24]{10} \sim 1,1$ . Ряд E6 содержит 6 номинальных значений в десятичном (от 1 до 10) интервале, ряд E12—12 значений, а ряд E24—24 значения.



*Допуск* — допускаемое отклонение фактической величины от номинальной, определяет класс точности радиоэлемента. Номинальные значения электрических параметров типовых элементов всегда согласовываются с их допусками таким образом, чтобы получалась так называемая «безотходная» шкала, когда любой изготовленный элемент обязательно попадает в одну из групп номинальных значений, что экономически выгодно при массовом производстве см. (табл. 1.1).

*Электрическая прочность* радиоэлемента характеризуется номинальным напряжением — максимальным напряжением, под которым элемент может находиться в течение гарантированного срока службы. Кроме этого используют понятия испытательного напряжения — максимального напряжения, под которым радиоэлемент может находиться небольшой промежуток времени (несколько секунд), и пробивного напряжения — минимального напряжения, при котором в радиоэлементе наступает пробой изоляции.

Способность длительно выдерживать электрическую нагрузку связана с номинальной мощностью радиоэлемента, под которой понимают максимально допустимую мощность, которую способен рассеивать элемент в течение гарантированного срока службы при непрерывной электрической нагрузке и определенных условиях окружающей среды (температуре, влажности, давлении и пр.) и условия, что напряжение на элементе не превышает номинального.

Таблица 1. 1 - Ряды номинальных значений параметров типовых радиоэлементов

Индекс ряда	Числовые коэффициенты, умноженные на 10 <sup>n</sup>						Допуск, %
	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
E6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	±20
E12	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	+ 10
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,1	+ 10
E24	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	+ 5
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	+ 5
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,1	+ 5
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	+ 5

При длительной работе элемента, как и при его хранении, происходят медленные изменения в структуре его материалов - старение элемента, которые приводят к необратимым изменениям электрических параметров и делают элемент непригодным для использования. Поэтому важным параметром является долговечность или срок службы радиоэлемента — промежуток времени, по истечении которого элемент, работающий в нормальных условиях, становится непригодным к

дальнейшей эксплуатации. Потери в радиоэлементах связаны с сопротивлением проводников и с потерями в диэлектриках.

Под *стабильностью* понимают степень устойчивости основных параметров радиоэлементов при воздействии внешних факторов: температуры, влажности, атмосферного давления, различных механических нагрузок. Одним из наиболее важных внешних факторов является температура, влияние которой оценивается температурными коэффициентами — величинами, характеризующими относительное изменение основных параметров радиоэлементов при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ .

Весьма важным показателем является *надежность*, под которой понимают свойство элемента выполнять все заданные функции в течение требуемого времени при определенных условиях эксплуатации и сохранении основных параметров в пределах установленных допусков. Надежность элементов в значительной степени определяет надежность РЭА и поэтому является важнейшей характеристикой их качества.

Заканчивая краткое рассмотрение общих вопросов, связанных с радиоэлементами, необходимо отметить, что элементная база — это совокупность элементов, используемых в РЭА, которая определяющим образом влияет на ее свойства, характеристики и возможности. В последнее время по мере роста требований, предъявляемых к радиоэлектронной аппаратуре, значительно возросли требования к надежности, массе и габаритам элементов РЭА. При использовании так называемых дискретных радиоэлементов, когда каждый из них является законченным в конструктивно-технологическом отношении изделием, размещается, укрепляется и электрически включается отдельно, плотность «упаковки» радиоэлементов оказывается низкой, РЭА имеет достаточно большие габариты и массу, а самое главное, оказывается недостаточно надежной.

Применение интегральных микросхем (ИС) позволяет не только во много раз уменьшить габариты и массу РЭА, но и увеличить ее надежность, поэтому в современных радиоэлектронных устройствах широко применяют ИС. Однако это не исключает необходимости использования дискретных радиоэлементов. Последнее связано с тем, что ряд элементов, таких, например, как конденсаторы большой емкости, индуктивные катушки и трансформаторы, не могут быть реализованы в интегральном исполнении. Кроме того, в некоторых случаях дискретные схемы могут оказаться более дешевыми и легче реализуемыми. Поэтому роль дискретных радиоэлементов все еще остается значительной.

## **Резисторы**

Резистор (от латинского *resisto* — сопротивляюсь) — промышленное изделие, основное функциональное назначение которого обеспечивать определенное соотношение между током и приложенным к нему

напряжением. Промышленность выпускает большой ассортимент резисторов, которые классифицируются по нескольким признакам.

Прежде всего резисторы разделяют на постоянные и переменные. Постоянные резисторы подразделяют на резисторы общего применения и специальные, а переменные — на подстроечные и регулировочные. Одно из основных требований, предъявляемое к постоянным резисторам, — сохранение величины их электрического сопротивления в процессе эксплуатации РЭА. Подстроечные резисторы предназначены для периодической подстройки аппаратуры, а регулировочные — для многократных регулировок аппаратуры в процессе эксплуатации.

Вторым признаком классификации является материал резистивного элемента. По этому признаку все резисторы разделяют на проволочные и непроволочные. В проволочных резисторах резистивным элементом служит проволока с высоким удельным электрическим сопротивлением. Непроволочные резисторы подразделяют на: углеродистые и бороуглеродистые, металлодиэлектрические, металлоокисные и металлизированные, композиционные.

Третий признак классификации — конструктивное исполнение. Здесь в зависимости от требований по изменению внешних условий различают нормальный (обычный) и тропический (всеклиматический) варианты, а в зависимости от способа монтажа резисторы разделяют на неизолированные, изолированные, герметизированные и вакуумные. Переменные резисторы по конструкции разделяют на одно- и многоэлементные, с круговым и прямолинейным перемещением подвижного контакта.

Основными электрическими параметрами постоянных резисторов являются: номинальное сопротивление; допуск на величину сопротивления; номинальная мощность рассеяния; номинальное напряжение; температурный коэффициент сопротивления.

Номинальным называют значение сопротивления, на которое рассчитан резистор и которое указывается на нем. Согласно ГОСТ 2825 и ГОСТ 10318 установлено шесть рядов номиналов сопротивлений резисторов: E6, E12, E24, E48, E192 (допускается также ряд E3). Допуски на типовые резисторы согласованы с номинальными рядами сопротивлений. Значения номинальных мощностей рассеяния в ваттах для резисторов устанавливаются согласно ГОСТ 9663: 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 6,3; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 75; 80; 100; 160; 250; 400; 500; 630; 800; 1000.

Температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) называют величину, характеризующую относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Для переменных резисторов вводится еще функциональная характеристика, которая определяет зависимость сопротивления переменного резистора от положения подвижного контакта. По виду этой характеристики различают линейные переменные резисторы (тип А) и нелинейные — типов Б (логарифмический), В (обратнологарифмический) и др.

Основными элементами конструкции любого резистора являются: резистивный элемент; каркас; выводы, с помощью которых обеспечивается электрический контакт резистивного элемента со схемой; защита резистивного слоя от внешних воздействий и механических повреждений.

Как отмечено выше, постоянные резисторы подразделяются на резисторы общего назначения и специальные. Величина номинальных сопротивлений резисторов общего назначения изменяется от 1 Ом до 10 МОм с допусками + 2, + 5, +10, +20% и номинальными мощностями рассеяния от 0,125 до 100 Вт. Специальные резисторы (прецизионные, высокочастотные, высокоомные и высоковольтные) отличаются специфическими свойствами и параметрами.

Прецизионные резисторы характеризуются большой точностью изготовления (допуск от +0,001 до 1%) и высокой стабильностью параметров при эксплуатации. Диапазон номинальных значений сопротивлений прецизионных резисторов превышает диапазон номинальных значений сопротивлений резисторов общего применения, но мощности их рассеяния небольшие не более 2 Вт.

Высокочастотные резисторы отличаются малой собственной индуктивностью и емкостью; отдельные их типы способны работать на частотах в сотни мегагерц. Высоковольтные резисторы рассчитаны на работу при больших напряжениях— от единиц до десятков киловольт.

Высокоомные резисторы характеризуются сопротивлениями от десятков мегаом до сотен тераом и рассчитываются на небольшие рабочие напряжения (100—400 В) и малые мощности рассеяния (менее 0,5 Вт).

Условные обозначения резисторов были введены в СССР в 1968 г. До этого четкой системы обозначений не было и в основу обозначений брались самые разные признаки. Например, применялись такие обозначения: МЛТ — металлопленочные лакированные теплостойкие; УЛИ — углеродистые лакированные измерительные; СПО — сопротивления переменные объемные и др. В ГОСТ 13453—68 введены обозначения резисторов, состоящие из трех элементов: букв и цифр.

Таблица 1.2 - Наиболее распространенные типы резисторов

Тип резистора	Номинальная мощность, Вт	Диапазон номиналов сопротивлений	Допуск, %
BC	0,125-10	10 Ом — 10 МОм	5, 10, 20
C1-8	0,125—1	10 Ом— 10 кОм	1, 2, 5
C1-4	0,1 25 --0,5	10 Ом— 10 МОм	2, 5, 10
МЛТ	0,125—2	8,2 Ом— 10 МОм	5, 10, 20
C2-8	0,125—1	10,2 кОм 10 МОм	1, 2, 5

С2-23	0,125—2	24 Ом — 10 МОм	1, 2, 5, 10, 20
С2-1	0,25—2	1 Ом— 5,1 МОм	5, 10
С3-2	0,05	10 Ом— 1 МОм	5, 10, 20
С4-2	0,25—2	10 кОм — 10 МОм	5, 10, 20
СП2-1	0,5; 1	47 Ом— 100 кОм	20
СП2-2	0,5; 1	47 Ом— 47 кОм	20
СП3-10	0,25—2	470 Ом— 4,7 МОм	10, 20, 30
СП3-17	1,2	470 Ом— 4,7 МОм	20, 30
СП3-23а	0,5; 1	470 Ом— 4,7 МОм	10, 20, 30

Буквы обозначают группу резисторов: С — резисторы постоянные; СП— резисторы переменные (буква С осталась от старого названия резисторов — «сопротивление»). Цифра, стоящая после букв, обозначает разновидность резистора: 1—непроволочные тонкослойные углеродистые и бороуглеродистые; 2 — непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические и металлоокисные; 3 — непроволочные композиционные пленочные; 4 — непроволочные композиционные объемные; 5 — проволочные; 6 — непроволочные тонкослойные металлизированные. После цифры через дефис ставится число, обозначающее номер конкретного типа резистора. Основные параметры наиболее распространенных типов резисторов приведены в таблице 1.2.

С 1980 г. введена новая система сокращенных условных обозначений резисторов, имеющая аналогичную с первой структуру: первый элемент — буква или сочетание букв — обозначает подкласс резистора (Р — постоянные; РП — переменные; НР — наборы резисторов); второй элемент — цифра — обозначает материал резистивного элемента (1—непроволочные, 2 — проволочные); третий элемент — число — обозначает регистрационный номер конкретного типа резистора.

### **Конденсаторы**

Конденсатором называют элемент, состоящий из двух или более проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, и обладающий способностью накапливать электрические заряды. Конденсаторы относятся к числу наиболее широко применяемых радиоэлементов. К ним предъявляются самые разные требования по емкости, стабильности, рабочему напряжению, устойчивости к внешним воздействиям и другим параметрам. Поэтому отечественной промышленностью выпускается широкий ассортимент различных типов конденсаторов, а их классификацию проводят по нескольким признакам.

По характеру изменения емкости различают конденсаторы постоянной емкости, переменной емкости (КПЕ) и подстроенные. К емкости конденсаторов первого типа предъявляется требование как можно большего постоянства. Емкость КПЕ, наоборот, существенно меняется в процессе функционирования РЭА. Подстроечные конденсаторы служат для разовой или периодической

регулировки (обычно при первоначальной настройке и ремонте РЭА), когда в той или иной цепи должна быть установлена определенная величина емкости. Конденсаторы постоянной емкости являются типовыми, КПЕ еще не стандартизованы, их обычно разрабатывают и изготавливают на каждом предприятии отдельно. Некоторые типы подстроечных конденсаторов стандартизованы.

В зависимости от материала диэлектрика, используемого в конденсаторе, различают конденсаторы с газообразным, жидким и твердым диэлектриком, а также с оксидным диэлектриком (электролитические).

Конденсаторы с газообразным диэлектриком могут быть воздушными, газонаполненными и вакуумными, а с твердым диэлектриком подразделяют на конденсаторы с неорганическим диэлектриком (сланцевые, керамические, стеклокерамические, стеклоэмалевые и др.) и с органическим диэлектриком (бумажные, металлобумажные, пленочные). В маломощной РЭА конденсаторы постоянной емкости обычно выполняют с твердым диэлектриком, а КПЕ — с воздушным.

Основными электрическими параметрами конденсаторов постоянной емкости являются: номинальная емкость; допуск на величину емкости; электрическая прочность; значение сопротивления изоляции; потери; температурный коэффициент емкости.

Номинальная емкость конденсаторов (кроме электролитических и бумажных большой емкости) определяется рядами предпочтительных чисел Е6, Е12, Е24, Е48, Е96, Е192. Емкость электролитических конденсаторов (в мкФ) определяется рядом: 1, 2, 5, 10, 20, 50..., а бумажных 0,1; 0,25; 0,5; 1,2; 4,6; 10; 20; 40; 80; 100.

Электрическая прочность конденсаторов характеризуется номинальным, испытательным и пробивным напряжениями.

Сопротивление изоляции конденсаторов определяется свойствами их диэлектриков и конструктивными особенностями, оно характеризуется постоянной времени — произведением величины сопротивления изоляции в мегаомах на емкость конденсатора в микрофарадах.

Потери в конденсаторах в основном определяются потерями в диэлектрике и оцениваются тангенсом угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$ , где  $\delta$  - угол, дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между гармоническим током через конденсатор и напряжением на нем. Величину, обратную  $\delta$ , называют добротностью конденсатора  $Q = 1/\operatorname{tg} \delta$ .

*Температурным коэффициентом емкости (ТКЕ)* называют относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры на  $1^\circ \text{C}$ .

При работе конденсатора на высоких частотах важным может оказаться его собственная индуктивность, которая складывается как из индуктивности самого рабочего элемента конденсатора, так и из индуктивности внешних и внутренних соединительных проводников.

Рассмотрим наиболее распространенные типы конденсаторов.

**Слюдяные конденсаторы.** В качестве диэлектрика в таких конденсаторах используют пластины конденсаторной слюды сорта мусковит толщиной 0,02

— 0,06 мм. В целом слюдяной конденсатор представляет собой плоский пакет, в котором слюдяные пластины чередуются с металлическими обкладками. По способу защиты пакета от внешних воздействий различают слюдяные конденсаторы открытого типа, спрессованные в пластмассу и герметизированные.

Промышленностью выпускается большое число типов слюдяных конденсаторов, наибольшее распространение из которых имеют спрессованные (КСО), герметизированные (КСГ) и герметизированные малогабаритные (СГМ).

Достоинствами слюдяных конденсаторов являются высокая стабильность величины емкости, повышенная добротность и надежность. Их недостатки — сравнительно большой ТКЕ и высокая стоимость.

**Керамические конденсаторы.** Керамические конденсаторы представляют собой конструкции с базовой керамической деталью, играющей роль диэлектрика, на которую нанесены в соответствующих местах металлические слои (обкладки). Их подразделяют на дисковые, трубчатые, пластинчатые, боченочные и горшковые. Основные свойства керамических конденсаторов определяются составом керамики, из которой они изготовлены. В связи с тем, что к настоящему времени разработаны типы керамики, отличающиеся весьма широким диапазоном значений диэлектрической проницаемости и ТКЕ, изготавливают керамические конденсаторы с разными значениями емкости и ТКЕ. Для уменьшения влияния внешних воздействий их покрывают эмалью, глазурью, компаундами, спрессовывают пластмассой или герметизируют.

Раньше других начали применяться трубчатые и дисковые конденсаторы, существенным недостатком которых является небольшая удельная емкость. Этот недостаток определяется неудачной конструкцией большой толщиной диэлектрика, связанной с технологией изготовления таких конденсаторов.

Промышленностью выпускается большое число типов керамических конденсаторов: трубчатые (КТ); герметизированные (КГЮ); дисковые (КД); пластинчатые (КП); литые и монолитные (КЛГ, КЛС) и др. Достоинствами керамических конденсаторов являются: малые потери, высокая стабильность параметров, малая собственная индуктивность, небольшие размеры и дешевизна. Поэтому керамические конденсаторы широко применяются в современной маломощной РЭА, зачастую вытесняя слюдяные конденсаторы.

Близко к керамическим конденсаторам примыкают стеклянные, стеклокерамические и стеклоэмалевые типов СКМ, К22У-1 и др.

Особую группу керамических конденсаторов составляют вариконды - конденсаторы, в которых диэлектриком служит специальная сегнетокерамика отличающаяся резко выраженной зависимостью емкости от приложенного к ней напряжения.

В конденсаторах из сегнетокерамики при изменении напряжения, на несколько вольт емкость может изменяться в 3-5 раз. Это позволяет применять вариконды так же, как варикапы для электрического

изменения емкости в соответствующих схемах (колебательных контурах усилителей и генераторов, стабилизаторах и т. д.).

**Бумажные конденсаторы.** Бумажные конденсаторы состоят из двух полос алюминиевой или свинцово-оловянной фольги, разделенных несколькими слоями специальной бумаги толщиной от 4 до 12 мкм и свернутых в виде круглого или овального рулона. Для придания конденсатору плоской формы рулон сжимают в специальных приспособлениях. Для повышения электрической прочности и стабильности конденсатор пропитывают специальными составами. Для уменьшения размеров конденсатора металлические обкладки в виде пленок наносят непосредственно на бумагу. Такие конденсаторы называют металлобумажными. Потери и сопротивление изоляции бумажных конденсаторов сильно меняются под воздействием внешних условий. Поэтому бумажные конденсаторы герметизируют. Для герметизации бумажных конденсаторов относительно небольшой емкости используют цилиндрические фарфоровые корпуса, а для конденсаторов большой емкости - прямоугольные металлические корпуса.

Достоинствами бумажных конденсаторов являются широкий диапазон рабочих напряжений (от 200 до 4000 В) и номинальных величин емкостей (от 470 пФ до 10 мкФ). По величине потерь и по сопротивлению изоляции бумажные конденсаторы значительно уступают слюдяным и керамическим. Кроме того, в связи с тем, что обкладки бумажных конденсаторов представляют собой спираль, такие конденсаторы имеют большую собственную индуктивность. Поэтому бумажные конденсаторы применяют только в низкочастотных цепях (до 1 МГц) и в тех случаях, когда стабильность емкости и сравнительно большие потери не играют первостепенной роли. Например, бумажные конденсаторы часто используют в качестве блокировочных.

**Пленочные конденсаторы.** Пленочными называют конденсаторы имеющие конструкцию, аналогичную бумажным, но в которых бумага заменена синтетической пленкой. Они отличаются от бумажных высоким сопротивлением изоляции, меньшими потерями, более высокой стабильностью емкости. Их можно использовать и в цепях высокой частоты. Пленочные конденсаторы подразделяют на полистирольные, фторопластовые, лакопленочные.

**Конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические).** В простейшем случае такие конденсаторы состоят из двух металлических электродов, погруженных в электролит. Если электроды выполнены из алюминия, его называют алюминиевым, если из тантала — танталовым и т. д. На поверхности одного из электродов (анода) формируют тонкий оксидный слой, служащий диэлектриком конденсатора. Одной обкладкой конденсатора является анод, а другой — электролит. Второй электрод (катод), в качестве которого обычно используют металлический корпус конденсатора, служит лишь выводом от электролита. Если электролит находится в жидком состоянии, конденсатор называют жидкостным; если используют



пастообразный электролит, конденсатор называют сухим. Если оксидный слой на аноде конденсатора покрыть слоем твердого полупроводника, заменяющего электролит, и на него нанести контактный слой, то получится твердый электролитический конденсатор, называемый оксидно-полупроводниковым.

Все электролитические конденсаторы отличаются чрезвычайно большой удельной емкостью, достигающей  $30 \text{ мкФ/см}^3$ , что объясняется малой толщиной оксидной пленки, ее высокой диэлектрической проницаемостью (для алюминия  $\epsilon \approx 10$ , для тантала  $\epsilon \approx 27$ ) и большой активной поверхностью анода.

Основным достоинством электролитических конденсаторов является их большая емкость при относительно небольших размерах и низкой стоимости конденсаторов. Особенно выгодно применение низковольтных электролитических конденсаторов, размеры которых в десятки раз меньше размеров бумажных конденсаторов такой же емкости. Основные недостатки электролитических конденсаторов: пониженная надежность, низкая точность и стабильность емкости, большие потери, низкое сопротивление изоляции, чувствительность к перенапряжениям и температуре.

**Конденсаторы переменной емкости** подразделяют на конденсаторы с механическим и электрическим управлением (вариконды, варикапы). Конденсаторы с механическим управлением состоят из двух систем параллельных пластин, одна из которых может плавно перемещаться по отношению к другой. При этом пластины одной системы заходят в зазоры между пластинами другой, что изменяет активную площадь, а значит, и емкость конденсатора. Систему пластин, неподвижную относительно корпуса конденсатора, называют статором, а подвижную — ротором. Наибольшее распространение получили КПЕ с плоскопараллельными пластинами, вращательным перемещением ротора и воздушным диэлектриком. Они отличаются большой точностью установки емкости, малыми потерями и высокой стабильностью. Конденсаторы с твердым диэлектриком имеют меньшие размеры, но обладают меньшей точностью установки емкости и худшей стабильностью. Они достаточно широко применяются только в малогабаритных транзисторных приемниках.

Основное применение КПЕ находят в качестве элемента настройки колебательных контуров. Поэтому кроме всех характеристик конденсаторов постоянной емкости для них важен закон изменения емкости при настройке. По этому признаку КПЕ разделяют на прямоемкостные, прямоволновые, прямочастотные и специальные.

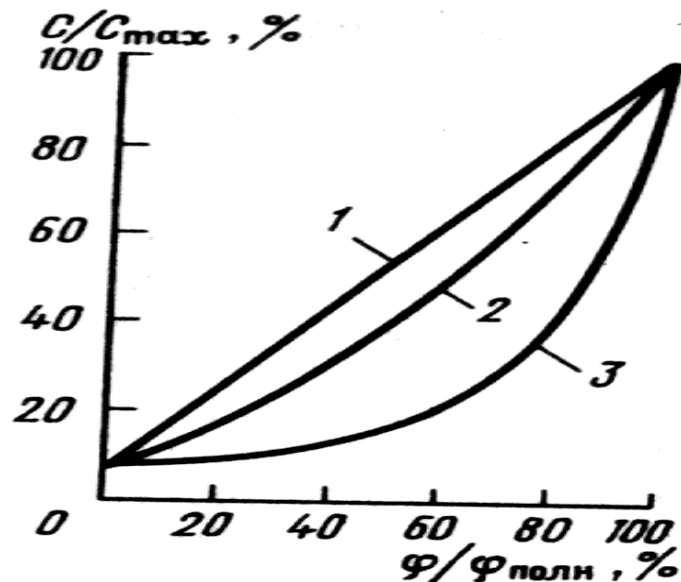


Рисунок 1.1 -Характеристики переменных конденсаторов  
 1 - прямоемкостного; 2 -прямоволнового; 3- прямочастотного.

Прямоемкостным (рис. 1.1, кривая 1) называют КПЕ, емкость которого изменяется пропорционально величине перемещения ротора. С помощью прямоволновых (кривая 2) и прямочастотных (кривая 3) КПЕ, включенных в колебательный контур, удастся получить изменение его настройки, соответственно пропорциональное длине волны или частоте. При использовании КПЕ пределы перестройки контуров в значительной степени определяются максимальной и минимальной величинами емкости конденсатора. Поэтому еще одним важным параметром КПЕ являются значения его  $C_{\min}$  и  $C_{\max}$ .

Широкое применение находят блоки конденсаторов переменной емкости, которые состоят из нескольких конденсаторных секций, посаженных на общую ось. Наиболее часто используют блоки КПЕ из двух или трех одинаковых секций.

**Подстроенные конденсаторы.** К подстроенным конденсаторам предъявляются требования, аналогичные требованиям к КПЕ. Однако для них менее важны требования по точности и закону изменения емкости, а более существенны плавность установки емкости и надежность ее фиксации - сохранение установленной величины емкости во времени, при ударах, вибрациях и других механических воздействиях.

В настоящее время применяют различные подстроечные конденсаторы, которые отличаются как по общей конструкции (конденсаторы с вращающимся ротором, с поступательным перемещением ротора, плоские, дисковые и др.), так и по применяемому диэлектрику (воздушные, с твердым диэлектриком). Остановимся только на одном типе подстроечных конденсаторов— шайбовых керамических конденсаторах типа КПК, которые в отличие от многих подстроечных конденсаторов являются

типовыми. Отечественной промышленностью выпускается несколько типов таких конденсаторов: КПК-1, КПК-МП, КПК-МН.

### **Катушки индуктивности**

Катушки индуктивности — это радиоэлементы, обладающие значительной индуктивностью при относительно малой емкости и малом активном сопротивлении. По назначению все катушки могут быть разделены на высокочастотные и низкочастотные. Первые, в свою очередь, подразделяют на катушки контуров, катушки связи и дроссели высокой частоты. По конструктивному признаку катушки индуктивности разделяют на однослойные и многослойные, экранированные и неэкранированные, катушки без сердечников и катушки с магнитными или немагнитными сердечниками, цилиндрические, плоские и др. Высокочастотные катушки индуктивности могут быть как с сердечниками, так и без них, низкочастотные катушки, которые в основном используются как дроссели, практически всегда имеют сердечники из материала с высокой магнитной проницаемостью. По конструкции последние близки к трансформаторам.

Рассмотрим основные параметры катушек индуктивности.

*Индуктивность* — отношение потокосцепления катушки  $\Psi$  к проходящему через нее току  $i$ :  $L = \Psi/i$ . Индуктивность катушек изменяется в широких пределах. Для высокочастотных катушек значения индуктивности лежат в пределах от нескольких наногенри до десятков миллигенри ( $1 \text{ Гн} = 10^3 \text{ мГн} = 10^9 \text{ нГн}$ ), а для низкочастотных — от долей до десятков Генри. Допускаемые отклонения индуктивности от номинальных значений определяются назначением катушки: для катушек контуров допуск на индуктивность не превышает 0,2—0,5%, для остальных катушек — 10—15%.

*Стабильность* — характеризуется изменением индуктивности катушки под воздействием температуры, влажности и времени. Так же, как для резисторов и конденсаторов, наиболее важно влияние температуры, которое оценивается температурным коэффициентом индуктивности ТКИ, равным относительному изменению индуктивности катушки при изменении температуры на  $1^\circ \text{C}$ .

*Добротность* — определяется выражением  $Q = \omega L/r$ , где  $\omega = 2\pi f$  — рабочая частота,  $L$  — индуктивность катушки,  $r$  — сопротивление потерь катушки. Для современных высокочастотных катушек  $Q$  находится в диапазоне 50...300.

*Собственная емкость* — обусловлена емкостью между отдельными витками и емкостью между обмоткой катушки и корпусом прибора.

*Надежность* — характеризуется отказами, возникающими главным образом из-за окисления проводов и ухудшения изоляции.

Катушки индуктивности, особенно высокочастотные, не подверглись стандартизации и нормализации. Стандартизованы лишь отдельные элементы их конструкций: сердечники и каркасы. Такое положение объясняется разнообразием требований, предъявляемых к катушкам индуктивности, их относительно меньшим распространением, трудностями миниатюризации.

При конструировании катушек индуктивности существенны вопросы экранирования и введения магнитопроводов. Экранирование катушек применяют для устранения паразитных связей и влияния внешних полей. Для этого катушку располагают внутри замкнутого металлического заземленного экрана, под влиянием которого изменяются основные параметры катушки: уменьшается ее индуктивность и добротность, увеличиваются потери и собственная емкость. При этом изменения параметров катушки зависят от соотношения между ее размерами и размерами и расположением экрана. Экраны обычно выполняют в виде круглых или прямоугольных стаканов из алюминия, меди или латуни. Толщина стенок экрана определяется его механической жесткостью и редко превышает 0,5 мм. Изготавливаются экраны выдавливанием, так как сварные и паяные швы часто вносят значительные потери.

Для получения малогабаритных высокочастотных катушек индуктивности различного назначения, особенно для микромодулей и интегральных схем, применяют магнитные сердечники. Такие катушки с сердечниками имеют меньшее число витков при заданной индуктивности, а, следовательно, и меньшие потери, большую добротность и меньшие размеры. Запас добротности позволяет приближать к ним экраны, что еще больше уменьшает их размеры. Ценным качеством таких катушек является возможность изменения их индуктивности (подстройки) за счет перемещения сердечника внутри катушки.

Существует большое разнообразие форм сердечников, основными из которых являются: цилиндрические, броневого, кольцевые, Ш-, Н- и О-образные. Каждая из форм имеет ряд конструктивных вариантов. Для высокочастотных катушек чаще других применяют цилиндрические сердечники, достоинствами которых являются простота и возможность их применения в катушках без существенного изменения конструкции последних.

Промышленностью выпускается ряд типовых цилиндрических сердечников: СЦР — с резьбой, СЦГ — гладкий, СЦТ — трубчатый и др. Сердечники с резьбой непосредственно ввинчиваются в центральное отверстие каркаса и закрепляются в нужном положении специальной мастикой или резиновой ниткой. Если гладкие сердечники используются для настройки, то они снабжаются специальной втулкой с нарезкой, если же они используются для высокочастотных дросселей, где не требуется подстройка индуктивности, то намотку катушки производят непосредственно на сердечник, предварительно покрытый слоем изоляционного лака или бумаги. В частности, именно такие сердечники большой длины используются для магнитных антенн. Материалами магнитных сердечников служат магнитодиэлектрики (альсифер, карбонильное железо) и ферриты. Для подстройки индуктивных катушек КВ и УКВ часто применяют немагнитные сердечники из меди и латуни, отличительная особенность которых состоит в высокой стабильности. С их помощью

удается получить изменение индуктивности на 3—5%, но их введение уменьшает добротность катушки. Для уменьшения влияния емкостей, вносимых такими сердечниками, последние изолируют от корпуса и токнесущих элементов аппаратуры.

### **Трансформаторы.**

Трансформатором (от латинского слова *transformo* - преобразую) называют устройство, состоящее из гальванически не соединенных, связанных между собой магнитным потоком и неподвижных относительно друг друга катушек (обмоток) и предназначенное для преобразования значений переменного тока и напряжения. Обмотку трансформатора, к которой подключают генератор, называют первичной, а обмотки, к которым присоединяют нагрузки, - вторичными. Напряжения между зажимами обмоток и токи в обмотках называют соответственно первичными и вторичными напряжениями и токами трансформатора.

Различают два вида трансформаторов: с ферромагнитными сердечниками и без них (последние называют воздушными).

По применению трансформаторы разделяют на: трансформаторы питания, предназначенные для преобразования электрической энергии в источниках питания; трансформаторы согласования, которые служат для согласования отдельных каскадов в электронных устройствах; импульсные трансформаторы, используемые в импульсных и цифровых устройствах для передачи и формирования импульсов.

Трансформаторы питания всегда содержат ферромагнитные сердечники. Трансформаторы согласования бывают как с ферромагнитными сердечниками, так и воздушными (первые применяют в цепях низкой частоты, вторые — в цепях высокой частоты). Импульсные трансформаторы, как правило, содержат ферромагнитные сердечники. Кроме того, каждую группу трансформаторов можно дополнительно классифицировать по конструкции, влагозащите, стоимости и т. д.

Трансформатор представляет собой законченный конструктивно-технологический узел, содержащий обмотки и магнитопровод (сердечник). Обмотка должна иметь основание — каркас, который придает механическую прочность и жесткость всей конструкции. Для обмоток используют провода с различной изоляцией, обладающей хорошей теплостойкостью. В высоковольтных трансформаторах вводят дополнительную межслоевую изоляцию. Проникновение влаги в промежутки между витками ускоряет процессы разрушения изоляции. Во избежание этого катушки трансформатора подвергают дополнительной влагозащитной обработке.

Важным элементом конструкции являются выводы. Тонкие провода обмоток не могут быть использованы для непосредственного включения в схему из-за малой механической прочности. Поэтому для выводов применяют специальные штырьки и лепестки, которые прочно укрепляются на каркасе или на специальной ленте, смонтированной в катушку; к ним припаивают провода обмоток. Наконец, в конструкцию трансформатора входят и чисто

механические элементы, обеспечивающие крепление обмотки на сердечнике и крепление всего трансформатора на шасси прибора.

**Конструкции сердечников.** Сердечником трансформатора называют замкнутую магнитную систему, служащую для локализации основного магнитного поля. Сердечник трансформатора состоит из стержня и ярма, представляющих собой замкнутую систему в плоскости магнитных силовых линий. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник делают не сплошным, а с изоляционными прокладками. Наиболее распространенными конструкциями сердечников являются: стержневой, броневого и тороидальный. С развитием микроэлектроники появились обращенный тор, сердечники кабельного типа и типа «шпуля».

В трансформаторах более высокого качества применяют сердечники ленточного типа, которые при работе на повышенных частотах делают из лент толщиной до 0,01 мм. Ленточные сердечники навиваются на металлическую оправку, отжигаются, пропитываются специальным склеивающимся лаком, а затем разрезаются.

Чаще всего сердечники размещаются внутри обмоток, но в некоторых конструкциях, например в кольцевых трансформаторах и трансформаторах кабельного типа, оказывается более удобным их обратное расположение. Кольцевой трансформатор состоит из тороидальных обмоток, по периметру которых располагаются ленточные стержневые сердечники. Развитием конструкции кольцевого трансформатора является трансформатор кабельного типа, существенное конструктивное отличие которого от всех других трансформаторов состоит в том, что ему можно придавать любую форму при монтаже.

Весьма существенным показателем при конструировании катушек трансформатора является значение площади, занимаемой в окне магнитопровода медью. Если для обмотки трансформатора используется круглый провод, то при рядовой намотке между проводами остается большая площадь, не заполненная медью, что существенно увеличивает габариты трансформатора. Для повышения коэффициента заполнения окна, провода круглого сечения заменяют проводом прямоугольного сечения или переходят к намотке медной лентой или фольгой. При использовании ленточных проводников не только увеличивается коэффициент заполнения и не возникает пустот между обмотками, но и значительно улучшается теплоотдача, что увеличивает долговечность трансформатора и его способность выдерживать различные перегрузки.

**Аттенюатор.** Аттенюаторами (или делителями напряжения) называют устройства, с помощью которых проводят деление напряжения (ослабление напряжения в заданное число раз).

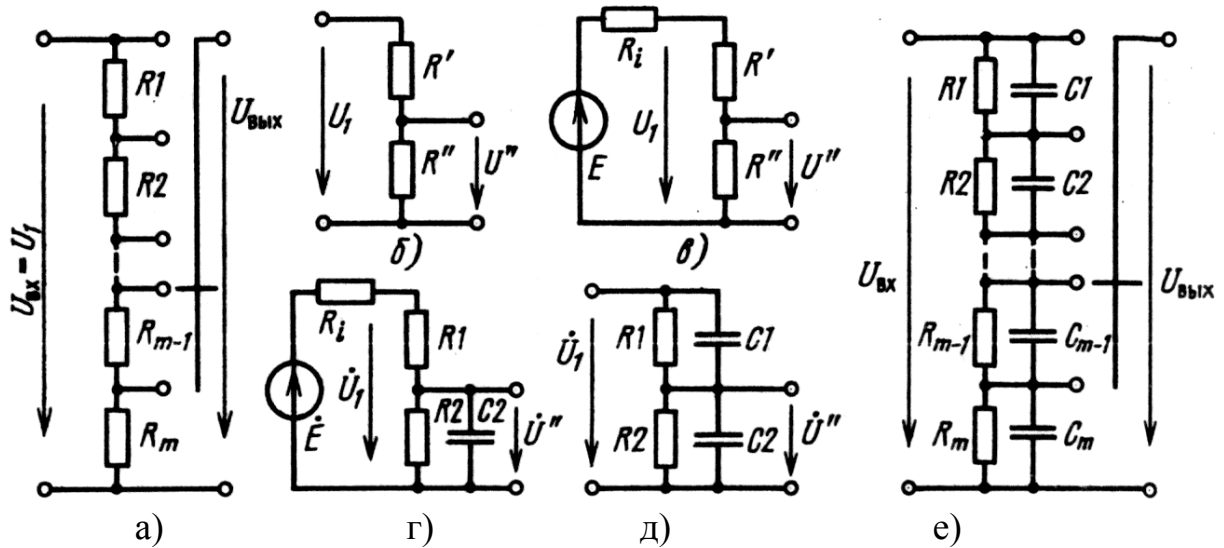


Рисунок 1.2 - Принципиальная и эквивалентные схемы аттенюатора

Аттенюатор обычно строят так, чтобы каждое последующее положение переключателя ослабляло входное напряжение на постоянную величину  $n$ .

**Разделительная цепочка.** В электронных схемах для передачи сигналов между двумя точками, имеющими разный постоянный потенциал, часто применяют простейшую RC-цепочку, в которой выходной сигнал снимается с резистора (рисунок 1.3, а). Величину постоянной времени такой цепочки выбирают так, чтобы сигнал передавался либо практически без искажений, либо искажался так, чтобы происходило его дифференцирование.

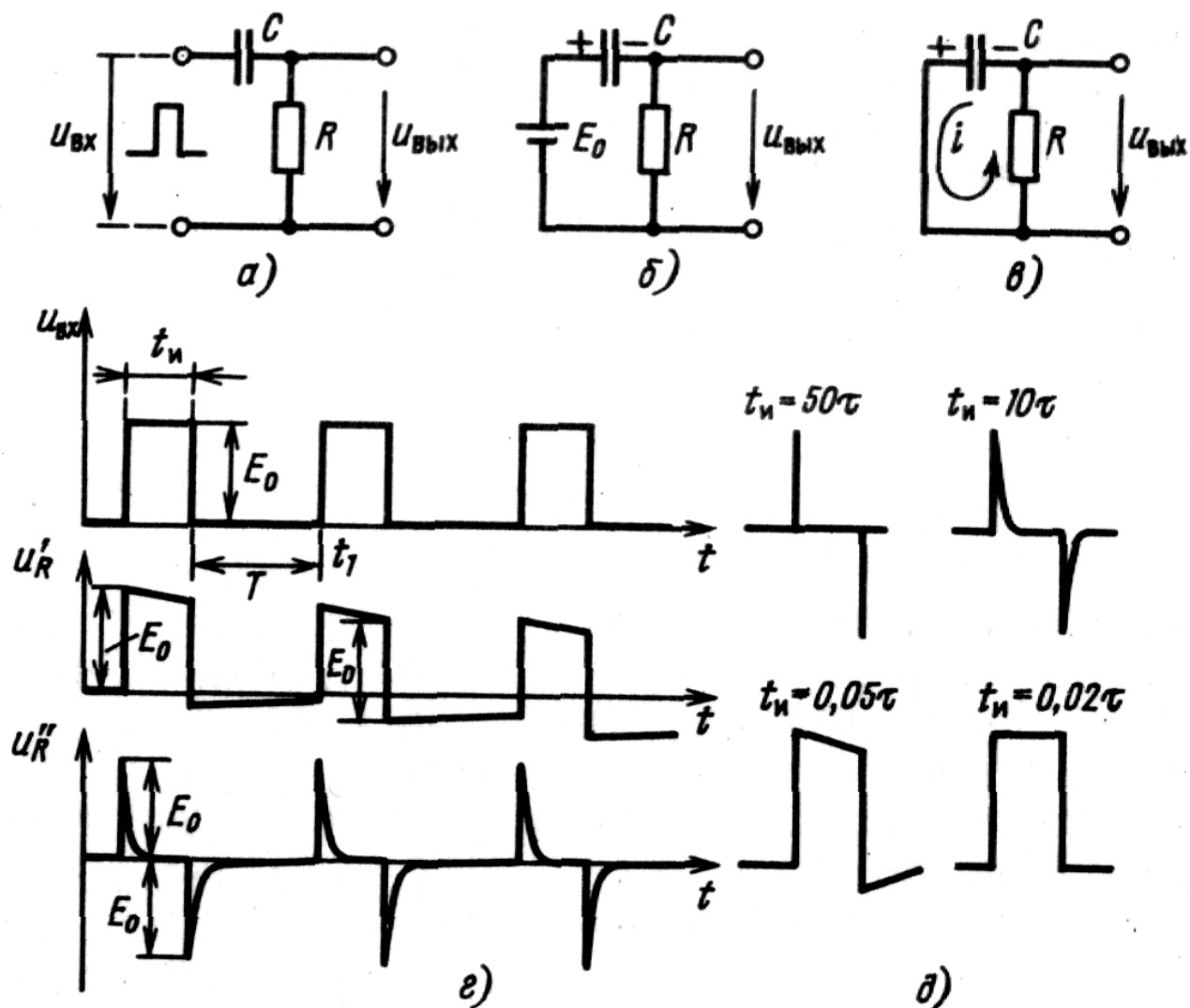


Рисунок 1.3 - Принципиальная схема RC-цепочки (а — в) и временные диаграммы ее работы (г, д)

В зависимости от соотношения между длительностью входного импульса  $t_n$  и постоянной времени  $\tau$  RC-цепочки форма выходного напряжения будет разной.

Таким образом, RC-цепочка при  $\tau \gg t_n$  будет с некоторыми искажениями передавать входной сигнал, а при  $\tau \ll t_n$  с некоторым приближением производить его дифференцирование. Конечно, при разных соотношениях между  $\tau$  и  $t_n$  будут изменяться и искажения, и точность дифференцирования. Форма выходного напряжения для некоторых соотношений между  $\tau$  и  $t_n$  приведена на рисунке 1.3, д.

Можно использовать простейшую RC-цепочку, когда выходное напряжение снимается с конденсатора. Тогда при  $\tau < t_n$  RC-цепочка будет с некоторыми искажениями передавать входной сигнал, а при  $\tau \gg t_n$  — с некоторым приближением его интегрировать.



## Конспект к модулю №2

### Общие сведения о полупроводниках

Полупроводниками называют обширную группу материалов, которые по своему удельному электрическому сопротивлению занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Обычно к полупроводникам относят материалы с удельным сопротивлением  $\rho = (10^{-3} \dots 10^9) \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , к проводникам (металлам) — материалы с  $\rho < 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а к диэлектрикам (изоляторам) - материалы с  $\rho > 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Такая классификация весьма условна, потому что между полупроводниками и диэлектриками нет принципиальных различий.

Так как особенности электропроводности полупроводников тесно связаны с принципом действия полупроводниковых приборов, их параметрами и характеристиками, рассмотрим некоторые основные понятия, связанные с физической сущностью электропроводности.

Согласно принципам квантовой механики электроны в атоме характеризуются вполне определенными значениями энергии, соответствующими разрешенным энергетическим уровням. В изолированном атоме существует конечное число таких энергетических уровней, причем электроны низших уровней сильно связаны с атомом; по мере увеличения уровня энергии связи ослабевает. В отсутствие внешних воздействий атом находится в состоянии, при котором электронами заняты все низшие энергетические уровни, а верхние — свободны. Под влиянием внешних воздействий (тепла, света, электрического или магнитного поля и т. д.) электроны, приобретая дополнительную энергию, могут переходить на более высокие энергетические уровни или вовсе становятся свободными. В группах близкорасположенных однотипных атомов, например в твердом теле, положение принципиально не меняется, но взаимодействие атомов друг с другом приводит к тому, что разрешенные уровни энергии электронов соседних атомов смещаются, образуя целую группу близкорасположенных подуровней, которые образуют так называемые зоны разрешенных уровней энергии, отделенных друг от друга запрещенными зонами энергии  $\Delta E_{\text{д}}$ . Величина  $\Delta E_{\text{д}}$  определяет энергию (в электронвольтах), которую нужно сообщить электрону, чтобы он перешел из более низкой зоны разрешенных уровней энергии в зону разрешенных значений более высокого уровня.

На электропроводность твердого тела наибольшее влияние оказывает расположение двух соседних зон разрешенных уровней энергии, которые называют зоной проводимости I и валентной зоной III. Запрещенная зона II между зоной проводимости и валентной зоной может существовать, а может и отсутствовать, причем ширина этой зоны в разных веществах различна. Металлы отличаются отсутствием запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости, поэтому они характеризуются высокой электропроводностью. В полупроводниках и диэлектриках такая запрещенная зона есть, и отличаются они друг от друга лишь шириной этой зоны. В полупроводниках ширина запрещенной зоны  $\Delta E_{\text{д}}$  между валентной зоной и зоной проводимости мала (меньше 3 эВ). При этом уже при комнатной температуре, когда атому сообщается малое количество

энергии, часть валентных электронов переходит в зону проводимости, а электропроводность полупроводников оказывается не равной нулю. В диэлектриках ширина запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости настолько велика, что практически все валентные электроны остаются на своих орбитах, а это означает, что электропроводность диэлектриков равна нулю.

Для изготовления современных полупроводниковых приборов и особенно интегральных микросхем используют преимущественно кремний, который является монокристаллом — твердым телом с регулярной кристаллической решеткой, содержащей множество одинаковых примыкающих друг к другу тетраэдров (рисунок 2.1, а).

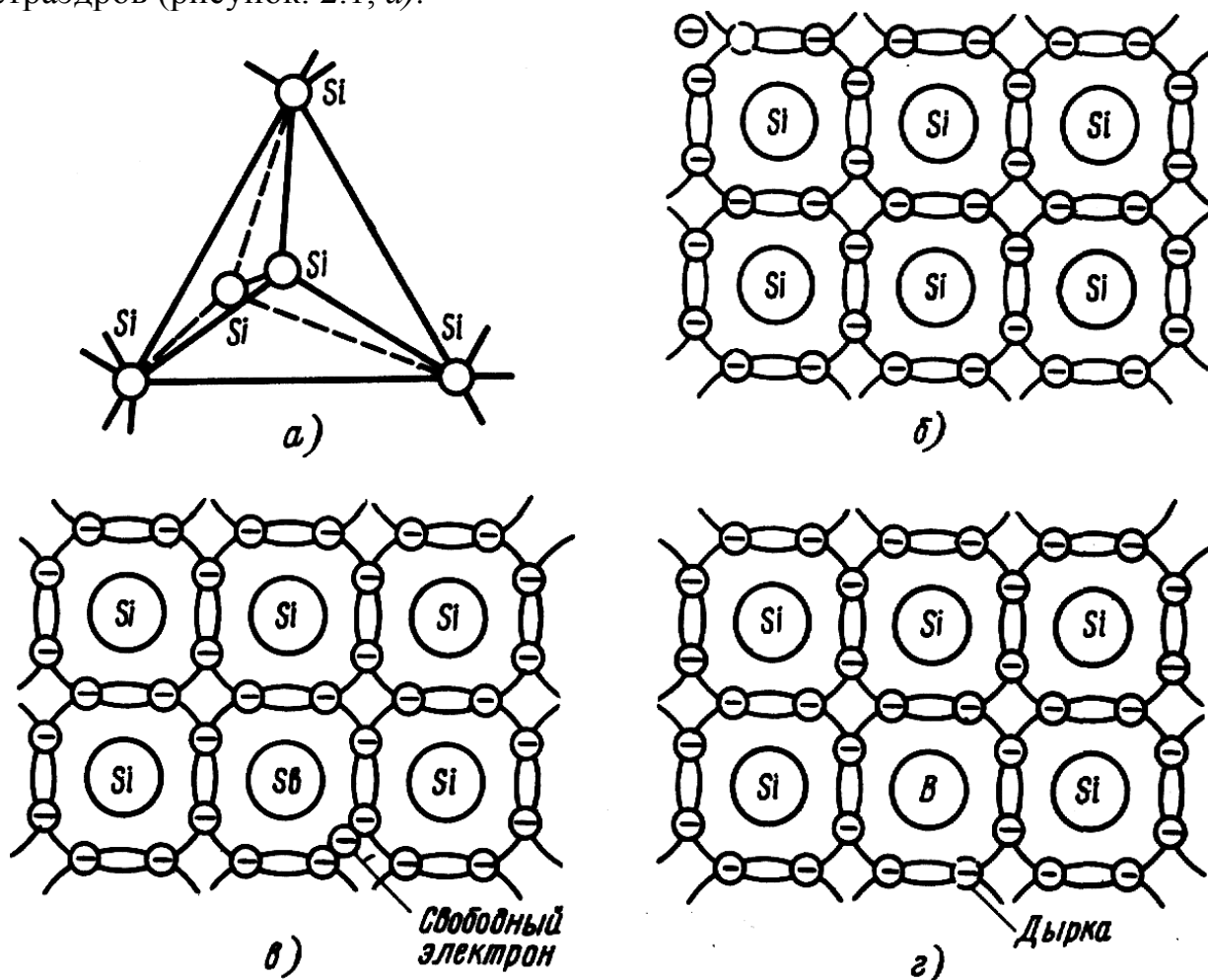


Рисунок 2.1 - Структуры полупроводников

Особенность этой решетки состоит в том, что каждый атом в ней расположен на одинаковом расстоянии от четырех соседних. Условно это можно представить и на плоской модели (рисунок 2.1, б). Связь атомов в кристаллической решетке кремния обусловлена специфическими обменными силами, возникающими в результате попарного объединения валентных электронов соседних атомов. Таковую связь называют *валентной*. При этом каждый атом остается электрически нейтральным.

Структура реального кристалла никогда не бывает идеальной, в любом полупроводнике наблюдаются дефекты, которые подразделяют на дефекты точечного типа (нарушение регулярности в некоторых точках кристалла) и дислокации (смещения плоскостей решетки). Наиболее распространенный точечный дефект решетки состоит в замещении одного из атомов кремния атомом примеси. Эти примеси могут быть паразитными — включениями тех веществ, от которых не удалось избавиться при первоначальной очистке кремния, или полезными — специально введенными в кристалл для получения нужных свойств (рисунок. 2.1 в,г).

Для создания высококачественных полупроводниковых приборов исходный материал должен иметь как можно более правильную кристаллическую структуру и весьма высокую чистоту. Поэтому первой операцией при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем является очистка, после которой допускается не более одного атома примеси на  $10^{10}$  атомов германия и  $10^{13}$  атомов кремния.

В предельно чистом полупроводнике с идеальной кристаллической решеткой, собственном или *i* - полупроводнике (от английского слова *intrinsic* — истинный) при температуре абсолютного нуля в валентной связи участвуют все четыре валентных электрона каждого атома. Это означает, что все электроны находятся в валентной зоне, свободных электронов нет, а проводимость полупроводника равна нулю, т. е. он обладает свойствами идеального изолятора. С повышением температуры валентные связи между отдельными атомами полупроводника нарушаются, что приводит к одновременному образованию свободного электрона и незаполненной связи — дырки вблизи того атома, от которого оторвался электрон. Незаполненная связь может быть замещена одним из валентных электронов соседнего атома, на его месте образуется новая дырка, которая замещается новым электроном и т. д., т. е. дырка, имеющая положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, тоже может перемещаться по кристаллу.

Таким образом, в собственном полупроводнике имеются два типа носителей зарядов — электроны и дырки, причем они всегда образуются и исчезают парами. Число электронов  $n_i$  равно числу дырок  $p_i$ . Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями теплового происхождения, называют *собственной электропроводностью*. Она сильно зависит от температуры и энергии активации.

Электрон, покинувший атом и нарушивший валентную связь, может находиться в свободном состоянии только определенное время. При столкновении с другими атомами кристалла он теряет энергию и, попав в зону дырки, может заполнить освободившуюся валентную связь в другом атоме. Этот процесс называют *рекомбинацией*, а среднее время существования свободного электрона и дырки — *временем жизни* носителей заряда. Движение электронов и дырок происходит в полупроводнике за счет двух процессов: диффузии и дрейфа. Причиной возникновения диффузионного

тока является разность концентраций носителей. Дрейфовый ток связан с действием электрического поля.

Характер электропроводности собственного полупроводника существенно изменяется при добавлении в него атомов примесного вещества. В полупроводниковых приборах и интегральных схемах применяют только примесные полупроводники, в которых в качестве примесей используют элементы V (сурьма, мышьяк, фосфор) и III (индий, бор, алюминий) групп таблицы Менделеева.

При введении в кристалл кремния атома примеси V группы (например, сурьмы) только четыре ее валентных электрона вступают в прочную связь с четырьмя соседними атомами собственного полупроводника (рисунок 2.1, в). Пятый валентный электрон сурьмы оказывается слабо связанным с ядром, и он легко переходит в зону проводимости. При этом примесный атом превращается в неподвижный положительный ион. Свободные электроны, оторвавшиеся от примесных атомов, добавляются к собственным свободным электронам. В этом случае проводимость полупроводника начинает определяться главным образом электронами. Такие полупроводники называют полупроводниками n - типа (от английского слова negative — отрицательный). Примеси, обуславливающие электронную электропроводность, называют *донорными*.

При введении в кристалл кремния атома примеси III группы (например, бора) одна из четырех связей между атомом собственного полупроводника и атомом примеси оказывается незаполненной, что эквивалентно образованию дырки (рисунок 2.1, з) и неподвижного отрицательного иона. Электропроводность таких примесных полупроводников обеспечивается за счет перемещения дырок, а сами полупроводники называют полупроводниками p - типа (от английского слова positive — положительный). Примеси, обуславливающие дырочную электропроводность, называют *акцепторными*.

Присутствие  $N_d$  атомов донорной примеси приводит к появлению  $n_n$  подвижных электронов, причем  $n_n \approx N_d$ . Присутствие  $N_a$  атомов акцепторной примеси приводит к появлению  $p_p$  подвижных дырок, причем  $p_p \approx N_a$ . Чтобы примесная электропроводность преобладала над собственной, концентрация атомов донорной  $N_d$  и акцепторной  $N_a$  примесей должна превышать концентрацию собственных носителей заряда  $n_i = p_i$ . В примесных полупроводниках количество примесей строго дозируется и в  $10^2 \dots 10^5$  раз превышает концентрацию собственных носителей. Носители заряда, концентрация которых в данном полупроводнике преобладает, называют *основными*, а те, которые составляют меньшинство, — *неосновными*. Так, в полупроводнике n - типа основными носителями заряда являются электроны, а в полупроводнике p - типа — дырки. Между концентрациями свободных электронов и дырок в полупроводниках как n , так и p-типов существует соотношение  $n_p p_p = n_n p_n$ .

В большинстве полупроводниковых приборов применяют неоднородные по своим электрофизическим свойствам монокристаллы, в которых можно выделить области с донорными и акцепторными примесями и электронно-

дырочные или *p-n переходы* между двумя областями полупроводников, одна из которых имеет электропроводность *n*-типа, а другая— *p*-типа. На часть поверхности монокристалла каждой области наносится слой металла — электрод прибора, к которому привариваются или припаиваются выводы из тонкой проволоки. Большинство полупроводниковых кристаллов помещается в специальный герметический корпус (металлический, стеклянный или пластмассовый), изолирующий его от окружающей среды. В корпусе имеются специальные внешние выводы, с помощью которых электроды полупроводникового прибора могут быть соединены с соответствующими точками схемы.

Размеры монокристалла в маломощных приборах составляют десятые или сотые доли кубических миллиметров, в мощных — единицы или десятки кубических миллиметров. Размеры корпусов маломощных приборов не превышают нескольких миллиметров, а в мощных приборах достигают нескольких сантиметров. Последние в ряде случаев снабжаются специальными радиаторами для охлаждения. Применяют и бескорпусные полупроводниковые приборы, где вместо корпуса используют специальную защитную пленку. Их размеры меньше, чем у остальных полупроводниковых приборов.

В классификации полупроводниковых приборов используют несколько признаков. В соответствии с характером преобразования энергии различают *электропреобразовательные*, *фотоэлектрические*, *излучающие*, *теплоэлектрические* и другие приборы.

Наиболее многочисленную группу электропреобразовательных приборов подразделяют на диоды, транзисторы, тиристоры и др.

По полупроводниковому материалу приборы разделяют на германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые и т. д. По области рабочих частот — на низкочастотные, высокочастотные и приборы диапазона СВЧ. По мощности — на маломощные, средней мощности и мощные. По конструктивно-технологическим параметрам полупроводниковые приборы разделяют на сплавные, диффузионные, *p-n-p* и *n-p-n*.

Обозначение электропреобразовательных полупроводниковых приборов в соответствии с ОСТ 11336.038—77 состоит из пяти элементов.

**Первый элемент** — буква или цифра — обозначает материал, из которого изготовлен полупроводниковый прибор: германий Г или 1; кремний К или 2; соединения галлия А или 3; соединения индия И или 4.

**Второй элемент** — буква — обозначает подкласс прибора: А — диод СВЧ; В — варикап; Д — диод (общее обозначение); И — туннельный диод; С — стабилитрон; Т — биполярный транзистор; П — полевой транзистор.

**Третий элемент** число или буква — определяет параметр или назначение прибора.

Например, число 1 относится к биполярным транзисторам с мощностью меньше 1 Вт и предельной частотой < 30 МГц, число 2 — к биполярным транзисторам с мощностью меньше 1 Вт и предельной частотой > 300 МГц, а число 4 — к биполярным транзисторам с мощностью меньше 1 Вт, но предельной частотой />300 МГц.

**Четвертый элемент** - число от 101 до 999 — обозначает порядковый номер разработки.

**Пятый элемент** - буква от А до Я (кроме З, О, Ч) — определяет классификацию по параметрам.

### **Электронно – дырочный переход**

В основе работы большинства полупроводниковых приборов и активных элементов интегральных микросхем лежит использование свойств  $p-n$  переходов. Однако  $p-n$  переход не может быть создан путем простого соприкосновения двух полупроводниковых кристаллов с разными типами электропроводности, так как при этом между кристаллами всегда будет существовать некоторый промежуточный слой. Обычно  $p-n$  переходы создают с помощью специальных технологических приемов.

По технологии изготовления  $p-n$  переходы разделяют на сплавные и диффузионные. При изготовлении *сплавного перехода* пластинку примесного полупроводника определенного типа, например кремния  $n$ -типа, тщательно шлифуют до необходимой толщины, затем на ее поверхности укрепляют небольшую таблетку элемента III группы таблицы Менделеева и помещают в печь, где она нагревается до температуры, лежащей ниже точки плавления полупроводника, но выше точки плавления примеси. В результате этого происходит сплавление в кристалл примеси и формирование  $p-n$  перехода. При *диффузионном методе* изготовления  $p-n$  перехода полупроводниковые пластинки с защитным окисным слоем предварительно подвергают фотолитографической обработке, при которой на поверхности пластинки создаются площади заданной конфигурации, свободные от окисного слоя, — «окна». После фотолитографии через эти «окна» проводят диффузию примесей в полупроводниковую пластинку и получают  $p-n$  переходы.

Для изготовления полупроводниковых приборов с заданными электрическими характеристиками необходимо очень точно выдержать размеры областей кристалла с разными типами электропроводности. В сплавном переходе конфигурация отдельных областей кристалла сильно зависит от точности поддержания температуры, толщины пластинки, времени сплавления и количества примесей. Ничтожные отклонения любого показателя от номинального значения приводят к большому разбросу электрических параметров полупроводниковых приборов. Диффузионный процесс более медленный и лучше управляемый, поэтому с помощью диффузии удается создать лучшие  $p-n$  переходы.

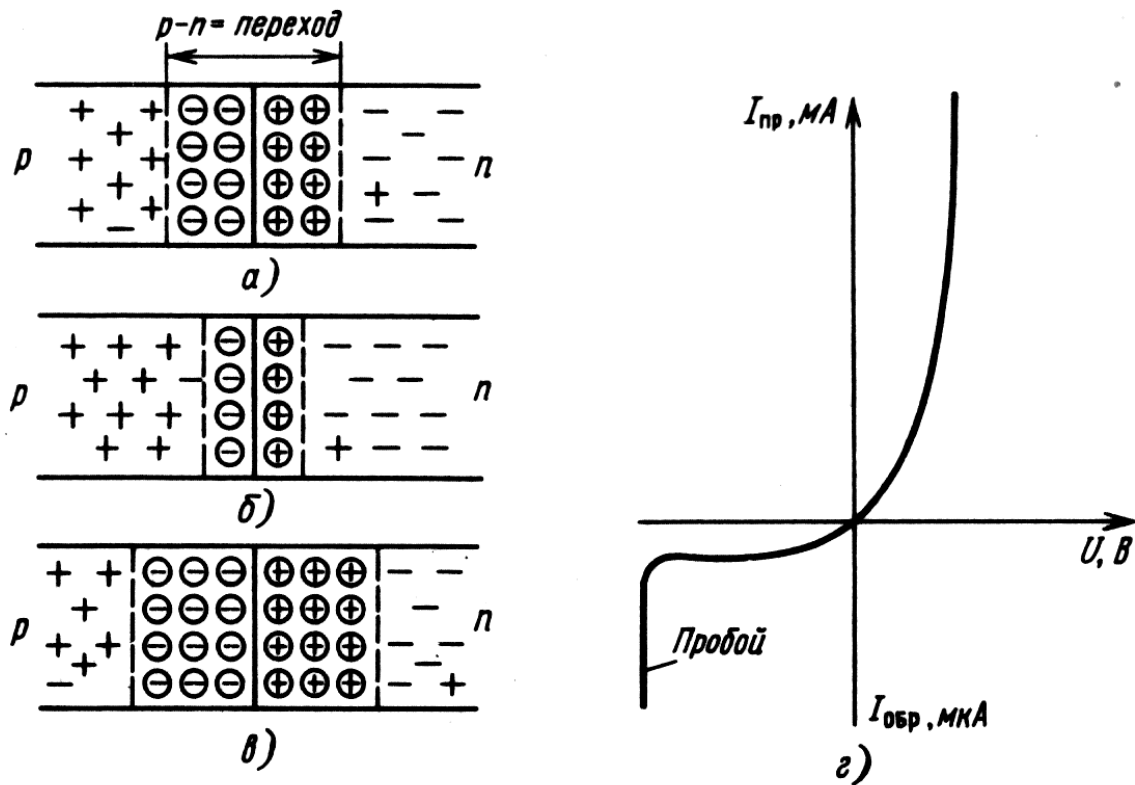


Рисунок. 2.2 - Структура  $p-n$  перехода и его вольт-амперная характеристика (г)

При создании электронно-дырочного перехода на границе между полупроводниками с различными типами электропроводности возникают большие градиенты концентрации подвижных носителей зарядов. Это приводит к тому, что через границу между полупроводниками  $n$ - и  $p$ -типов проходят диффузионные токи (электронный из  $n$ -области, дырочный из  $p$ -области). В результате ухода основных носителей на границе полупроводников с разными типами электропроводности создается *обедненный слой*, в котором в  $n$ -области будут находиться положительно заряженные ионы донорных атомов, а в  $p$ -области — отрицательно заряженные ионы акцепторных атомов. Этот двойной слой протяженностью в десятые доли микрометра и является  $p-n$  переходом (рисунок 2.2, а).

Расположенный в  $p-n$  переходе двойной слой неподвижных электрических зарядов создает внутреннее электрическое поле. Часть  $n$ -области, непосредственно прилегающая к границе полупроводников с разными типами электропроводности, заряжается положительно, а часть  $p$ -области — отрицательно. Вследствие этого между  $p$ - и  $n$ -областями возникает некоторая разность потенциалов — *потенциальный барьер*, который препятствует движению основных носителей из одной области полупроводникового кристалла в другую и одновременно способствует движению неосновных носителей. Под воздействием электрического поля  $p-n$  перехода дырки легко перемещаются из  $n$ -области в  $p$ -область, а электроны — в обратном направлении, но перемещение дырок из  $p$ -области в  $n$ -область так же, как перемещение электронов из  $n$ -области в  $p$ -область, затруднено, т. е. электрическое поле

$p$ - $n$  перехода препятствует увеличению диффузионного тока и не препятствует прохождению дрейфового тока через переход. Естественно, что при отсутствии внешнего напряжения в  $p$ - $n$  переходе устанавливается равновесие, при котором взаимно компенсируются заряды донорных и акцепторных ионов, дрейфовый и диффузионный токи, проходящие в противоположных направлениях. При этом  $p$ - $n$  переход оказывается электрически нейтральным, а ток через него равен нулю.

Если к  $p$ - и  $n$ -областям полупроводникового кристалла, в котором создан электронно-дырочный переход, подвести внешнее напряжение, то из-за большого сопротивления перехода по сравнению с сопротивлением остальной части кристалла оно окажется приложенным только к  $p$ - $n$  переходу. Внешнее напряжение нарушает равновесие в электронно-дырочном переходе, и возникает ток.

При подключении положительного полюса источника внешнего напряжения к  $p$ -области высота потенциального барьера уменьшается, а диффузионный ток основных носителей заряда резко возрастает. Такое включение  $p$ - $n$  перехода называют *прямым* (рисунок 2.2, б). При прямом включении происходит преимущественное введение носителей зарядов в те области полупроводникового кристалла, где они являются неосновными, поэтому этот режим работы  $p$ - $n$  перехода называют режимом инъекции неосновных носителей. Если изменить полярность внешнего напряжения (подключить к  $p$ -области отрицательный полюс источника), высота потенциального барьера в  $p$ - $n$  переходе падает. Уже при  $U \approx -0,5$  В диффузионный ток прекращается и при дальнейшем повышении внешнего напряжения через  $p$ - $n$  переход будет проходить только дрейфовый ток неосновных носителей, который называют *обратным*. Так как число неосновных носителей значительно меньше, чем основных, величина тока через переход в этом случае будет небольшой по сравнению с током при прямом включении и практически постоянной при изменении внешнего напряжения в широких пределах. Указанное включение  $p$ - $n$  перехода называют *обратным* (рисунок 2.2, в).

Таким образом  $p$ - $n$  переход обладает несимметричной вольт-амперной характеристикой (рисунок 2.2, г). При прямом включении через него проходит большой прямой ток, а при обратном - незначительный обратный ток, который практически определяется собственной электропроводностью полупроводника, сильно зависящей от температуры среды. Например, в германиевых полупроводниковых приборах обратный ток  $p$ - $n$  перехода возрастает примерно вдвое при повышении температуры на каждые  $10^0$  С.

При больших отрицательных напряжениях в  $p$ - $n$  переходе наблюдается резкий рост обратного тока. Это явление называют *пробоем*  $p$ - $n$  перехода. Пробой перехода возникает при достаточно сильном электрическом поле, когда неосновные носители зарядов ускоряются настолько, что ионизируют атомы полупроводника. При ионизации создаются электроны и дырки, которые, разгоняясь, снова ионизируют атомы и т. д., в результате чего диффузионный ток через переход резко возрастает, а на вольт-амперной характеристике  $p$ - $n$



перехода в области больших отрицательных напряжений наблюдается скачок обратного тока. Следует отметить, что после пробоя переход выходит из строя только тогда, когда происходят необратимые изменения его структуры в случае чрезмерного перегрева, который наблюдается при *тепловом пробое*. Если же мощность, выделяющаяся на *p-n* переходе, поддерживается на допустимом уровне, он сохраняет работоспособность и после пробоя. Такой пробой называют *электрическим* (восстанавливаемым).

### **Полупроводниковые диоды**

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним *p-n* переходом и двумя выводами. Конструктивно такой диод представляет собой кристалл полупроводника, в котором одним из технологических приемов выполнен *p-n* переход. Часть поверхностей двух различных областей кристалла, образующих переход, покрывают металлической пленкой, к которой приваривают или припаивают внешние выводы. Конструкция сплавного диода в стеклянном корпусе показана на рисунке 2.3, а, а бескорпусного диффузионного диода — на рисунке 2.3, б.

Основным элементом полупроводникового диода является *p-n* переход, поэтому вольт-амперная характеристика реального диода близка к вольт-амперной характеристике *p-n* перехода, приведенной на рисунке 2.4, г. Однако работа реального полупроводникового диода и его вольт-амперная характеристика несколько отличаются от *p-n* перехода, рассмотренного выше. Основные отличия обусловлены следующими причинами.

Во-первых, в реальных диодах, как правило, используют несимметричные *p-n* переходы, для которых выполняются условия  $p_p \gg n_n$  или  $n_n \gg p_p$ . Резкое различие в концентрации основных носителей зарядов приводит к тому, что одна из областей полупроводникового кристалла (область с большей концентрацией основных носителей) становится низкоомной, а другая — высокоомной. Низкоомная область является доминирующим источником подвижных носителей зарядов, и ток через диод при прямом включении *p-n* перехода будет практически целиком определяться потоком ее основных носителей. Поэтому низкоомную область полупроводникового диода называют *эмиттером*. Различие в концентрации основных носителей зарядов сказывается и на расположении *p-n* перехода на границе областей с различным типом электропроводности. В связи с большей концентрацией носителей в низкоомной области при образовании перехода в ней в единице объема «обнажится» большее количество ионов, чем в высокоомной области. Так как любой *p-n* переход в состоянии равновесия остается электрически нейтральным, ширина обедненного слоя в высокоомной области оказывается больше. Если различие в концентрации основных носителей велико, то *p-n* переход будет почти целиком расположен в высокоомной области, которая получила название *базы*.

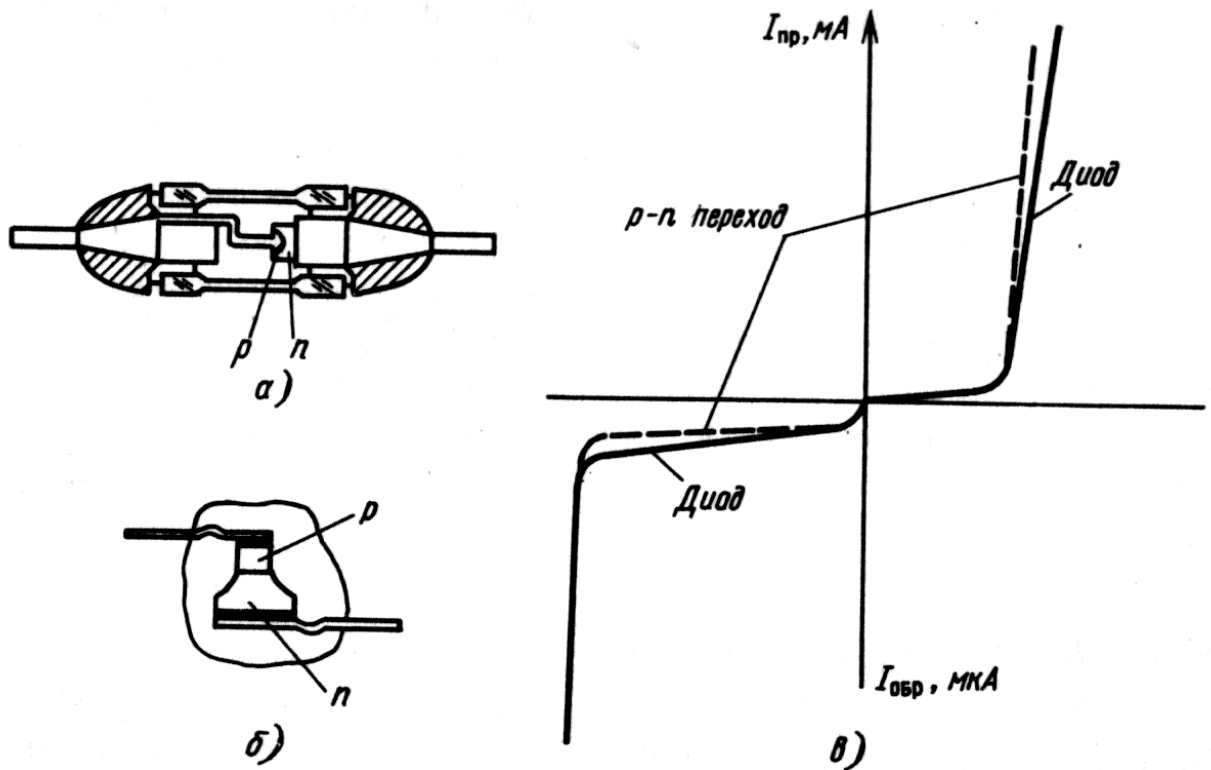


Рисунок 2.3. Конструкции полупроводниковых диодов (а, б) и его вольт-амперная характеристика (в)

Во-вторых, сопротивление объема полупроводникового кристалла не равно нулю, и при больших значениях прямого тока им нельзя пренебрегать. Так как в реальных диодах сопротивление эмиттера  $r_э$  значительно меньше сопротивления базы, учитывают влияние на прямую ветвь вольт-амперной характеристики диода только сопротивление базы  $r_б$ .

В-третьих, реальный диод имеет конечные размеры, поэтому необходимо учитывать процессы, происходящие на поверхности его кристалла. Наиболее важным является ток утечки, который влияет на обратную ветвь вольт-амперной характеристики диода.

Последние две причины приводят к тому, что прямой ток диода оказывается меньше, чем в  $p-n$  переходе, а обратный ток не остается постоянным, а медленно возрастает (рисунок 2.3, в).

Полупроводниковые диоды весьма многочисленны, и одним из основных классификационных признаков служит их назначение, которое связано с использованием определенного явления в  $p-n$  переходе.

**Первую группу** составляют выпрямительные или силовые диоды, для которых основным является вентильный эффект (большой ток при прямом напряжении и малый ток при обратном напряжении).

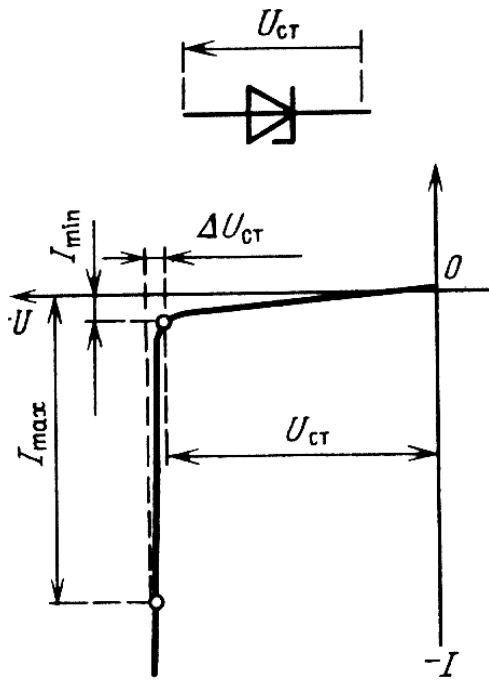


Рисунок 2.4 - ВАХ стабилитрона

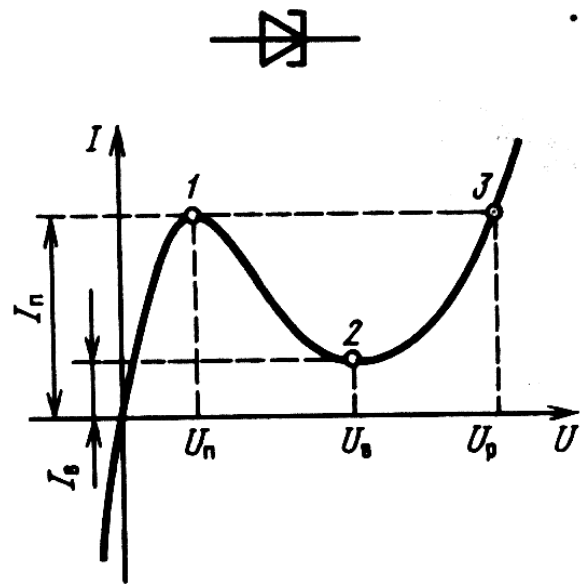


Рисунок 2.5 – ВАХ  
туннельного диода

Для них наиболее важны статические параметры, характеризующие вентильные свойства: сопротивление в прямом и обратном направлениях. Так как это мощные диоды, для них также существенны максимальный прямой ток и допустимое обратное напряжение.

**Вторая группа** диодов (детекторные, преобразовательные, переключающие) также использует вентильный эффект, но это маломощные высокочастотные диоды, поэтому для них кроме тех же статических параметров, характеризующих вентильные свойства, важны собственная емкость диода и индуктивность его выводов. Для уменьшения этих емкостей и индуктивностей используют диоды с малой площадью  $p-n$  перехода и короткими выводами. В частности, широко применяют точечные диоды. Диоды **третьей группы** работают в режиме электрического пробоя. На них подается обратное напряжение, величина которого подбирается близкой к  $U_{ст}$  (рисунок 2.4 б), за счет чего на таком диоде, называемом *стабилитроном*, удастся получить незначительное изменение выходного напряжения — стабилизировать постоянное напряжение. Основными параметрами стабилитронов являются: напряжение стабилизации  $U_{ст}$  и величина  $\Delta U_{ст}$ , а также значения  $I_{min}$  и  $I_{max}$ .

Наконец, в диодах **четвертой группы** используются емкостные свойства  $p-n$  перехода. В связи с тем, что  $p-n$  переход представляет собой область, обедненную носителями зарядов, он является как бы слоем диэлектрика между двумя проводящими областями. Это позволяет рассматривать  $p-n$  переход как своеобразный плоский конденсатор, емкость которого

определяется шириной  $p$ - $n$  перехода. Если к диоду приложить обратное напряжение и изменять его величину, то ширина  $p$ - $n$  перехода будет меняться, что эквивалентно изменению его емкости. Такое свойство  $p$ - $n$  перехода позволяет использовать полупроводниковый диод в качестве прибора с электрически управляемой емкостью — *варикапа* (от первых слогов английских слов *variable* — переменный и *capacity* — емкость). Основными параметрами варикапов служат:  $C_{ном}$ ,  $C_{min}$ ,  $C_{max}$ , а также величина потерь.

Характеристики диода существенно меняются от концентрации примесей в полупроводнике. Например, если концентрация доноров в  $n$ -области и акцепторов в  $p$ -области в тысячи раз выше, чем у обычных диодов, толщина  $p$ - $n$  перехода оказывается очень малой (у обычных диодов она около 1 мкм, а при такой большой концентрации носителей — 0,001 мкм). Это приводит к значительному отличию механизма прохождения тока через тонкий  $p$ - $n$  переход.

Кроме диффузии здесь наблюдается *туннельный эффект*, который заключается в том, что благодаря волновым свойствам электрона происходит его переход через потенциальный барьер без потери энергии. Максимум туннельного эффекта наблюдается при прямом напряжении на переходе порядка 100 мВ.

Диоды с такой высокой концентрацией примесей в эмиттере и базе называют *туннельными*, их вольт-амперные характеристики (рисунок 2.5) существенно отличаются от характеристик обычных диодов: в туннельном диоде не наблюдается вентильного эффекта; в области небольших положительных напряжений на вольт-амперной характеристике туннельного диода имеется так называемый «падающий» участок, который характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением.

В качестве параметров туннельных диодов используют напряжение пика  $U_{п}$ , ток пика  $I_{п}$ , напряжение впадины  $U_{в}$ , ток впадины  $I_{в}$  и напряжение  $U_{р}$ , при котором ток равен току пика. Указанные значения напряжений и токов соответствуют точкам 1, 2, 3 вольт-амперной характеристики туннельного диода (рисунок 2.5).

Наиболее интересным является режим работы туннельного диода, когда рабочая точка располагается на падающем участке вольт-амперной характеристики и когда диод имеет отрицательное сопротивление. Это позволяет создавать особые схемы на туннельных диодах, например генераторы с внутренним отрицательным сопротивлением.

## Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими  $p-n$  переходами и тремя или более выводами.

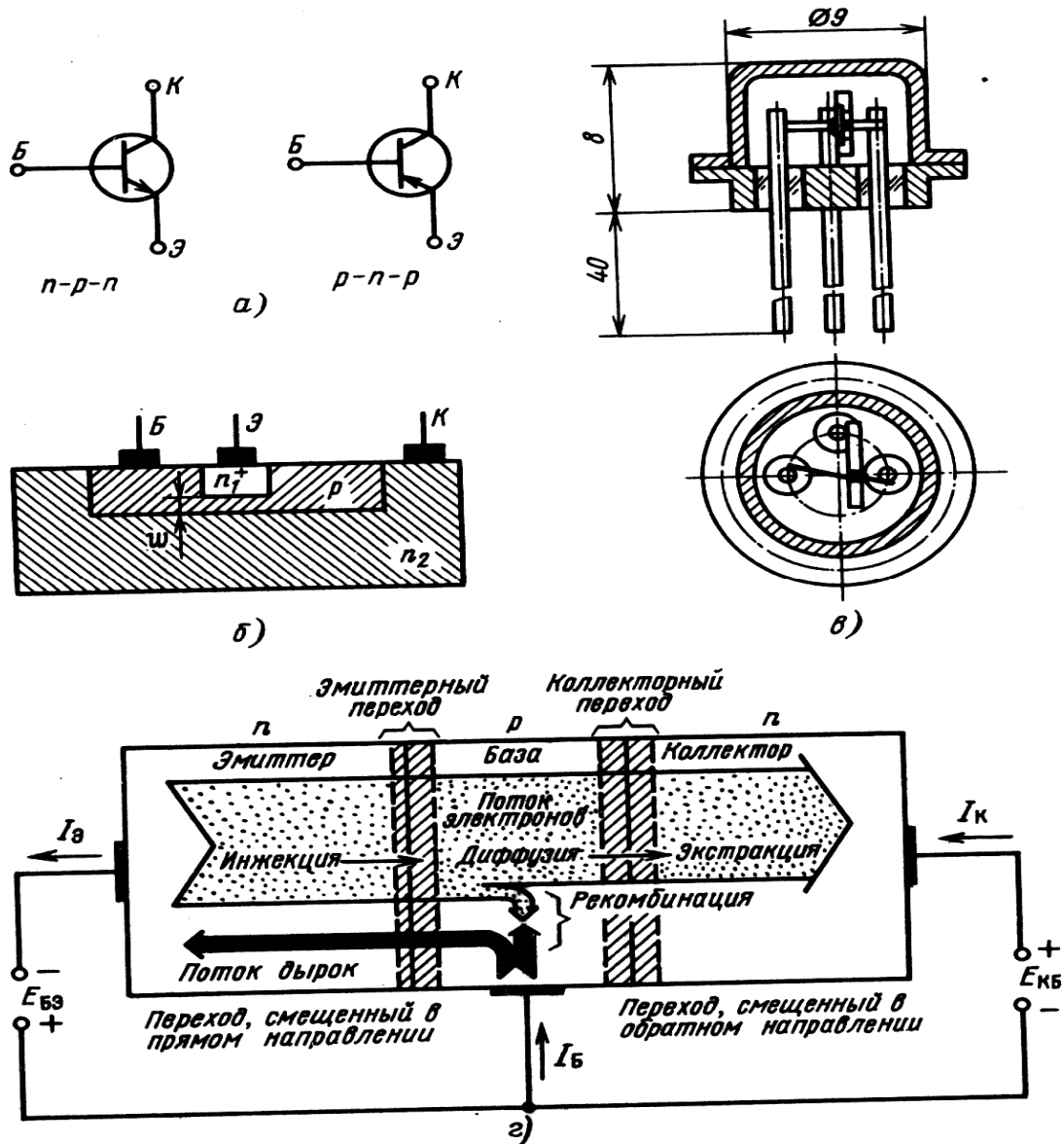


Рисунок 2.6 - Биполярные транзисторы (а — в) и принцип работы  $n-p-n$  транзистора (z)

Он представляет собой полупроводниковый кристалл, в котором две крайние области с одностипной электропроводностью разделены областью противоположной электропроводности. В зависимости от электропроводности

этих трех областей различают транзисторы  $n-p-n$  и  $p-n-p$  типов (рисунок 2.6, а). Термин «биполярный» подчеркивает, что в работе таких транзисторов играют роль оба типа носителей зарядов — электроны и дырки. В настоящее время распространены  $n-p-n$  транзисторы, которые и будут рассматриваться ниже.

В реальных транзисторах  $p-n$  переходы существенно различаются. Один из них имеет гораздо большую площадь, чем другой, т. е. реальные биполярные транзисторы — асимметричные приборы. Эта асимметрия показана на рисунке 2.6, б, из которого видно, что переход  $n_1^+ - p$  имеет значительно меньшую площадь по сравнению с переходом  $n_2 - p$ . Кроме того, в реальных транзисторах наблюдается и асимметрия в концентрации примесей. Один из крайних слоев, на рисунок 2.6, б слой  $n_1^+$ , легирован (имеет концентрацию примесей) значительно сильнее, чем слой  $n_2$ . Средний слой транзистора называют *базой*, крайний сильно легированный слой меньшей площади ( $n_1^+$ ) называют *эмиттером*, а слой с большей площадью, но легированный меньше эмиттера ( $n_2$ ) — *коллектором*. Соответственно  $n_1 - p$  переход называют *эмиттерным*, а  $n_2 - p$  переход — *коллекторным*.

Конструктивно транзистор представляет собой полупроводниковый кристалл, часть поверхностей которого (базы, эмиттера и коллектора) покрывается металлической пленкой. К этим пленкам приваривают или припаивают внешние выводы всех электродов транзистора. Сам кристалл укрепляют на кристаллодержателе и помещают в герметизированный корпус (рисунок 2.6, в), а выводы через изоляторы в дне корпуса выводят наружу. В мощных транзисторах коллектор часто непосредственно соединяют с основанием, что увеличивает рассеиваемую на нем мощность. В этом случае коллекторным выводом служит основание корпуса транзистора.

Рабочей областью обоих  $p-n$  переходов является активная область, расположенная под донной частью эмиттерного перехода. Остальные участки полупроводникового кристалла являются пассивными. Взаимодействие между  $p-n$  переходами обеспечивается малой шириной базы  $w$ , которая у современных транзисторов не превышает несколько микрон. Основные свойства транзистора определяются процессами в его базе. Если база однородна, движение носителей в ней связано только с диффузией. Если же база неоднородна, то в ней образуется встроенное электрическое поле и на движение носителей определенное влияние будет оказывать и дрейф. В силу этого различают *бездрейфовые* и *дрейфовые транзисторы* (последние имеют наибольшее распространение в интегральных микросхемах).

На каждый  $p-n$  переход транзистора может быть подано как прямое, так и обратное напряжение. Соответственно различают четыре режима работы транзистора: *режим отсечки* — на оба перехода подано обратное напряжение; *режим насыщения* — на оба перехода подано прямое напряжение; *активный режим* — на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный — обратное; *инверсный режим* — на эмиттерный переход подано обратное напряжение, а на коллекторный — прямое.

Работа  $n-p-n$  транзистора в активном режиме показана на рисунке 2.6, г. Источник питания  $E_{БЭ}$  подключен к эмиттерному переходу в прямом

направлении (« —» на эмиттере), и через эмиттерный переход проходит прямой ток. При этом из эмиттера в базу инжектируются электроны, а из базы в эмиттер—дырки.

Однако в связи с тем, что эмиттер легирован значительно сильнее базы, поток электронов на много больше потока дырок и именно он определяет процессы, происходящие в транзисторе. Инжектированные из эмиттера электроны в базе оказываются неосновными носителями зарядов, и они двигаются главным образом за счет диффузии, стремясь равномерно распределиться по всему объему базы. Так как толщина базы мала, большинство электронов не успевает рекомбинировать в ней и достигает коллекторного перехода.

Вблизи коллекторного перехода поток электронов попадает под действие электрического поля этого обратносмещенного перехода, что вызывает быстрый дрейф электронов через коллекторный переход в область коллектора (их экстракцию). В коллекторе электроны становятся основными носителями зарядов, они легко доходят до коллекторного вывода, создавая ток во внешней цепи транзистора. Дрейф электронов через коллекторный переход снижает их концентрацию в области базы, что создает направленную диффузию инжектируемого эмиттером потока электронов. Однако небольшая часть электронов, инжектированных эмиттером, все же успевает рекомбинировать в области базы. Поэтому не все электроны, прошедшие через эмиттерный переход, доходят до коллекторного перехода. Вследствие этого коллекторный ток  $I_K$  всегда оказывается меньше эмиттерного  $I_E$ . Рекомбинация электронов в базе вызывает соответствующий ток во внешней для базы цепи — ток базы  $I_B$ .

Между эмиттерным, коллекторным и базовым токами существует очевидное соотношение

$$I_E = I_K + I_B$$

Параметр, определяющий долю носителей зарядов, инжектированных в базу и достигших вследствие диффузии коллектора, называют *коэффициентом передачи эмиттерного тока*

$$h_{21B} = \Delta I_K / \Delta I_E$$

который для современных транзисторов очень близок к единице (0,9—0,997).

Вторым физическим параметром, характеризующим биполярный транзистор, является *коэффициент передачи базового тока*

$$h_{21E} = \Delta I_K / \Delta I_B.$$

Его типичное значение 100—150.

В реальном транзисторе к составляющей коллекторного тока, обусловленной потоком инжектируемых эмиттером электронов, прибавляется

составляющая обратного тока коллекторного  $p - n$  перехода  $I_{KO}$ . Поэтому полный ток коллектора определяется выражением

$$I_K = h_{21Э} I_B + I_{KO}$$

Основными характеристиками, определяющими свойства биполярного транзистора, являются его *статические характеристики*. Однако, прежде чем обсуждать эти характеристики, необходимо заметить следующее.

Во-первых, процессы, протекающие в транзисторе, определяются его входным током. Для того чтобы этот ток найти, необходимо знать зависимость  $I_{вх}$  ( $U_{вх}$ ). А так как входной ток транзистора зависит не только от входного, но и от выходного напряжения, для полной характеристики транзистора нужно иметь два семейства статических характеристик: входные и выходные. Во-вторых, вид статических характеристик транзистора зависит от схемы его включения. Очевидно, что при любой схеме включения физические процессы в транзисторе не меняются, но существенно изменяются входные и выходные величины. Различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

**В схеме с ОБ** (рисунок 2.7, а) входным напряжением транзистора является напряжение между базой и эмиттером, входным током — ток эмиттера, а входными статическими характеристиками — семейство  $I_Э(U_{ЭБ})$  при  $U_{КБ} = const$ .

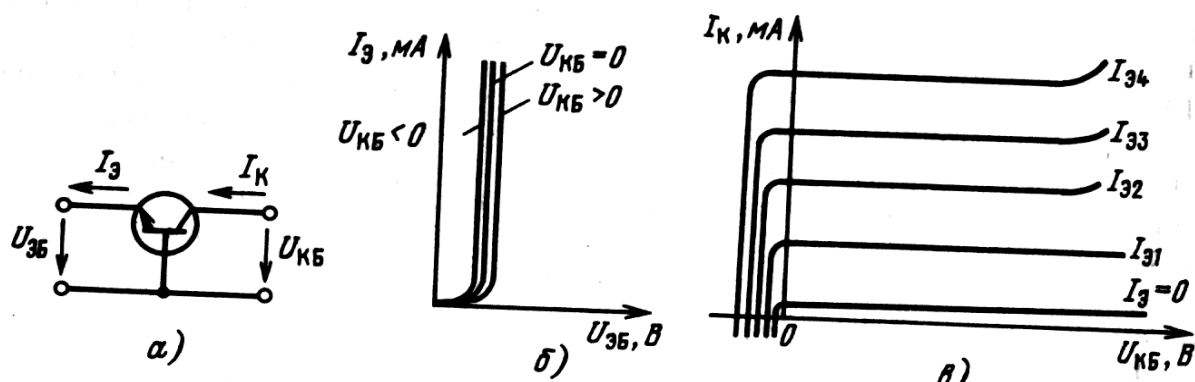


Рисунок 2.7 - Схема включения транзистора с общей базой (а) и его входные (б) и выходные (в) характеристики

Характеристика этого семейства с параметром  $U_{КБ} = 0$  представляет собой обычную вольт-амперную характеристику  $p-n$  перехода (эмиттерного), которая отличается большим прямым током  $I_Э$  через переход при  $U_{ЭБ} > 0$  и малым обратным током при  $U_{ЭБ} < 0$ . Взаимодействие эмиттерного и коллекторного переходов в транзисторе заключается в том, что изменение  $U_{КБ}$  приводит к изменению ширины коллекторного перехода, а значит, и ширины базы, за счет чего меняется величина тока  $I_Э$ . При  $U_{КБ} > 0$  ширина базы увеличива-

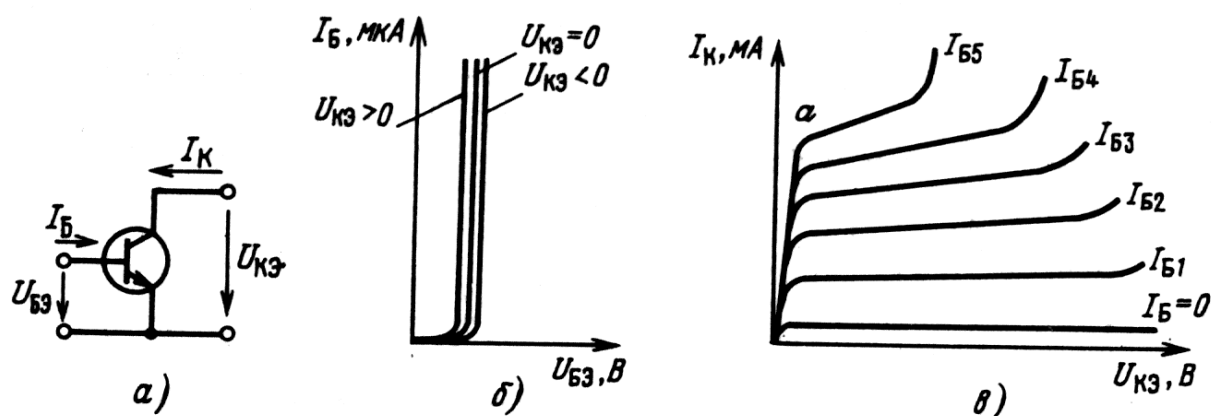


ется, ток  $I_{\mathcal{E}}$  уменьшается, а кривые  $I_{\mathcal{E}}(U_{\mathcal{EБ}})$  сдвигаются вправо; при  $U_{\mathcal{КБ}} < 0$  эти кривые сдвигаются влево. Необходимо отметить, что все входные статические характеристики располагаются очень близко друг к другу, что говорит о слабом влиянии напряжения  $U_{\mathcal{КБ}}$  на процессы, протекающие во входной цепи транзистора. Кроме того, входные статические характеристики обладают существенной нелинейностью, что приводит к значительным искажениям сигналов во входной цепи транзистора.

Выходным напряжением транзистора в схеме с ОБ является напряжение между базой и коллектором, выходным током — ток коллектора, а выходными статическими характеристиками — семейство  $I_{\mathcal{К}}(U_{\mathcal{КБ}})$   $I_{\mathcal{E}} = \text{const}$ . Вид семейства выходных статических характеристик зависит от вольт-амперной характеристики  $p-n$ -перехода, но теперь уже коллекторного. При  $U_{\mathcal{КБ}} > 0$  выходным током транзистора будет обратный ток коллекторного перехода  $I_{\mathcal{К0}}$ , который определяется собственной электропроводностью полупроводникового кристалла и мало зависит от напряжения на переходе. При  $U_{\mathcal{КБ}} < 0$  выходным током транзистора оказывается прямой ток коллекторного перехода, величина которого непосредственно связана с напряжением  $U_{\mathcal{КБ}}$ , а ток  $I_{\mathcal{К}}$  резко меняется при изменении выходного напряжения. При построении выходных статических характеристик биполярного транзистора в электронике принято принимать за положительное направление выходного тока обратный ток коллекторного перехода, поэтому все семейство выходных характеристик располагается в первом квадранте.

При  $I_{\mathcal{E}} = 0$  и  $U_{\mathcal{КБ}} \geq 0$  характеристика  $I_{\mathcal{К}}(U_{\mathcal{КБ}})$  идет почти параллельно оси абсцисс. При  $I_{\mathcal{E}} > 0$  и  $U_{\mathcal{КБ}} \geq 0$  на величину выходного тока транзистора основное влияние оказывает ток, обусловленный инжекцией электронов через эмиттерный переход (ток  $I_{\mathcal{E}}$ ), и его изменение приводит к пропорциональному изменению тока коллектора. Поэтому семейство выходных статических характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с ОБ, при  $I_{\mathcal{E}} > 0$  и небольших положительных напряжениях на коллекторе представляет собой ряд прямых, идущих почти параллельно оси абсцисс. В области больших положительных значений  $U_{\mathcal{КБ}}$  выходные статические характеристики начинают заметно изгибаться, так как напряжение на коллекторном переходе приближается к напряжению пробоя. При  $I_{\mathcal{E}} > 0$  и  $U_{\mathcal{КБ}} < 0$  через коллекторный переход проходит прямой ток, величина которого главным образом зависит от величины напряжения  $U_{\mathcal{КБ}}$ .

**В схеме с ОЭ** (рисунок 2.8, а) входным напряжением транзистора будет напряжение между базой и эмиттером, входным током — ток базы, а входными статическими характеристиками — семейство  $I_{\mathcal{Б}}(U_{\mathcal{БЭ}})$  при  $U_{\mathcal{КЭ}} = \text{const}$ . Эти характеристики очень похожи на входные характеристики в схеме с ОБ, но, во-первых, ток базы примерно в  $h_{21\mathcal{E}}$  раз меньше тока эмиттера, поэтому масштаб по оси ординат на рисунке 2.8, а примерно в  $h_{21\mathcal{E}}$  раз больше масштаба на рисунке 2.7, б. Во-вторых, при увеличении напряжения  $U_{\mathcal{КЭ}}$  ток  $I_{\mathcal{Б}}$  уменьшается.



Рисок 2.8 - Схема включения транзистора с общим эмиттером (а) и его входные (б) и выходные (в) характеристики

Выходным напряжением в схеме с ОЭ является напряжение между эмиттером и коллектором, выходным током — ток коллектора, а выходными статическими характеристиками - семейство  $I_K (U_{КЭ})$   $I_B = \text{const}$ . Эти выходные характеристики отличаются от выходных характеристик того же транзистора, включенного по схеме с ОБ. Различия обусловлены тем, что выходное напряжение  $U_{КЭ}$  приложено одновременно к обоим переходам транзистора и в зависимости от соотношений между  $U_{КЭ}$  и  $U_{БЭ}$  режим транзистора меняется. При  $U_{КЭ} < U_{БЭ}$  и одинаковой полярности этих напряжений («плюс» на коллекторе и на базе) транзистор будет находиться в режиме насыщения, так как и на эмиттерном, и на коллекторном переходах будет прямое напряжение. При увеличении  $U_{КЭ}$  напряжение на коллекторном переходе сначала станет равным нулю ( $U_{КЭ} = U_{БЭ}$ ), а затем (при  $U_{КЭ} > U_{БЭ}$ ) окажется обратным. При этом транзистор переходит в активный режим. В режиме насыщения выходной ток транзистора является прямым током коллекторного перехода и его величина прямо связана с напряжением на коллекторном переходе, а следовательно, она зависит от  $U_{КЭ}$ . В активном режиме выходной ток транзистора в основном определяется током, обусловленным инжекцией электронов из эмиттера, а на семействе выходных статических характеристик будут наблюдаться пологие участки. В отличие от семейства характеристик, приведенных на рисунке 2.7, в, пологие участки семейства выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ имеют больший наклон. Это связано с тем, что при снятии выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ, для выполнения условия  $I_B = \text{const}$  необходимо изменять соотношения между  $U_{КЭ}$  и  $U_{БЭ}$ .

Семейства входных и выходных характеристик биполярного транзистора содержат подробную информацию, которая при анализе ряда схем оказывается излишней. При рассмотрении транзистора как элемента схемы, работающего при малом сигнале, удобно представлять его в виде четырехполюсника и описывать параметрами четырехполюсника.

Наиболее удобной для описания биполярного транзистора является система  $h$  - параметров:

$$\begin{aligned}U_1 &= h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \\I_2 &= h_{21} I_1 + h_{22} U_2 ,\end{aligned}$$

где

$$h_{11} = (dU_1 / dI_1)|_{U_2=0} ,$$

- параметр, имеющий размерность сопротивления, характеризующий входное сопротивление и представляющий собой отношение изменения напряжения на входе к вызвавшему его изменению входного тока в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе транзистора. Значение  $h_{11}$  определяется наклоном входной характеристики транзистора в режиме короткого замыкания по переменному току на выходе.

$$h_{12} = (dU_1 / dU_2)|_{I_1=0} ,$$

- безразмерный параметр, характеризующий внутреннюю обратную связь между выходной и входной цепями и представляющий собой отношение изменения напряжения на входе к вызвавшему его изменению напряжения на выходе в режиме холостого хода во входной цепи по переменному току.

$$h_{21} = (dI_2 / dI_1)|_{U_2=0} ,$$

- безразмерный параметр, характеризующий прямую связь по току между выходной и входной цепями и представляющий собой отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению входного тока в режиме короткого замыкания выходной цепи по переменному току. Параметр  $h_{21}$  является одним из важнейших параметров транзистора.

$$h_{22} = (dI_2 / dU_2)|_{I_1=0} ,$$

- параметр, имеющий размерность проводимости, характеризующий выходную проводимость и представляющий собой отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению выходного напряжения в режиме холостого хода входной цепи по переменному току. Значение  $h_{22}$  определяется наклоном выходной характеристики транзистора.

Конкретные значения  $h$  - параметров различны для разных схем включения транзистора, поэтому в схемах с ОБ и ОЭ соответственно добавляют индексы «Б» или «Э». Наиболее распространенная схема включения биполярного транзистора — схема с ОЭ.

$h$  - параметры позволяют построить удобные для анализа эквивалентные схемы биполярного транзистора.

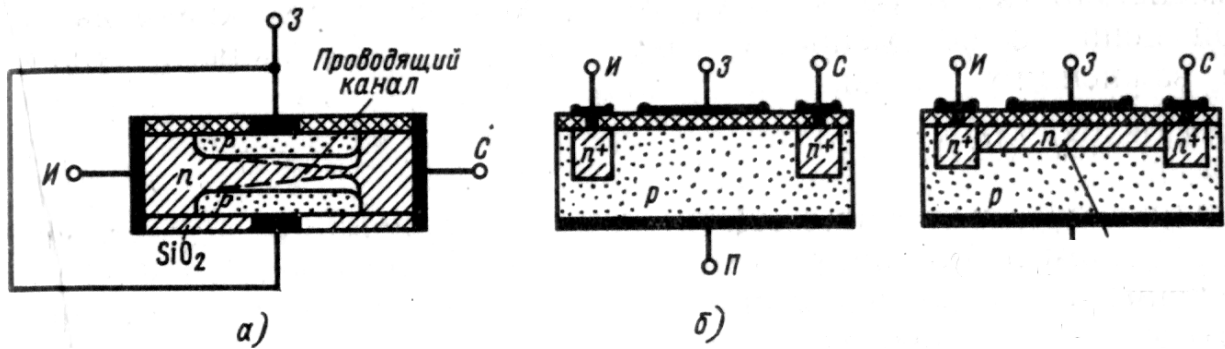
В настоящее время биполярные транзисторы являются весьма распространенными полупроводниковыми приборами, с помощью которых успешно решаются как усилительные, так и переключающие функции.

### Полевые транзисторы

Биполярные транзисторы управляются током, вследствие чего они имеют малое входное сопротивление, что в ряде случаев является недостатком. Поэтому были разработаны специальные транзисторы с большим входным сопротивлением — **полевые транзисторы**. Термин «полевой» подчеркивает, что управление выходным током в этом полупроводниковом приборе осуществляется электрическим полем, а не током, как в биполярных транзисторах.

Для того чтобы управлять током в полупроводнике с помощью электрического поля, нужно менять либо площадь проводящего полупроводникового слоя, либо его удельную проводимость. В полевых транзисторах используют оба способа и соответственно различают две разновидности: транзистор с управляющим  $p-n$  переходом и МДП - транзистор (структура металл-диэлектрик-полупроводник). МДП - транзисторы, в свою очередь, подразделяют на МДП - транзисторы с индуцированным и встроенным каналами. Работа полевых транзисторов основана на использовании только одного типа носителей — основных, поэтому их еще называют *униполярными*.

Основным элементом полевого транзистора с управляющим  $p-n$  переходом (рисунок 2.9, а) является пластина полупроводника  $n$  - типа, на которую с двух сторон нанесены слои полупроводника  $p$  - типа. На торцы полупроводниковой пластины  $n$  - типа и на две области  $p$  - типа нанесены металлические пленки, к которым припаяны омические контакты, а два слоя  $p$  - типа соединены между собой. Электрод, образованный двумя слоями  $p$  - типа, называют *затвором* (З). Один из электродов, подключенный к полупроводнику  $n$  - типа, от которого движутся электроны, называют *истоком* (И), а электрод, к которому движутся электроны, — *стоком* (С). Между полупроводниками с разными типами электропроводности образуются два электронно-дырочных перехода. Тонкий слой полупроводника  $n$  - типа, расположенный между двумя  $p-n$  переходами, называют *проводящим каналом*.



в)

Рис. 1.22. Структура полевых транзисторов:  
*а* - с управляющим *p-n* переходом; *б*—с индуцированным каналом; *в* — со встроенным каналом

В основе работы полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом лежит идея изменения площади поперечного сечения проводящего канала. Когда напряжения на *p-n* переходах равны нулю, площадь поперечного сечения проводящего канала максимальна, а электрическое сопротивление между истоком и стоком минимально. Если подвести к затвору внешнее напряжение  $U_{зи}$  такой полярности, чтобы оба перехода были смещены в обратном направлении, то в проводящем канале появится обедненный слой (слой изолятора), который уменьшит площадь поперечного сечения проводящего канала. Это приведет к возрастанию электрического сопротивления канала, а значит, и к возрастанию сопротивления между истоком и стоком транзистора. Изменяя напряжение  $U_{зи}$ , можно регулировать электрическое сопротивление проводящего канала.

Если между истоком и стоком подвести внешнее напряжение  $U_{си}$  («минусом» к истоку), то под влиянием разности потенциалов в полупроводниковой пластине *n* - типа начнется дрейф электронов от истока к стоку, создавая ток стока  $I_C$ , которым можно управлять, изменяя как напряжение  $U_{зи}$  так и  $U_{си}$ . При наличии напряжения  $U_{си}$  потенциалы канала у стокового и истокового концов оказываются разными. Напряжение на *p-n* - переходе у истокового конца равно  $|U_{зи}|$ , а у стокового —  $|U_{зи}| + |U_{си}|$ , поэтому обедненная область у стокового конца будет шире, чем у истокового (см. рисунок 2.9, *а*). При некотором отрицательном напряжении  $U_{зи}$  обедненные слои обоих *p-n* переходов могут сомкнуться, площадь поперечного сечения канала станет равной нулю, сопротивление канала — равным бесконечности, а ток  $I_C$  — равным нулю (транзистор закрывается).

Напряжение между затвором и истоком, при котором транзистор закрывается, называют напряжением отсечки  $U_{зи\text{отс}}$ .

Работа МДП-транзисторов основана на изменении удельного сопротивления канала. При создании разности потенциалов между объемом полупроводника и изолированным электродом (затвором) у поверхности полупроводника образуется слой с концентрацией носителей зарядов, отличной от концентрации в остальном объеме полупроводника, — канал, сопротивлением которого можно управлять, изменяя напряжение на затворе.

В МДП - транзисторе с индуцированным каналом (рисунок 2.9, б) при  $U_{зи} = 0$  канал отсутствует, а между стоком и истоком оказываются встречно включенными два  $p-n$  перехода, поэтому  $I_C$  в этом случае практически равен нулю. Если подать на затвор положительное напряжение ( $U_{зи} > 0$ ), то возникающее при этом электрическое поле будет отталкивать дырки в глубь  $p$ -полупроводника. При некотором пороговом напряжении между стоком и истоком накапливается достаточный слой электронов — создается проводящий канал, толщина которого 1—2 нм и практически не меняется при изменении напряжения  $U_{зи}$ . Сопротивление канала зависит от концентрации электронов в нем. Поэтому, изменяя  $U_{зи}$  можно менять ток стока такого МДП-транзистора.

В МДП-транзисторе со встроенным каналом (рисунок 2.9, в) при  $U_{зи} = 0$  между стоком и истоком будет некоторый ток  $I_C^1$ . Такие транзисторы работают как при положительных, так и при отрицательных напряжениях на затворе.

При отрицательном напряжении наблюдается режим обеднения, когда электрическое поле, создаваемое напряжением  $U_{зи}$ , выталкивает электроны из канала, уменьшая его удельную проводимость.

При положительном напряжении  $U_{зи}$  наблюдается режим обогащения, когда электроны втягиваются в канал из  $p$ -области, что увеличивает удельную проводимость канала.

В качестве исходной полупроводниковой пластины во всех видах полевых транзисторов могут быть использованы полупроводники как  $n$  -, так и  $p$  - типа. Поэтому различают полевые транзисторы  $n$  - и  $p$  -типов, а всего может быть шесть разновидностей полевых транзисторов. Наиболее полно работа полевых транзисторов описывается семейством выходных статических характеристик (рисунок 2.10), которые для всех типов полевых транзисторов практически одинаковы.

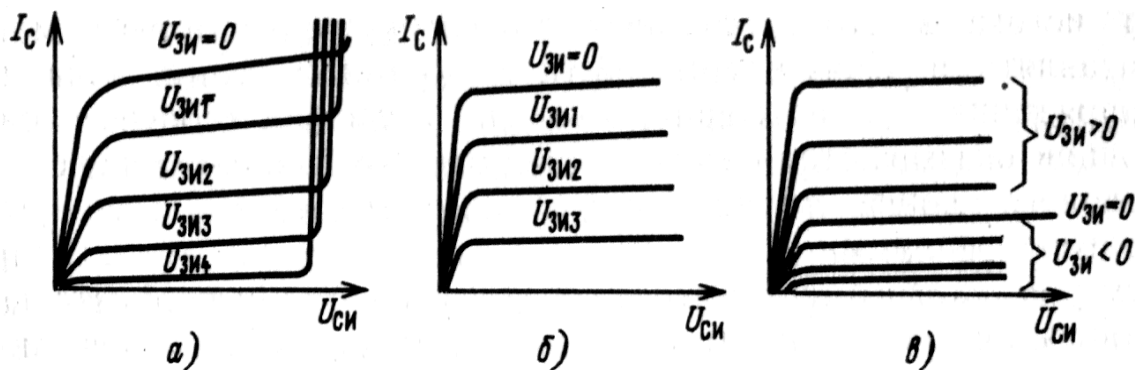


Рис. 1.23. Статические ВАХ транзисторов: полевых с управляемым  $p-n$  переходом (а) и МДП с индуцированным (б) и встроенным (в) каналами

Отличия выходных характеристик разных типов МДП - транзисторов заключаются в расположении характеристик при  $U_{зи} = 0$ . В МДП - транзисторе со встроенным каналом эта характеристика располагается посередине семейства. Выше ее идут характеристики, соответствующие режиму обогащения, а ниже — режиму обеднения.

Приведенные выше характеристики МДП - транзисторов справедливы для случая, когда их подложки (П) соединены с истоком. Подложку можно также использовать в качестве дополнительного электрода, напряжение на котором управляет током в проводящем канале транзистора. В этом случае подложку называют нижним затвором. Механизм управления током канала оказывается совершенно таким же, как при управлении напряжением затвора, а семейство характеристик  $I_c(U_{си})$  при  $U_{пи} = \text{const}$  имеет тот же вид, что и характеристика  $I_c(U_{си})$   $U_{зи} = \text{const}$ .

Основными параметрами полевых транзисторов являются: крутизна характеристики  $S$ , коэффициент усиления  $\mu$  и внутреннее сопротивление  $R_i$ .

*Крутизной характеристики  $S$*  полевого транзистора называют отношение изменения тока стока к вызвавшему его изменению напряжения на затворе при  $U_{си} = \text{const}$ .

$$S = (dI_c/dU_{зи})|_{U_{си} = \text{const}}$$

*Коэффициентом усиления  $\mu$*  полевого транзистора называют отношение изменения напряжения стока к вызвавшему его изменению напряжения на затворе при  $I_c = \text{const}$

$$\mu = (dU_{си}/dU_{зи})|_{I_c = \text{const}}$$

*Внутренним сопротивлением  $R_i$*  полевого транзистора называют отношение изменения напряжения стока к соответствующему изменению тока стока при  $U_{зи} = \text{const}$

$$R_i = (dU_{си}/dI_c)|_{U_{зи} = \text{const}}$$

Коэффициент усиления, крутизна характеристики и внутреннее сопротивление полевого транзистора связаны между собой соотношением

$$\mu = S R_i$$

Рабочей областью характеристик полевых транзисторов является область динамического равновесия, в которой для современных полевых транзисторов  $S = 0,3...30$  мА/В, а  $R_i$  составляет несколько мегаом. Важнейшими особенностями полевых транзисторов являются их очень высокие входное сопротивление (до  $10^{15}$  Ом) и граничная частота (до 1 ГГц).

### **Конспект к модулю №3**

#### **Устройства на интегральных микросхемах**

В настоящее время радиоэлектронная аппаратура (РЭА) на дискретных элементах интенсивно вытесняется аппаратурой, использующей интегральные схемы (ИС). Если раньше основными элементами РЭА были транзисторы, конденсаторы, резисторы и пр., то сейчас разработка малогабаритных, надежных и дешевых интегральных схем привела к их широкому применению. Устройства, на разработку которых еще несколько лет назад требовались недели, а то и месяцы, теперь можно создать за несколько часов. Для этого требуется приобрести необходимые ИС и, добавив к ним несколько внешних компонентов, получить готовый функциональный блок. При этом не только резко упрощаются наладка и ремонт такого блока, но и его проектирование. Теперь разработчику РЭА нет надобности каждый раз детально анализировать сложное внутреннее устройство интегральных схем, а нужно лишь точно знать их основные характеристики, входные и выходные параметры. Это упрощает создание любой РЭА и значительно расширяет круг лиц, которым оказывается под силу создавать разнообразные электронные устройства и приборы. Если рассматривать усилительные устройства, то для них нужно иметь ИС, характеристики которых как можно ближе приближаются к идеальному усилителю, обладающему бесконечно большим коэффициентом усиления; бесконечно большой полосой пропускания; бесконечно большим входным сопротивлением; нулевым выходным сопротивлением.

Основной интегральной схемой, используемой в настоящее время в усилительной аппаратуре, является операционный усилитель (ОУ).

**Идеализированный операционный усилитель.** Термин «операционный усилитель» ранее отождествлялся с понятием «решающий усилитель» и связывался с какой-либо математической операцией— суммированием, дифференцированием и др. В настоящее время характеристики ОУ приблизились к характеристикам идеального усилителя, а его функции неизмеримо расширились. Под ОУ теперь понимают высококачественный универсальный усилитель, который с успехом может быть использован практически в любом усилительном устройстве.



Схемы современных ОУ весьма сложны, а сам усилитель характеризуется множеством внешних параметров. Подробный анализ схем, учитывающий особенности того или иного типа конкретного ОУ, достаточно громоздок и сложен, а главное, для такого анализа требуются весьма серьезные знания электроники. Однако при начальном изучении схем с операционными усилителями этого не требуется. Можно не интересоваться внутренним устройством ОУ и подробно не изучать внешние параметры конкретных операционных усилителей, стараясь «выжать» из каждого максимум возможного. Гораздо целесообразнее определить типовые характеристики современных ОУ, идеализировать их и на основе этого разбираться в принципе построения соответствующих схем усилительных устройств на ИС. Только после этого (если это понадобится) можно учитывать отличия реальных ОУ от идеализированных.

Обозначение операционного усилителя приведено на рисунке 3.1, а. (в большинстве случаев в реальных ОУ имеются дополнительные выходы, предназначенные для коррекции характеристик.)

Каждый вывод ОУ имеет свое название и обозначение. Прежде всего ОУ имеет один выход и два входа, которые оказывают на входное напряжение одинаковое в количественном отношении, но противоположное по знаку влияние. Один из входов помечают знаком «+» и называют *прямым*, или *неинвертирующим*. При подаче напряжения на этот вход полярность напряжения на выходе будет совпадать с полярностью напряжения на входе. Другой вход помечают знаком «-» и называют *инвертирующим*. В этом случае полярность напряжения на выходе будет противоположна полярности напряжения на инвертирующем входе.

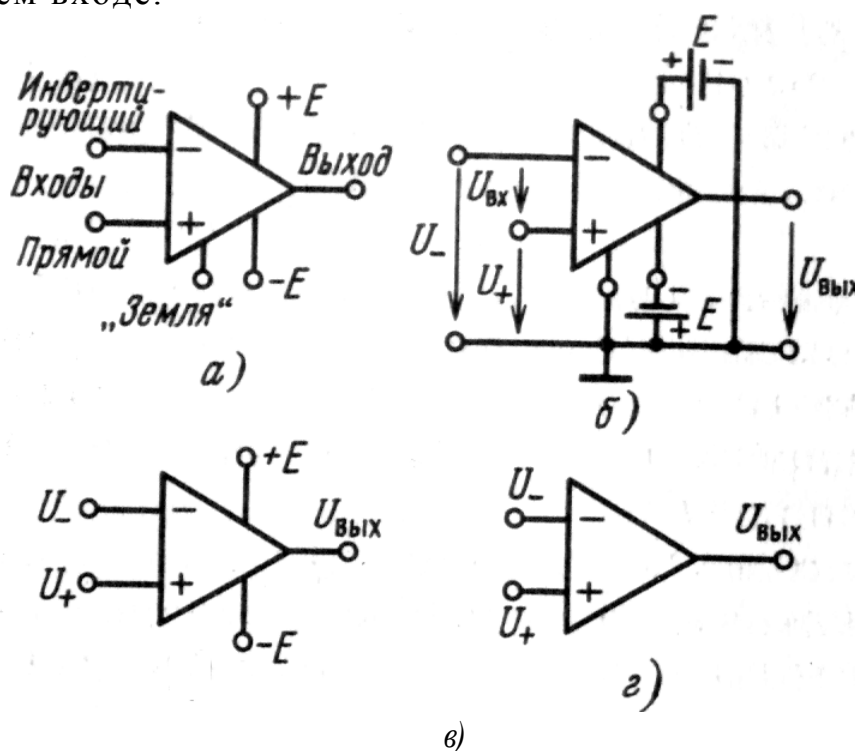


Рис. 3.1 - Условное обозначение операционного усилителя (а, в, г) и схема его подключения (б)

При этом следует помнить, что знаки плюс и минус соответствуют лишь названиям выводов и никак не связаны с полярностью приложенного напряжения.

Два следующих вывода предназначены для подведения постоянных питающих напряжений, величины которых обычно равны между собой, а полярность противоположна (например, +15 и -15 В). Еще один вывод — это «земля»; этот вывод служит общей точкой схемы ОУ, его потенциал принимается равным нулю. Эту точку желательно соединять с металлическим корпусом, на котором монтируется усилительное устройство.

Полная схема подключения ОУ показана на рисунке 3.1, б, а сокращенные обозначения, последним из которых в дальнейшем мы и будем пользоваться, приведены на рисунке 3.1, в и г.

Передаточная характеристика ОУ имеет вид, показанный на рисунке 3.2, а (здесь по оси абсцисс входное напряжение  $U_{вх} = U_+ - U_-$ ).

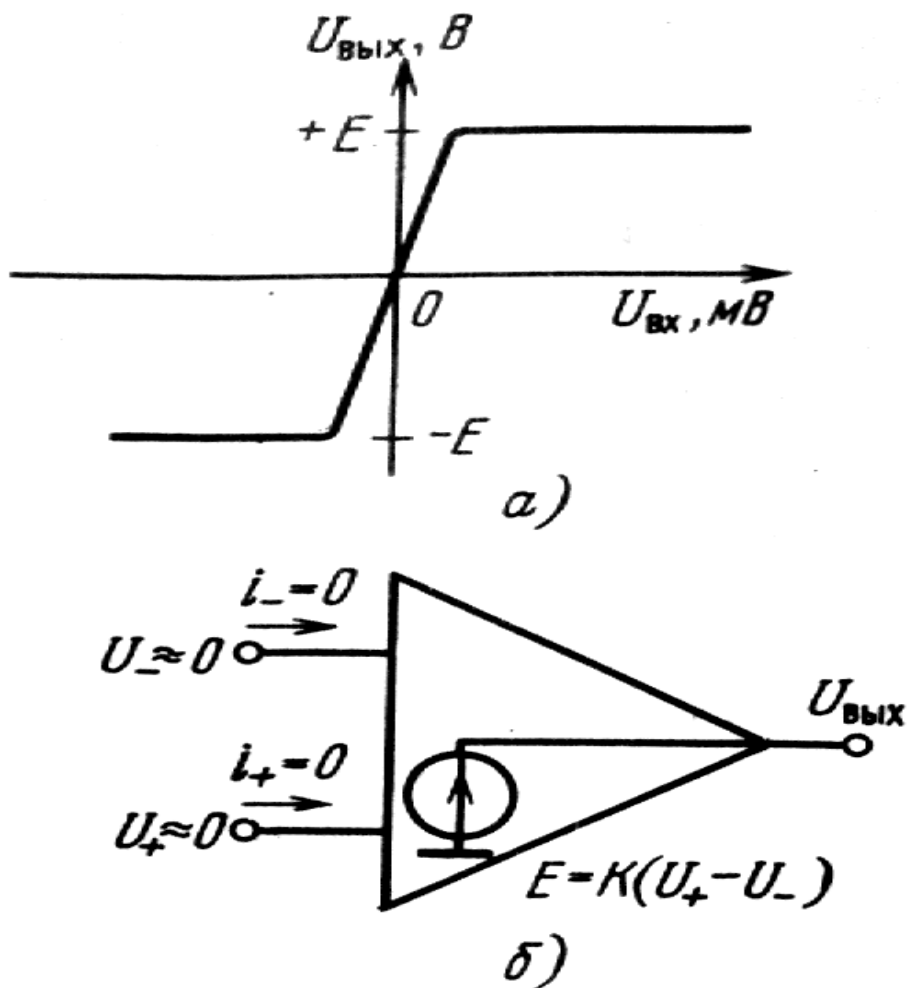


Рисунок 3.2- Амплитудная характеристика (а) и эквивалентная схема (б) идеализированного операционного усилителя

Как видно из рисунка, для передаточной характеристики характерны три участка: линейный и два участка, характеризующих области насыщения. В линейной области между разностью входных напряжений  $U_{ВХ} = U_+ - U_-$  и выходным напряжением существует линейная зависимость, при этом ( $U_{ВЫХ}$  изменяется от  $-E$  до  $+E$ ). Для этого участка характеристики справедливы следующие соотношения:

$$|U_{ВЫХ}| < E, U_{ВЫХ} = K (U_+ - U_-)$$

Откуда следует, что

$$|U_+ - U_-| < |E / K|.$$

Для современных ОУ коэффициент усиления по напряжению лежит в интервале от  $10^4$  до  $10^6$ . Поэтому для питающих напряжений, находящихся в диапазоне 10...15 В, линейная область передаточной характеристики по входу составляет от 1 мВ до 10 мкВ, т. е. при линейном режиме работы ОУ входные напряжения  $U_+$  и  $U_-$  практически равны (с погрешностью не более 1 мВ).

Если разность между  $U_+$  и  $U_-$  больше 1 мВ, то  $U_{ВЫХ}$  достигает напряжения источника питания ( $+E$  или  $-E$ ) и при дальнейшем увеличении разности входных напряжений входы теряют свои управляющие свойства — ОУ оказывается в области насыщения, когда  $|U_{ВЫХ}| = |E|$ . При этом напряжение на выходе не зависит от разности напряжений на входе ОУ.

Из передаточной характеристики ОУ также следует, что если к обоим входам приложить одинаковые по величине и полярности относительно «земли» напряжения (напряжения, называемые «синфазными»), то их влияние будет скомпенсировано и они не окажут никакого воздействия на выходное напряжение. Такие усилители с двумя входами, у которых напряжение на выходе появляется только в том случае, когда на входах действуют разные по величине напряжения, называют *дифференциальными*.

Современные ОУ на ИС помимо большого коэффициента усиления по напряжению обладают высоким значением входного и малым выходного сопротивлений. С точки зрения каскадов, образующих ОУ на ИС, всегда можно выделить три: входной, промежуточный и выходной каскады. Одним из основных требований, предъявляемых к входному каскаду, является требование большого входного сопротивления, которое, в частности, достигается за счет выбора соответствующего режима работы транзисторов. Если во входном каскаде используются биполярные транзисторы, то их входные токи измеряются микроамперами, а если используются полевые транзисторы — то пикоамперами. В выходном каскаде ОУ всегда применяют отрицательную обратную связь, которая позволяет получить достаточно малые выходные сопротивления.

На основании изложенного выше можно утверждать, что типовые значения основных параметров современных ОУ на ИС позволяют при работе

на линейной области передаточной характеристики представлять ОУ в виде идеальных усилителей (рисунок 3.2, б) со следующими параметрами:

бесконечно большое входное и нулевое выходное сопротивления;

входные токи равны нулю;

одинаковые напряжения на неинвертирующем и инвертирующем входах, каждое из которых практически близко к нулю;

со стороны выхода ОУ представляет собой идеальный управляемый источник напряжения с ЭДС  $E=K(U_+ - U_-)$ .

Так как в усилительных устройствах, использующих операционные усилители, рабочей областью передаточной характеристики ОУ является линейная область, то при анализе усилительных устройств мы будем пользоваться идеализированными характеристиками ОУ. Но при работе в линейном режиме разность входных напряжений должна быть 1 мВ или меньше. Если напряжение на инвертирующем входе отличается от напряжения на неинвертирующем больше чем на 1 мВ, то ОУ, как отмечено выше, входит в режим насыщения и его вход теряет свои управляющие свойства — напряжение на выходе принимает значение, близкое к значению источника питания. Такое положение недопустимо и для его предотвращения необходимо принимать специальные меры — вводить отрицательную обратную связь. Поэтому в усилительных устройствах ОУ работают всегда с отрицательной обратной связью. Эта связь создается за счет введения внешних цепей, подключаемых между выходом и инвертирующим входом ОУ.

**Инвертирующие усилители.** Принципиальная схема инвертирующего усилителя показана на рисунок 3.3.

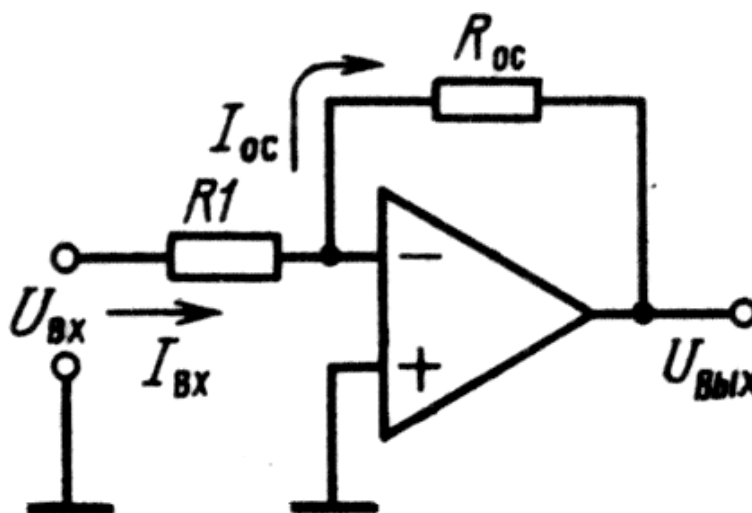


Рисунок 3.3 - Инвертирующий усилитель

Источником входного сигнала служит генератор  $U_{ВХ}$ , который подключается к инверсному входу ОУ через резистор  $R_1$ , играющий роль внутреннего сопротивления генератора. Напряжение обратной связи с выхода ОУ через резистор  $R_{ос}$  также подается на инверсный вход. Прямой вход ОУ заземляется.

Проанализировать изображенную схему нетрудно, если воспользоваться вышеприведенными параметрами идеализированного ОУ. Так как прямой вход заземлен, то и потенциал инвертирующего входа можно считать практически равным потенциалу «земли». Поскольку на самом деле инвертирующий вход ОУ имеет большое входное сопротивление, то такое состояние можно назвать *мнимым заземлением*. Равенство нулю потенциала инвертирующего входа означает, что падение напряжения на резисторе  $R_1$  равно  $U_{ВХ}$ , а падение напряжения на резисторе  $R_{ос}$  равно  $U_{ВЫХ}$ . Через входную цепь усилителя ток не проходит (входное сопротивление ОУ равно бесконечности), поэтому  $I_{ВХ} = I_{ос}$ . Так как

$$I_{ВХ} = U_{ВХ} / R_1, \text{ а } U_{ВЫХ} = - R_{ос} I_{ос} ,$$

получаем

$$K = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} = - R_{ос} / R_1 .$$

Таким образом, коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется отношением указанных резисторов, а для его расчета не требуется точно знать параметры ОУ, что весьма удобно. Знак “минус” в выражении означает лишь то, что фаза напряжения на выходе усилителя противоположна фазе входного напряжения.

Основной недостаток инвертирующих усилителей состоит в том, что он имеет малое входное сопротивление  $R_{ВХ} = R_1$ , а в усилителях с большим коэффициентом усиления величина  $R_1$  обычно небольшая. Этот недостаток устранен в схеме неинвертирующего усилителя.

**Неинвертирующий усилитель.** Принципиальная схема инвертирующего усилителя показана на рисунке 3.4. Здесь входной сигнал уже подается на прямой вход ОУ, а напряжение обратной связи на инвертирующий.

Анализ данной схемы также крайне прост. Напряжение обратной связи, подаваемое на инвертирующий вход ОУ, снимается с делителя напряжения

$$U_- = U_{ВЫХ} R_3 / (R_2 + R_3) .$$

В идеализированном ОУ, работающем в линейном режиме

$$I_{ВХ} = 0, \quad U_+ = U_- , \text{ поэтому } \\ U_{ВХ} = U_+ = U_{ВЫХ} R_3 / (R_2 + R_3) ,$$

откуда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

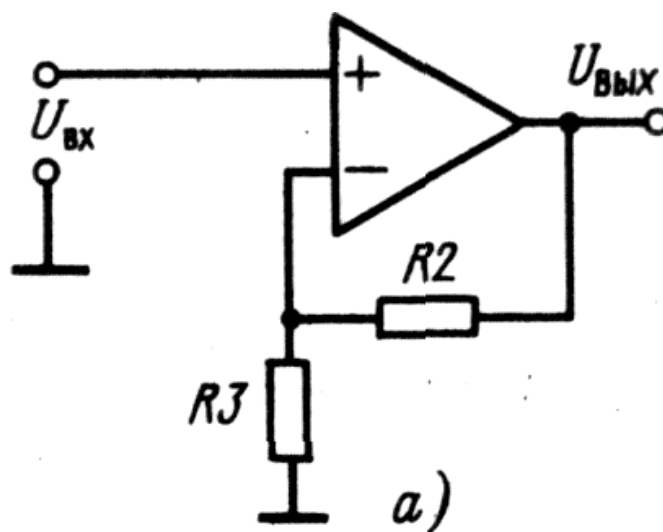


Рисунок 3.5 - Неинвертирующий усилитель (а)

$$K = (R2 + R3) / R3 = 1 + R2 / R3 .$$

Из этого следует, что и для этой схемы коэффициент усиления также определяется только параметрами цепи обратной связи и не зависит от параметров ОУ.

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя весьма велико. На низких частотах оно примерно равно 100 МОм. Выходное сопротивление, наоборот, очень мало и составляет доли ома.

**Повторитель.** Если принять, что  $R3 \gg R2$ , то коэффициент усиления неинвертирующего усилителя окажется близким к единице, а сам усилитель превратится в так называемый повторитель (напряжение на его выходе «повторяет» напряжение на его входе). В предельном случае ( $R3 \rightarrow \infty$ ;  $R2 \rightarrow 0$ ); схема повторителя приобретает более простой вид. Читателю предлагается самостоятельно нарисовать схему для этого случая. Она, как уже сказано, имеет коэффициент усиления, равный единице, входное же сопротивление такой схемы оказывается чрезвычайно большим, а выходное, наоборот, — очень малым.

Может показаться, что схема повторителя не представляет никакого практического интереса, поскольку усиление по напряжению в такой схеме отсутствует. Но такой вывод будет неверным: схема повторителя получила широкое распространение в качестве своеобразного трансформатора сопротивления и усилителя мощности. Первое из указанных свойств повторителей позволяет применять их для согласования большого выходного сопротивления одного блока или устройства с малым входным сопротивлением другого. В точном соответствии с тем, что изложено

выше, повторитель «трансформирует» большое сопротивление  $R_{вх}$  в малое сопротивление  $R_{н}$ . При этом мощность на входе повторителя согласно известной зависимости  $P=U^2/R$  будет  $P_{вх} = U^2 / R_{вх}$ , а на выходе —  $P_{вых} = U^2 / R_{вых}$ . Так как у повторителя  $R_{вх} \gg R_{вых}$ , то оказывается, что  $P_{вх} \ll P_{вых}$ .

**Регулировка усиления.** Если один из резисторов в цепи обратной связи в схемах, сделать переменным, то можно регулировать коэффициент усиления. Недостатки такой регулировки: происходит нарушение режима работы ОУ; при изменении  $R1$  в схеме инвертирующего усилителя меняется его выходное сопротивление; характер регулировки оказывается нелинейным. В связи с этим предпочтительнее использовать ступенчатую регулировку коэффициента усиления, подбирая соответствующие пары резисторов.

**Сложение и вычитание аналоговых сигналов.** Для сложения аналоговых сигналов можно использовать инвертирующий усилитель, в котором на инвертирующий вход ОУ подается несколько напряжений, подлежащих сложению (рисунок 3.6, а).

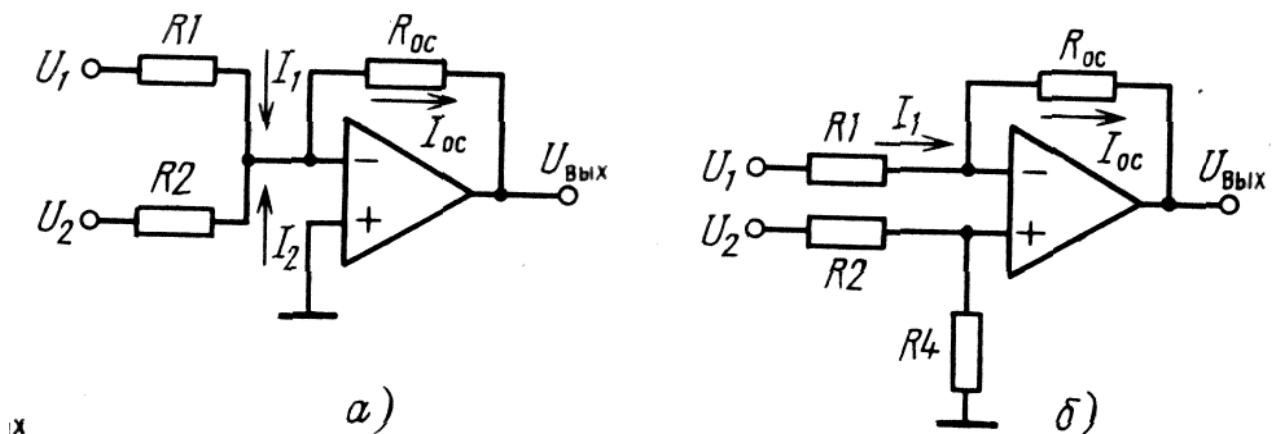


Рисунок 3.6- Усилители на ОУ, в которых происходит сложение (а) и вычитание (б) двух сигналов

Снова обратимся к идеализированным характеристикам ОУ, т.е. будем считать, что  $U_+ = U_- = 0$ , а входной ток ОУ равен нулю. При этом токи на входе сумматора будут иметь следующие значения:

$$I_1 = U_1 / R1; I_2 = U_2 / R2; I_{oc} = I_1 + I_2 ,$$

а выходное напряжение

$$U_{вых} = - ((R_{oc} / R1)U_{вх1} + (R_{oc} / R2)U_{вх2}) ,$$

т. е. в рассматриваемом случае  $U_{\text{ВЫХ}}$  есть инвертированная взвешенная сумма  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ , весовые же коэффициенты слагаемых определяются отношением сопротивлений соответствующих резисторов.

При  $R_1 = R_2 = R$

$$U_{\text{ВЫХ}} = - (R_{\text{ОС}} / R) (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}}) = K(U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}}),$$

и схема превращается в простой сумматор.

Если необходимо провести вычитание двух сигналов, то применяют схему, показанную на рисунке 3.6, б, где одно напряжение подается на инвертирующий вход ОУ, а другое — на неинвертирующий. С помощью резистора  $R_{\text{ОС}}$  осуществляется отрицательная обратная связь.

В приведенной схеме

$$U_+ = U_{\text{ВХ2}} R_4 / (R_2 + R_4)$$

Для идеализированного ОУ, у которого  $U_+ = U_-$  и входной ток равен нулю, а значит, и  $I_1 = I_{\text{ОС}}$ , имеем

$$I_1 = (U_{\text{ВХ1}} - U_-) / R_1 = (U_{\text{ВХ1}} - U_+) / R_1;$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_+ - ((U_{\text{ВХ1}} - U_+) / R_1) R_{\text{ОС}}.$$

Подставив одно уравнение в другое и проведя упрощения, получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = ((R_1 + R_{\text{ОС}}) / R_1) (R_4 / (R_2 + R_4) U_{\text{ВХ2}}) - (R_{\text{ОС}} / R_1) U_{\text{ВХ1}}.$$

При  $R_1 = R_2 = R_4 = R_{\text{ОС}}$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}.$$

Таким образом, выходной сигнал в рассматриваемой схеме представляет собой разность сигналов, действующих на ее входах.

**Дифференциальные усилители.** Во многих практических случаях требуются усилители с дифференциальными входами. Такого типа дифференциальные усилительные устройства легко можно создать на базе ОУ.

Простейшая схема усилителя с дифференциальными входами на ОУ приведена на рисунке 3.7. Делитель напряжения на неинвертирующем входе включается для того, чтобы сделать напряжения  $U_+$  и  $U_-$  одинаковыми, т.е. добиться равного усиления сигналов  $U_1$  и  $U_2$ . Выходное напряжение определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_2 - U_1) R_2 / R_1.$$



Недостаток схемы – низкое входное сопротивление. Для его увеличения применяют повторители. При этом схема дифференциального усилителя с высоким входным сопротивлением принимает вид, представленный на рисунке 3.7,б. За счет очень больших входных сопротивлений повторителей эта схема практически не потребляет ток от источников сигнала. Ее выходное напряжение определяется при этом последним полученным выражением.

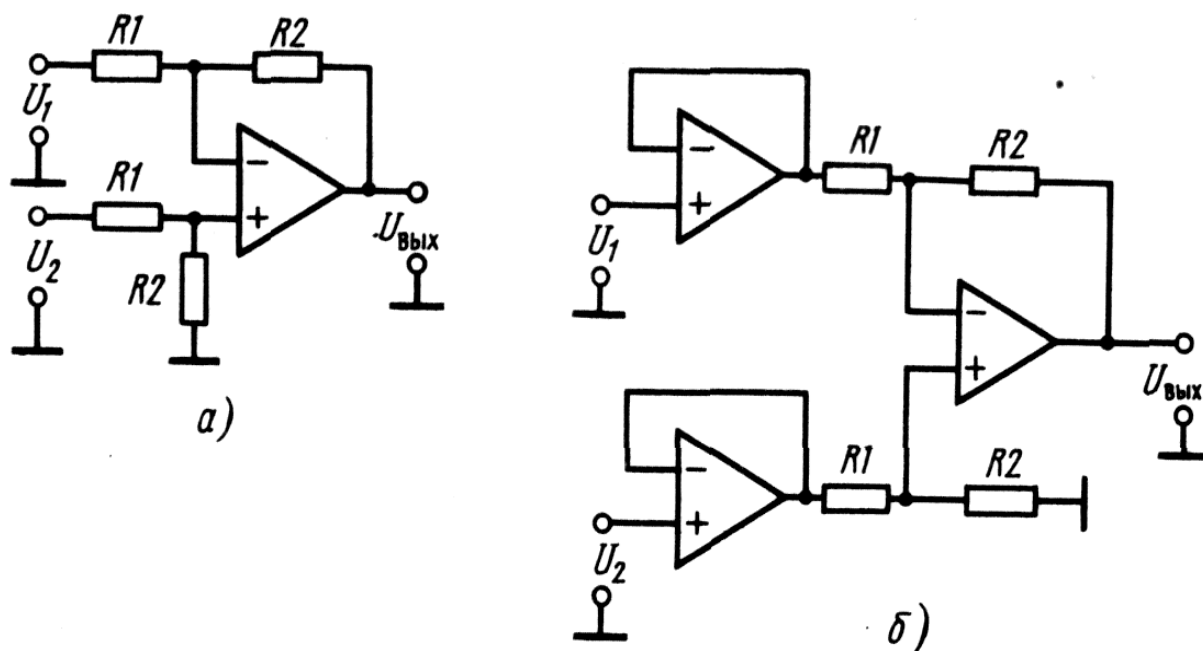


Рисунок 3.7 - Дифференциальные усилители:  
 а - простейшая схема; б - схема с высоким входным сопротивлением

**Усилители переменного тока.** Все современные интегральные ОУ представляют собой усилители с непосредственной связью между входящими в них каскадами. Это означает, что любая из рассмотренных выше усилительных схем на ОУ способна усиливать сколь угодно медленно меняющиеся сигналы, т. е. схемы относятся к усилителям постоянного тока, основным недостатком которых является дрейф нуля. Если требуется усилительное устройство, не чувствительное к медленным изменениям напряжения на входе, используют усилители переменного тока.

Усилитель переменного сигнала можно рассматривать как своего рода фильтр, позволяющий избавиться от нежелательных частотных составляющих, оказывающих вредное влияние на усиливаемый сигнал. Для избавления от медленных изменений, спектр которых находится в области низких частот, нужно, чтобы вблизи нулевой частоты коэффициент усиления усилителя был близок к нулю. Реализация этого условия достигается с помощью разделительных или блокировочных конденсаторов, которые включают между усилительными каскадами, между источниками сигнала и усилителем или между отдельными усилителями. Так как сопротивление конденсаторов в

области очень низких частот резко возрастает, то и напряжение медленно меняющихся сигналов во все большей мере будет падать на их сопротивлении, при этом на вход последующего каскада будет приходиться все меньшая доля напряжения таких сигналов. В свою очередь, на частотах усиливаемого сигнала сопротивление таких конденсаторов пренебрежимо мало; практически весь сигнал поступает на вход усилительного каскада — усилитель эффективно усиливает переменный сигнал и «блокирует» усиление квазипостоянного сигнала.

На рисунке 3.8, а показан усилитель переменного сигнала, построенный на основе инвертирующего усилителя постоянного тока.

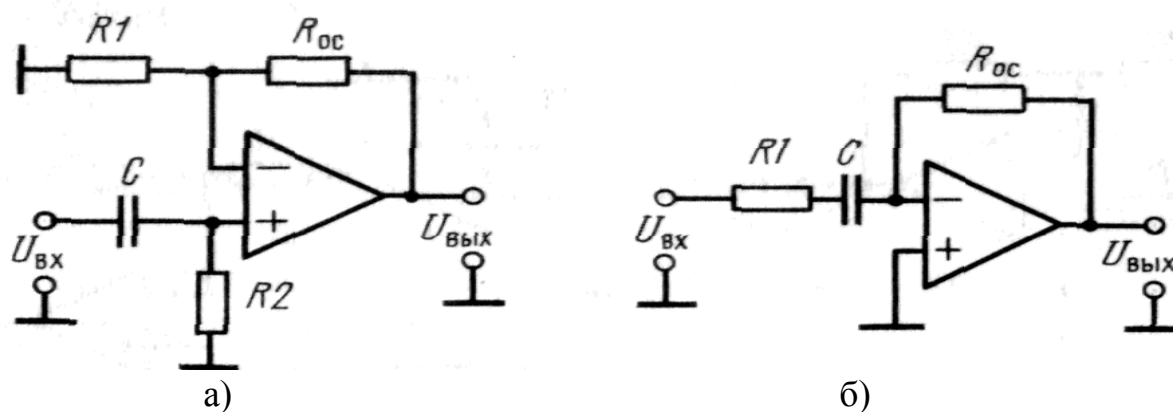


Рисунок 3.8. Неинвертирующий (а) и инвертирующий (б) усилители переменного тока

Показанный на схеме конденсатор  $C$  блокирует сигналы постоянного тока, пропуская лишь сигналы переменного. Данная схема по-разному усиливает различные гармонические составляющие переменного сигнала. Чем ниже его частота, тем выше сопротивление конденсатора  $C$ , что приводит к падению коэффициента усиления усилителя. Вывод очевиден: на низких частотах в таком усилителе коэффициент усиления будет падать, т. е. будет наблюдаться «завал» его частотной характеристики  $K(f)$ .

Усилитель переменного сигнала можно создать и на базе неинвертирующего усилителя (рисунок 3.8, б). В этой схеме также имеется конденсатор  $C$ , который блокирует квазипостоянные сигналы, пропуская сигналы переменные. Если бы схема была построена на идеальных элементах, то не было бы никакой необходимости включать в нее резистор  $R1$ . В действительности в любом реальном ОУ имеются очень небольшие входные токи, которые могут зарядить конденсатор  $C$ . Так как ОУ воспринимает постоянное напряжение на конденсаторе как еще один входной сигнал, то в случае, если напряжение на нем превысит 1 мВ, ОУ перейдет в режим насыщения и усилитель перестанет реагировать на входной сигнал. Резистор  $R1$  служит для прохождения входного тока ОУ и разряда конденсатора  $C$ . К сожалению,

все это приводит к снижению входного сопротивления усилителя, величина которого оказывается равной  $R_I$ . Для того чтобы по возможности избежать отрицательных последствий такого снижения величины входного сопротивления,  $R_I$  стремятся выбрать как можно большим.

### **Электронные ключи**

Одним из основных элементов цифровых устройств является электронный ключ, главное назначение которого состоит в коммутации цепи нагрузки с помощью управляющих электрических сигналов.

Основу любого электронного ключа составляет полупроводниковый прибор (диод, биполярный или полевой транзистор), работающий в нелинейном, ключевом режиме. По аналогии с механическим ключом качество электронного ключа определяется следующими параметрами: падением напряжения на ключе в замкнутом состоянии; током через ключ в разомкнутом состоянии; скоростью перехода ключа из одного состояния в другое.

**Диодные ключи.** Применение диодов в ключевых схемах связано с их способностью проводить ток только в одном направлении. Из идеализированной вольт-амперной характеристики диода, следует, что диод можно рассматривать как сопротивление, величина которого зависит от полярности приложенного к нему напряжения. Когда к диоду приложено прямое напряжение («плюс» на аноде относительно катода), сопротивление диода  $r_d$  оказывается малым (для полупроводникового диода  $r_d$  имеет величину от 10 до 100 Ом). Когда к диоду приложено обратное напряжение («минус» на аноде относительно катода), сопротивление диода  $R_{обр}$  будет большим (для полупроводникового диода  $R_{обр}$  лежит в пределах от десятков килоом до десятков мегаом).

В зависимости от схем соединения диода и нагрузки различают последовательный и параллельный диодные ключи.

Диодные ключи достаточно широко применяют в логических элементах. Их основным достоинством является простота. Если оценивать основные параметры диодных ключей, то для уменьшения падения напряжения на ключе в замкнутом состоянии необходимо уменьшать  $r_d$ , а для уменьшения тока в разомкнутом состоянии — увеличивать  $R_{обр}$ , т. е. в ключевых схемах желательно использовать такие диоды, у которых  $r_d$  минимально,  $R_{обр}$  максимально. Третий основной параметр — скорость перехода ключа из одного состояния в другое - зависит как от диода, так и от остальной схемы. Реальные полупроводниковые диоды обладают определенной инерционностью. Для включения диода нужно некоторое, в течение которого его база насыщается носителями, а для выключения диода — время, в течение которого происходит рассасывание заряда в базе. Наиболее существенными параметрами схемы, влияющими на ее быстродействие, являются паразитные емкости, в том числе и емкость запятого диода. Как известно, напряжение на емкости не может возрасти скачком, что приводит к «затягиванию» фронта и спада импульсов напряжения. Поэтому для получения высокого быстродействия диодных ключей необходимо применять специальные импульсные диоды,

которые имеют малые времена включения и выключения, малые паразитные емкости, а также позаботиться об уменьшении паразитных емкостей схемы.

**Транзисторные ключи.** В отличие от диодных в транзисторных ключах входная и выходная цепи разделены. Состояние транзистора (закрытое или открытое) зависит от значения входного напряжения (тока). В закрытом состоянии транзистор находится в режиме отсечки, а в открытом состоянии он может находиться в активном режиме и в режиме насыщения. Соответственно различают ненасыщенные и насыщенные ключи. Остановимся только на работе насыщенного транзисторного ключа, собранного по схеме с ОЭ на биполярном транзисторе (рисунок 3.9, а). С помощью такого ключа осуществляется коммутация его коллекторной цепи электрическими сигналами, действующими в цепи базы.

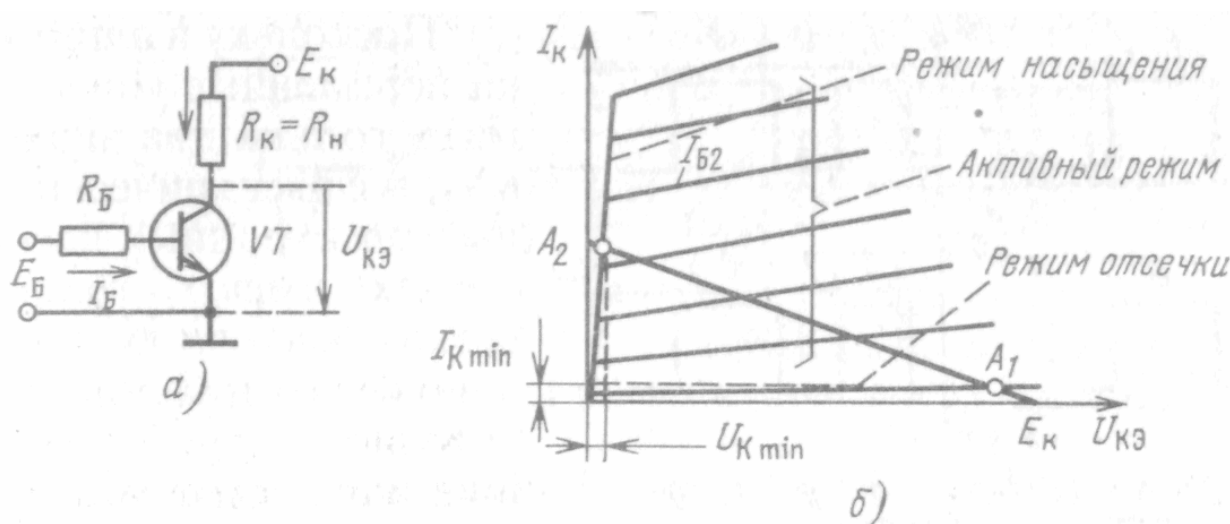


Рисунок 3.9 - Схема транзисторного ключа (а) и ВАХ транзистора (б)

Начальное состояние рассматриваемого ключа определяется сопротивлением резистора  $R_B$  и напряжением  $E_B$ , которые подбирают таким образом, чтобы транзистор находился в режиме отсечки, т. е. начальное состояние схемы соответствует разомкнутому положению ключа. Когда на вход поступает положительный импульс тока достаточно большой величины, транзистор переходит в режим насыщения. Ключ замыкается.

В режиме отсечки оба  $p-n$  перехода смещены в обратном направлении, через нагрузку проходит минимальный ток, равный обратному току коллекторного перехода. При использовании кремниевых или арсенид-галлиевых транзисторов этот ток настолько мал, что можно считать сопротивление транзистора в этом случае бесконечно большим. В режиме насыщения через нагрузку проходит максимальный ток коллектора  $I_K = I_{K \text{ нас}}$  так как сопротивление транзистора, складывающееся из сопротивлений двух  $p-n$  переходов, смещенных в прямом направлении, оказывается очень малым.

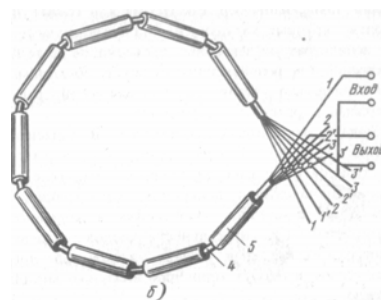
Для анализа работы транзисторного ключа воспользуемся семейством статических ВАХ транзистора  $I_k = f(U_k)$   $I_b = \text{const}$  (рисунок 3.9, б), на котором построим нагрузочную прямую. В режиме отсечки коллекторный и эмиттерный переходы смещены в обратном направлении ( $U_{кб} < 0$ ,  $U_{эб} < 0$ ). Такому режиму соответствует рабочая точка  $A_1$  — точка пересечения нагрузочной прямой и статической характеристики  $I_{б1} = -I_{к0}$ .

При увеличении тока  $I_b$  рабочая точка начинает перемещаться вверх по нагрузочной прямой, ток  $I_k$  возрастает, а напряжение  $U_k$  уменьшается, транзистор сначала переходит в активный режим, а затем, когда оба  $p-n$  перехода транзистора окажутся открытыми, в режим насыщения, которому соответствует рабочая точка  $A_2$ . При дальнейшем увеличении тока базы положение рабочей точки  $A_2$  не изменится, возрастет лишь число неосновных носителей зарядов (электронов), вводимых через эмиттерный переход в базу, т. е. коэффициент насыщения транзистора. В режиме насыщения ток через транзистор ограничивается только сопротивлением нагрузки  $R_k$ :

$$I_{k \text{ нас}} \approx E_k / R_k .$$

Следовательно, в разомкнутом состоянии ток через транзистор близок к нулю, а в замкнутом состоянии падение напряжения в насыщенном ключе также близко к нулю, т.е. по первым двум параметрам насыщенные транзисторные ключи близки к идеальным.

Третий параметр – скорость перехода ключа из одного состояния в другое – так же, как и в диодном ключе, связан и с транзистором, и со схемой. Инерционность реального транзистора зависит от времени переноса носителей в его базе и от емкостей  $p-n$  переходов. Инерционность схемы определяется ее паразитными емкостями. Для увеличения быстродействия транзисторных ключей необходимо использовать специальные импульсные транзисторы и заботиться о минимальных паразитных емкостях схемы.



## 4 Методические указания для выполнения практических (семинарских) занятий

### План практических занятий

№ пп	Содержание занятия	Количество часов	
		Практ.	СРС
Тема 1: Пассивные элементы электроники			
1	Знакомство с маркировкой резисторов и конденсаторов, определение их параметров. Ряды номиналов.	4	4
Тема 2: Элементы, содержащие P–N переход			
2.1	Исследование маркировки и параметров диодов и стабилитронов.	2	2
2.2	Исследование маркировки и параметров биполярного транзистора. Транзисторный ключ на биполярном транзисторе, методика расчета.	4	4
Тема 3: Применение элементов электроники			
3.1	Стабилизаторы напряжения и типовые схемы выпрямления. Освоение методов расчета.	2	2
3.2	Схемы на операционных усилителях.	3	3
	Итого:	15	15

### Рекомендуемая литература

1. Г.Н. Горбачёв Е.Е. Чаплыгин. Промышленная электроника. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Ушаков В.Н., Долженко О.В. Электроника: от элементов до устройств.- М.: Радио и связь, 1993.
3. В.Г. Герасимов. Основы промышленной электроники.- М.: Высшая школа, 1986.
4. В.С. Гутников Интегральная электроника в измерительных устройствах.- М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Федорашко И.Н., Федорашко Ю.И. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине "Электронные и микропроцессорные устройства", 2002.
6. Компьютерный лабораторный практикум по микропроцессорным средствам и системам. Том 1. Основы цифровой техники. "Элат", Караганда, 2003.

### Контрольные задания для СРС

Тема 1 [1, 2]:

Резисторы как элемент электронных схем, их условные графические изображения. Ряды номиналов. Основные конструкции резисторов, их параметры, типы и маркировка. Переменные и подстроечные резисторы,

особенности эксплуатации. Делитель напряжения, его расчет по заданным параметрам. Конденсаторы как элементы электронных схем, их условные графические изображения. Ряды номиналов, параметры и маркировка конденсаторов постоянной емкости, их типы. Переменные и подстроечные конденсаторы, их типы и назначения. Электролитические конденсаторы, их назначение, маркировка и особенности эксплуатации.

Тема 2: [2, 3, 4]

Полупроводниковые материалы, собственная проводимость. Примесная проводимость, электронная и дырочная проводимости. Полупроводники типа p и n. P-n переход, его свойства. Прямое и обратное включение перехода в электрическую цепь. Вольтамперная характеристика (ВАХ) p-n перехода, две ее ветви. Транзисторы и их разновидности, условные графические обозначения. Принцип действия биполярного транзистора, усиление тока, коэффициент усиления, ВАХ. Схемы включения транзисторов, их основные свойства. Параметры транзистора, h-параметры, их физический смысл и размерности.

Тема 3: [3, 4, 5,6]

Понятие об операционном усилителе как универсальном элементе полупроводниковой электроники. Идеальные и реальные характеристики и параметры. Условное графическое обозначение операционного усилителя, маркировка и основные режимы работы. Свойства операционного усилителя в зависимости от схемы включения. Две разновидности масштабирующих усилителей. Аналоговый сумматор.

## 5 Методические указания для выполнения лабораторных работ

Таблица 5.1 -Тематика лабораторных работ

№ пп	Содержание занятия	Количество часов	
		Лаб.	СРС
Тема 1: Пассивные элементы электроники			
1	Ознакомление с лабораторным стендом и программой моделирования электронных цепей на ПЭВМ “Electronics Workbench”. Сборка резисторных цепей, подача на них напряжений от регулируемых источников и установка требуемых значений по цифровому вольтметру. Измерение токов в ветвях цифровым миллиамперметром.	4	4
Тема 2: Элементы, содержащие P–N переход			
2.1	Исследование вольтамперных характеристик диодов и стабилитронов. Защита отчета.	2	2
2.2	Исследование характеристик биполярного транзистора. Транзисторный ключ на биполярном транзисторе. Защита отчета.	4	4
Тема 3: Применение элементов электроники			

3.1	Исследование стабилизаторов напряжения и типовых схем выпрямления. Защита отчетов.	2	2
3.2	Исследование схем на операционных усилителях. Защита отчетов.	3	3
	Итого:	15	15

### 1. Цель, задачи и общий порядок выполнения работ.

- 1.1 Приобрести навыки работы с электронными компонентами, преимущественно аналоговой группы, и научиться исследовать их вольт-амперные характеристики (ВАХ), определять основные технические параметры элементов.
- 1.2 Лабораторные работы разделены по темам. Количество лабораторных работ и время их выполнения внутри темы определяется преподавателем в зависимости от уровня начальной подготовки группы и темпа усвоения учебного материала.
- 1.3 В процессе выполнения лабораторных работ одной из целей является знакомство с возможностями использования в области электроники программы моделирования электронных схем типа “Electronics Workbench”.
- 1.4 При подготовке и выполнении лабораторных работ необходимо использовать конспект лекций по предмету, рекомендованную преподавателем литературу и методические пособия.

## Тема 1: Пассивные элементы электроники

### Лабораторная работа №1.1 «Маркировка элементов электроники»

#### **Цель работы:**

Получить практические навыки определения номиналов и типов пассивных электронных компонентов.

#### **Подготовка к работе:**

При подготовке к работе студент обязан изучить и знать виды пассивных элементов электроники (как минимум резисторы и конденсаторы). Знать, что такое ряд параметров и как он связан с допуском на параметр. Знать основные и производные единицы измерения параметров изучаемых компонентов. Знать основные технические параметры, используемые как справочные для изучаемых компонентов, быть знакомым с цветовой и кодовой маркировкой элементов. Перед выполнением работы уметь отвечать на вопросы преподавателя по изучаемой теме, что является допуском к выполнению работы. Необходимая информация содержится в конспекте лекций и в списке рекомендованной литературы.

#### **Порядок выполнения работы:**

Получить у преподавателя рабочий материал. Занести всю информацию, нанесенную на поверхности элементов, в отчет и, пользуясь лекционным и справочным материалом, определить для каждого элемента его тип, номинал и остальные технические характеристики.

Представить полученную информацию в форме, удобной для инженерной деятельности.



Занести в отчет используемую в процессе выполнения работы систему маркировки элементов.

## **Лабораторная работа №1.2 « Ознакомление с лабораторным стендом по изучению электронных элементов и программой моделирования электронных цепей »**

### **Цель работы:**

Получить практические навыки работы со стендом по изучению электронных элементов и узлов аналоговой электроники. Получить общую информацию о программных методах изучения свойств компонентов, конкретно о программе “Electronics Workbench”. Получить информацию об общих правилах выполнения лабораторных работ и правилах оформления защиты отчета по ним.

### **Порядок выполнения работы:**

Под руководством преподавателя изучить правила техники безопасности при проведении лабораторных работ. Расписаться в журнале по технике безопасности после прохождения инструктажа. Под руководством преподавателя, с использованием технической информации по лабораторным стендам и программе “Electronics Workbench”, освоить методы выбора элементов, подачи на них рабочих напряжений и возможности проведения измерений.

Отчет по данной лабораторной работе может быть заменен устным опросом, по усмотрению преподавателя.

## **Тема 2: Элементы содержащие P-N переход.**

### **Лабораторная работа №2.1 « Исследование вольт-амперных характеристик р-п перехода (диодов и стабилитронов).**

#### **Цель работы:**

Изучить характеристики р-п перехода конкретного элемента и определить по характеристикам технические параметры исследуемого элемента, возможность его использования для целей выпрямления и стабилизации напряжения.

#### **Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ, с использованием возможностей и измерительных приборов программы “Electronics Workbench”. В работе исследуются прямая и обратная ВАХ конкретного элемента по выбору или заданного преподавателем. При выполнении работы снимается зависимость тока через р-п переход элемента, заданного преподавателем, при изменении приложенного к нему напряжения. Последовательно с источником напряжения рекомендуется включить ограничительное сопротивление величиной 1 кОм.

Полученные данные заносятся в таблицы и в дальнейшем используются для построения ВАХ. Рекомендуемый шаг изменения напряжения (0,1-0,2) В на прямой ветви и (1-10) В на обратной ветви ВАХ. Шаг изменения параметров выбирается таким образом, чтобы на каждой из ветвей ВАХ было от 6 до 10 точек. Ток через переход не должен превышать 10 мА.

Освоить возможность автоматизированного метода исследования ВАХ с помощью возможностей программы “Electronics Workbench”, для чего собрать схему исследования ВАХ приведенную ниже, добиться ее работоспособности с помощью установления необходимых режимов используемых в схеме измерительных приборов.

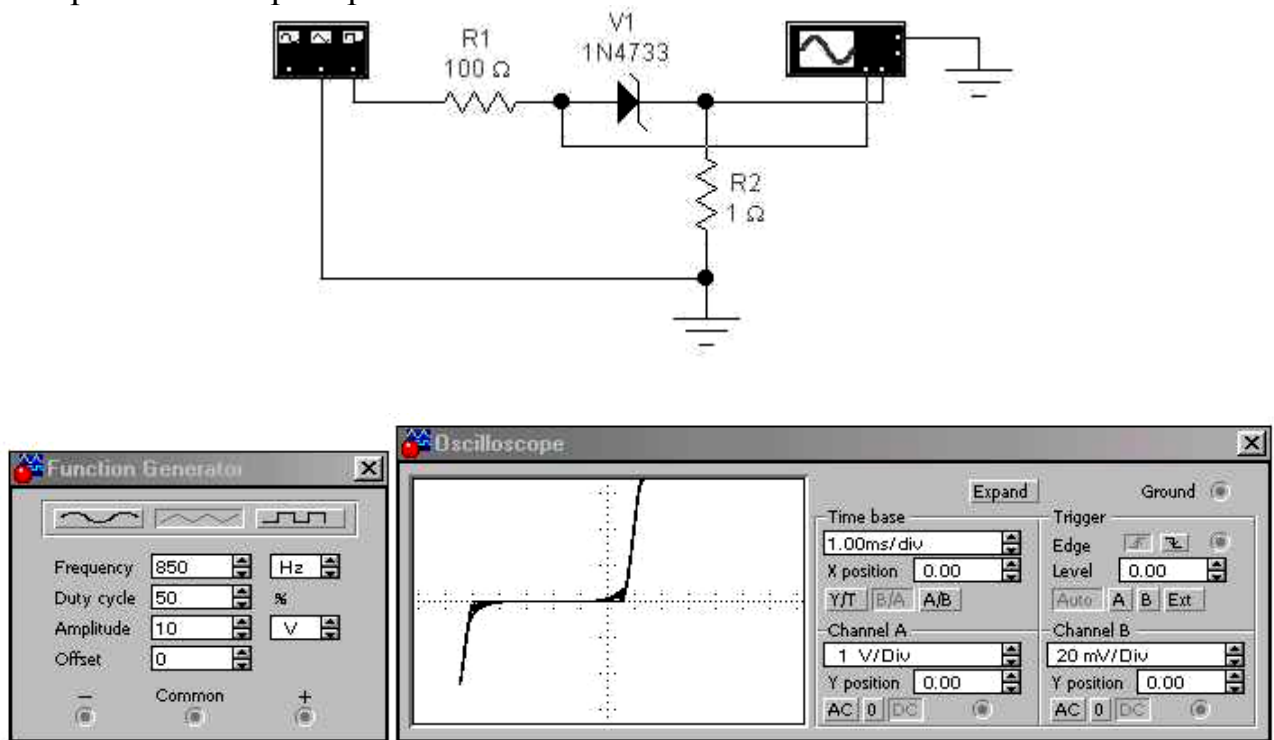


Рисунок 2.1 Схема исследования ВАХ.

Наблюдать на экране осциллографа ВАХ р-п перехода и зарисовать ее, занести полученные данные в отчет, особо обратив внимание на характерные точки связанные с открыванием и пробоем перехода.

По полученным данным, при оформлении отчета, построить ВАХ и определить :

- напряжение открывания перехода (при токе 100 мкА);
- напряжение восстанавливаемого пробоя ( при токе 1 мА);
- крутизну ВАХ при токе 1-5 мА;
- внутреннее сопротивление перехода на обратной ветви в диапазоне токов 1-5 мА.

Все данные занести в отчет. В отчете сделать выводы о возможностях применения р-п перехода. Сопоставить методики ручного и автоматизированного метода снятия ВАХ, оценить, в выводах, их достоинства и недостатки.

## **Лабораторная работа 2.2 «Исследование характеристик биполярного транзистора, транзисторный ключ»**

### **Лабораторная работа 2.2.1 «Исследование входных и выходных характеристик биполярного транзистора»**

**Цель работы:**



По полученным данным построить графическую зависимость  $I_{\text{б}}$  от  $U_{\text{бэ}}$  транзистора при постоянном напряжении  $U_{\text{кэ}} = 0$  и  $U_{\text{кэ}} = 5\text{В}$ .

Для выполнения второго этапа работы в цепь базы транзистора вводят токостабилизирующий резистор величиной от 100 кОм до 1МОм, в зависимости от типа транзистора, и напряжением базового источника задают последовательно величину тока базы равную 0,1 мА ; 0,5 мА и 1 мА. При каждом фиксированном токе базы снимают зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер. Рекомендуемый шаг изменения напряжения коллектор-эмиттер 0,2 В, при напряжении менее 1В, и 1В до напряжения 10 В. Полученные данные заносятся в таблицу по которой строится семейство выходных ВАХ транзистора, по которой необходимо определить динамический и статический коэффициенты усиления транзистора по току для напряжения коллектор-эмиттер 0,5 В и 5 В, при токе базы 0,5 мА.

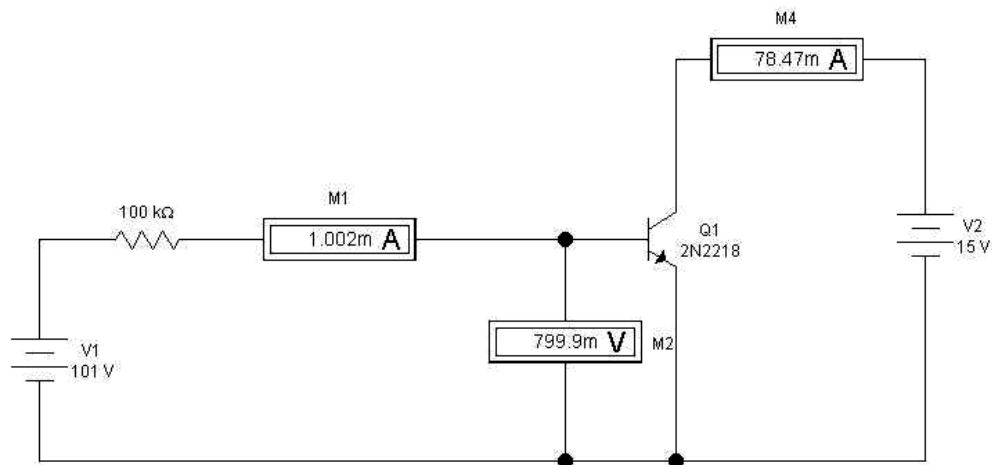


Рисунок 2.3 Схема измерения зависимости  $I_{\text{к}}$  от  $U_{\text{кэ}}$  транзистора при постоянном токе базы.

Таблица 2.2 Результаты измерения параметров

V2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\text{к}}$											
$h_{21э} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}}$											

$$\Delta I_{\text{к}} = I_{\text{к}2} - I_{\text{к}1} \text{ при } U_{\text{кэ}} = 10\text{В}; \quad \Delta I_{\text{б}} = I_{\text{б}2} - I_{\text{б}1} \text{ при } U_{\text{кэ}} = 10\text{В}.$$

Все полученные данные занести в отчет. По полученным данным построить: зависимость  $I_{\text{к}}$  от  $U_{\text{кэ}}$  транзистора при постоянном токе  $I_{\text{б}} = 0,1; 0,5; 1,0$  мА.

Отчет должен также содержать схемы измерения параметров транзистора и выводы по полученным результатам.

## Лабораторная работа 2.2.2 «Исследование характеристик биполярного транзистора в ключевом режиме»

### Цель работы:

Исследовать ключевой режим работы транзистора, изучить простейшую практическую схему транзисторного ключа и ее основные параметры.

### Подготовка к работе:

Изучить работу транзисторного ключа в схеме с общим эмиттером с помощью программы “Electronics Workbench”.

### Порядок выполнения:

- изучить работу транзисторного ключа и методы моделирования его работы;
- собрать типовую схему транзисторного ключа с общим эмиттером в программе “Electronics Workbench”;
- по заданному напряжению источника питания, величине входного сигнала и параметрам нагрузки определить необходимые номиналы компонентов ключа;
- провести моделирование работы транзисторного ключа и снять временные диаграммы;
- провести моделирование различных дополнительных вариантов транзисторного ключа по заданию преподавателя;
- по результатам работы сделать соответствующие выводы;
- оформить результаты выполненной работы в виде типового отчета.

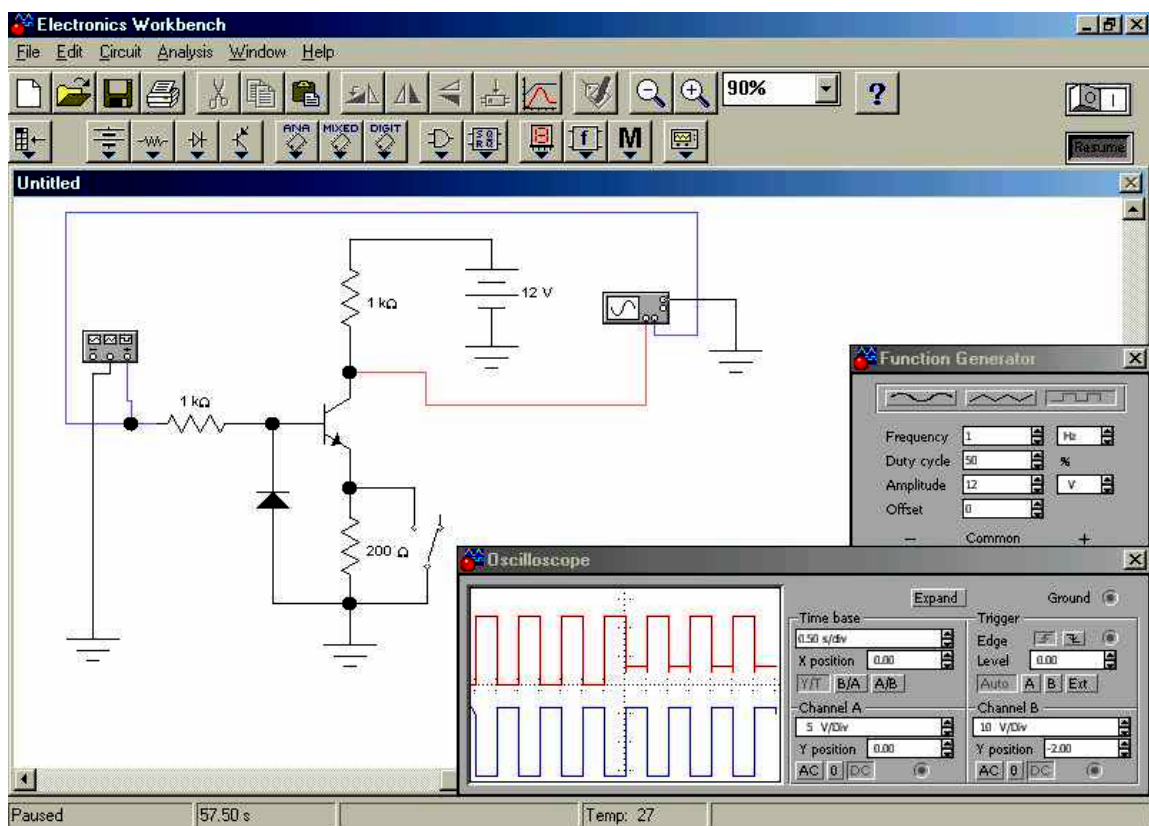


Рисунок 2.4. Схема транзисторного ключа с возможностью изменения режима работы, с целью оценки влияние резистора в цепи эмиттера ( $R_{ЭЭ}$ ) на  $U_{кэн}$ .

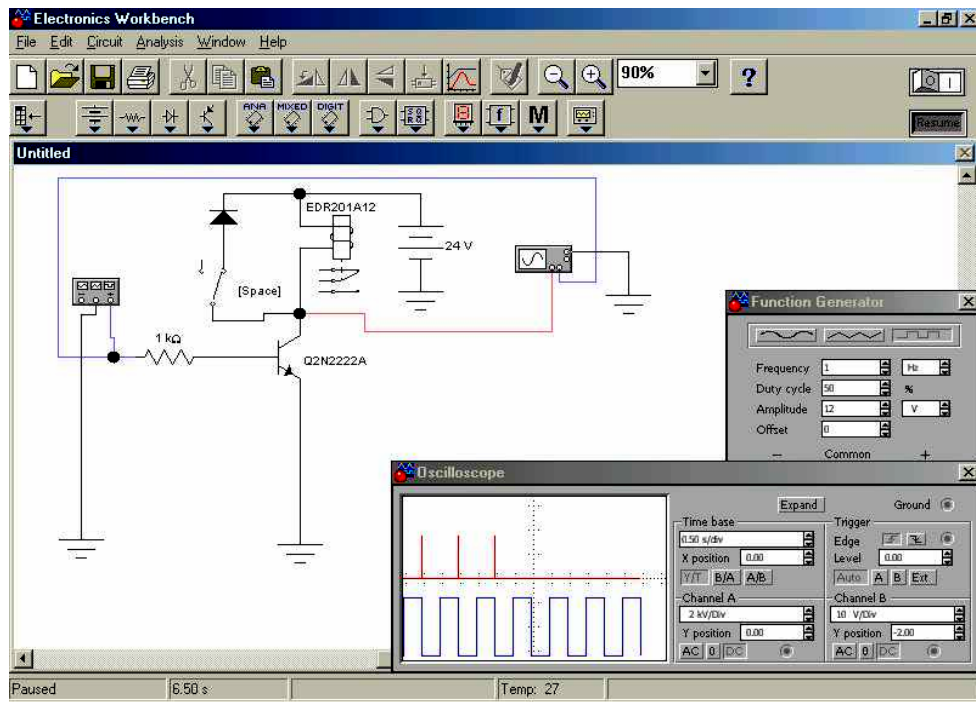


Рисунок 2.5. Исследование ключа с индуктивной нагрузкой.

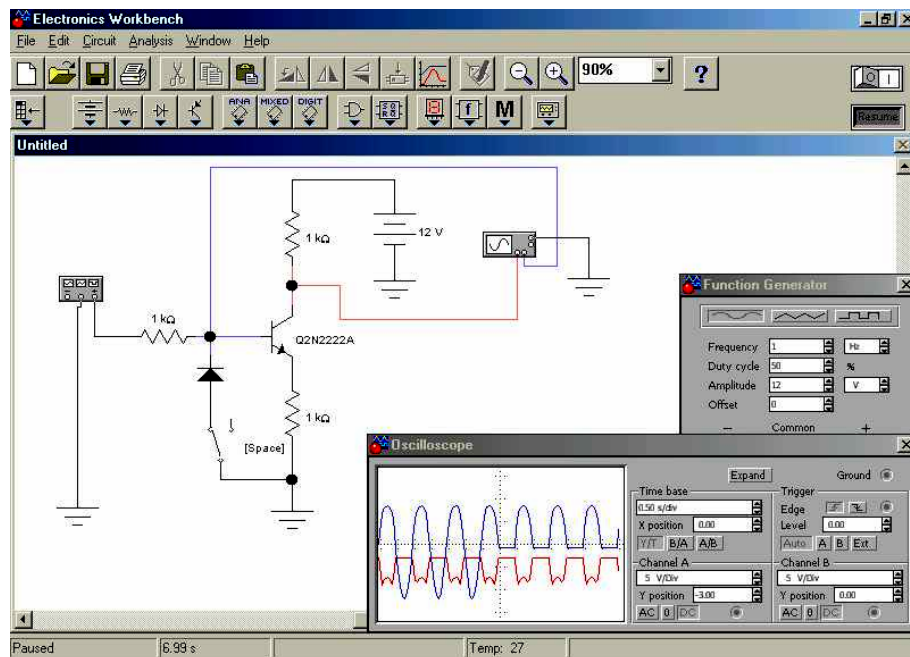


Рисунок 2.6. Транзисторный ключ с защитой базы транзистора от обратной полярности  $U_{BX}$ .

Контрольные вопросы:

1. Ключ с общим эмиттером производит инвертирование сигнала?
2. Чем определяется степень насыщения транзисторов в ключе ?
3. Зачем в базовой цепи необходим диод?
4. Зачем в коллекторной цепи необходим диод?
5. На транзисторах какой структуры можно реализовать транзисторный ключ?

### **Лабораторная работа №2.3 « Исследование характеристик полевого транзистора с обратносмещенным р-п переходом »**

**Цель работы:** Изучить ВАХ полевого транзистора в схеме с общим истоком, определить его основные параметры.

**Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ с использованием программы “Electronics Workbench”. В работе исследуются входная и выходная ВАХ конкретного элемента по выбору или заданного преподавателем по методике аналогичной в лабораторной работе 2.2.

В процессе выполнения работы сначала снимается зависимость тока стока и тока затвора от напряжения затвор-исток полевого транзистора при напряжении сток-исток равном 5 В, как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения. По полученной ВАХ необходимо определить начальный ток стока, напряжение запирающего (при токе стока около 10 мкА) и крутизну ВАХ в средней части характеристики.

Во вторую очередь снимаются выходные характеристики полевого транзистора при фиксированных напряжениях затвор-исток равных 0 В; 0,25 и 0,5 от напряжения запирающего.

Полученные данные и построенные ВАХ занести в отчет. Отчет должен также содержать схемы измерения параметров транзистора и выводы о свойствах полевых транзисторов и возможности их использования в технике.

### **Лабораторная работа № 2.4 «Исследование характеристик полевого транзистора с изолированным затвором »**

**Цель работы:** Изучить ВАХ полевого транзистора с изолированным затвором в схеме с общим истоком, определить его основные параметры.

**Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ с использованием программы “Electronics Workbench”. В работе исследуются входная и выходная ВАХ конкретного элемента по выбору или заданного преподавателем.

Методика выполнения работы соответствует предыдущей лабораторной работе по изучению характеристик полевого транзистора с обратносмещенным р-п переходом.

## **Тема 3: Применение элементов электроники.**

### **Лабораторная работа 3.1 «Исследование стабилизаторов напряжения и типовых схем выпрямления»**

#### **Лабораторная работа 3.1.1 « Исследование схемы параметрического стабилизатора напряжения»**

**Цель работы:**

Освоить применение стабилитронов для целей стабилизации напряжения, изучить простейшую практическую схему стабилизатора напряжения и ее основные параметры.

### **Подготовка к работе:**

Перед выполнением работы изучить свойства полупроводникового стабилизатора и его основные параметры (минимальный и максимальный токи стабилизации, напряжение стабилизации, внутреннее сопротивление, коэффициент стабилизации напряжения). Знать свойства обратной ветви ВАХ перехода, что такое напряжение пробоя и обратный ток перехода, восстанавливаемый и тепловой пробой перехода, роль ограничительного резистора при работе перехода на обратной ветви ВАХ.

### **Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ с использованием возможностей и измерительных приборов программы “Electronics Workbench”. В работе используются материалы предыдущей работы 2.1, на основе которых **необходимо составить схему простейшего параметрического стабилизатора** и снять его характеристики.

После составления принципиальной схемы параметрического стабилизатора, содержащего стабилизатор, ограничительный резистор и сопротивление нагрузки, работа выполняется в два этапа.

На первом этапе снять зависимость выходного напряжения, тока через стабилизатор и ток в нагрузке от входного напряжения, при сопротивлении нагрузки 1 кОм. Шаг изменения напряжения выбрать таким образом, чтобы на полученной характеристике было не менее 10 точек, а диапазон изменения входного напряжения был таким, чтобы ток через выбранный стабилизатор не превышал максимально допустимый, но был близок ему. Полученные данные занести в таблицу.

На втором этапе, определив, предварительно, оптимальное входное напряжение по полученным данным, которое примерно соответствует номинальному току стабилизации стабилизатора, снять зависимость выходного напряжения, тока через стабилизатор и тока в нагрузке при изменении нагрузки в диапазоне от 100 Ом до 10 кОм, при фиксированном входном напряжении. Полученные данные занести в таблицу.

По полученным данным построить соответствующие зависимости. По ним определить коэффициент стабилизации исследованной схемы по напряжению и по току в тех участках зависимостей, которые являются наиболее оптимальными. Сделать выводы о возможности технического использования исследованной схемы.

### **Лабораторная работа 3.1.2 « Исследование типовых схем выпрямления».**

**Цель работы:** Изучить типовые схемы выпрямления и их технические характеристики.

### **Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ с использованием программы “Electronics Workbench”. В работе исследуются входные и выходные осциллограммы однополупериодного и варианты двухполупериодного выпрямителей при активной и резистивно-емкостной нагрузке по выбору или заданного преподавателем.



Методика выполнения работы доводится до студента преподавателем непосредственно перед выполнением лабораторной работы и зависит от типа исследуемого выпрямителя.

### **Лабораторная работа №3.2 « Исследование схем на операционных усилителях »**

#### **Лабораторная работа №3.2.1 « Исследование линейных схем на операционных усилителях »**

**Цель работы:** Изучить типовые схемы использования операционных усилителей, их технические характеристики, способы задания коэффициента усиления и работу ОУ в режиме усиления постоянного и переменного тока.

#### **Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ с использованием программы “Electronics Workbench”. В работе исследуются характеристики конкретного операционного усилителя по выбору или заданного преподавателем. В общем случае требуется получить переходную характеристику ОУ в инвертирующем и неинвертирующем режиме (зависимость  $U_{\text{вых}}$  от  $U_{\text{вх}}$ ), определить соответствие коэффициента усиления заданному, определить напряжение смещения и граничную частоту в режиме усиления переменного напряжения. Конкретная методика выполнения работы доводится до студента преподавателем непосредственно перед выполнением лабораторной работы и зависит от выбранного способа выполнения лабораторной работы и типа исследуемой схемы.

По полученным данным построить графические зависимости параметров, определить заданные параметры и сделать выводы о возможности применения ОУ в различных узлах радиоэлектронной аппаратуры. Защитить отчет.

#### **Лабораторная работа №3.2.2 « Исследование нелинейных и генераторных схем на операционных усилителях »**

**Цель работы:** Изучить типовые схемы использования операционных усилителей в нелинейном и генераторном режимах, например в режиме компаратора или генератора импульсов. Данная работа является дополнительной и выполняется по усмотрению преподавателя в зависимости от темпа и глубины усвоения студентами предыдущего материала

#### **Порядок выполнения работы:**

Работа может выполняться как на учебном стенде, так и на ПЭВМ с использованием программы “Electronics Workbench”. Методика выполнения работы доводится до студента преподавателем непосредственно перед выполнением лабораторной работы и зависит от типа исследуемой схемы. преподавателем непосредственно перед выполнением лабораторной работы и зависит от типа исследуемой схемы.

Рекомендуемая литература

1 Г.Н. Горбачёв, Е.Е. Чаплыгин. Промышленная электроника.- М.: Энергоатомиздат, 1988.

2 Ушаков В.Н., Долженко О.В. Электроника: от элементов до устройств.- М.: Радио и связь, 1993.

3 В.Г. Герасимов. Основы промышленной электроники.- М.: Высшая школа, 1986.

4 В.С. Гутников Интегральная электроника в измерительных устройствах.- М: Энергоатомиздат, 1988.

5 Федорашко И.Н., Федорашко Ю.И. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине "Электронные и микропроцессорные устройства", 2002.

6 Компьютерный лабораторный практикум по микропроцессорным средствам и системам.Том 1. Основы цифровой техники. "Элат", Караганда, 2003.

## **6 Тематический план самостоятельной работы студента с преподавателем**

Наименование темы СРСП	Цель занятия	Форма проведения	Содержание задания	Рекомендуемая литература
1	2	3	4	5
1. Составные транзисторы, схема Дарлингтона, каскодные схемы.	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3]
2. Мощные полевые транзисторы и их применение	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3] Internet
3. Ферриты: состав, параметры, свойства, назначение	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3] Internet ]
4. Электромагнитные реле, их конструкция, свойства и применение	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3] Internet
5. Жидкокристаллические индикаторы, конструкция, свойства, применение	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3] Internet
6. Полупроводниковые лазеры: конструкция, свойства, применение	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3] Internet
7. Пьезоэлементы. Кварцевые резонаторы. Свойства этих элементов, параметры, применение	Углубление знания по данной теме	Семинар	Раскрыть содержание понятия	[1, 2, 3] Internet

## **7 Материалы для контроля знаний студентов в период рубежного контроля и итоговой аттестации**

### **7.1 Тематика письменных работ по дисциплине**

Тематика рефератов

1. Полупроводники и их свойства.
2. Полупроводниковые приборы с количеством переходов больше двух.
3. Применение операционных усилителей.
4. Цифровые устройства средней степени интеграции.

Тематика контрольных работ

1. Расчет делителя напряжения.
2. Расчет транзисторного ключа с общим эмиттером.
3. Расчет схемы операционного усилителя.
4. Синтез счетчика с заданным коэффициентом усиления.

## 7.2 Вопросы (тестовые задания) для самоконтроля

1. Для чего нужны ряды сопротивлений?
2. Что является носителями электрических зарядов в полупроводниках n-типа?
3. Какова полярность питающих напряжений относительно эмиттера в транзисторе n-p-n типа?
4. Чем отличаются свойства инвертирующего и неинвертирующего операционного усилителя?

## 7.3 Экзаменационные тесты

\$\$\$ 1

Какой полупроводник называется примесным?

- A) полупроводник, содержащий примесь с большой концентрацией;
- B) полупроводник, содержащий примесь в небольшой концентрации с валентностью, отличной от основного вещества;
- C) полупроводник, содержащий примесь в небольшой концентрации;
- D) сплав кремния и германия;
- E) смесь различных полупроводников.

\$\$\$ 2

Что такое диффузия носителей в полупроводнике?

- A) движение за счет внешнего электрического поля;
- B) движение за счет градиента разности концентрации;
- C) движение носителей за счет внешнего электрического поля;
- D) хаотическое тепловое движение;
- E) движение за счет внутреннего электрического поля.

\$\$\$ 3

Какова примерно высота потенциального барьера изолированного p-n перехода в Si?

- A) 0,5 ... 1,0 В;
- B) 0,3 ... 0,4 В;
- C) 0,01 ... 0,05 В;
- D) 0,05 ... 0,1 В
- E) 1..1,5 В.

\$\$\$ 4

Что произойдет с направлением и величиной тока, при изменении полярности напряжения,

приложенному к р полупроводнику?

- A) ток изменит свое направление без изменения величины;
- B) ток будет изменяться по экспоненциальному закону;
- C) ток не изменит своего направления;
- D) ток уменьшится до малой величины;
- E) ток будет отсутствовать.

\$\$\$ 5

Как зависит обратный ток коллектора от температуры?

- A) с ростом температуры увеличивается;
- B) с ростом температуры уменьшается;
- C) не зависит от температуры;
- D) имеет волнообразную зависимость;
- E) обратно пропорционален производной температуры.

\$\$\$ 6

Какая из схем включения транзистора обеспечивает максимальное усиление мощности?

Схема...

- A) с ОБ;
- B) с ОЭ;
- C) с ОК ;
- D) во всех схемах усиление мощности одинаково;
- E) инверсная схема.

\$\$\$ 7

Что является источником тепловых шумов в транзисторе?

- A) дырочные составляющие токов  $I_E$ ;  $I_K$ ;  $I_B$  ;
- B) сопротивление объема кристалла в объеме базы;
- C) электронные составляющие токов p-n перехода;
- D) поверхностные процессы на кристалле;
- E) дефекты в кристаллической решетке.

\$\$\$ 8

На чем основано управление током в полевом транзисторе?

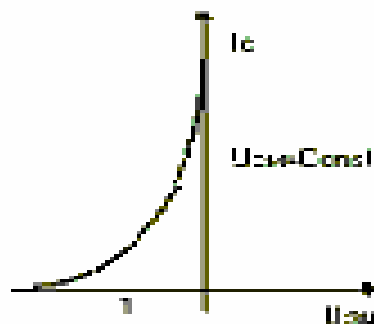
На изменении...

- A) коэффициента передачи тока под действием входного напряжения;
- B) емкости переходов;
- C) сопротивления канала вследствие изменения концентрации инжектированных носителей;
- D) ширины переходов и сечения канала при изменении входного напряжения;
- E) длины канала.

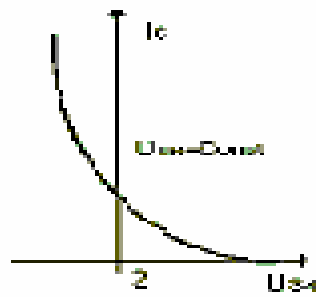
\$\$\$ 9

Укажите характеристику передачи транзистора с управляющим p-n-переходом и p-каналом.

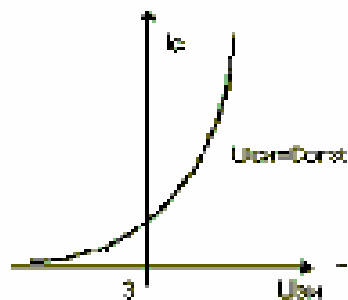
A)



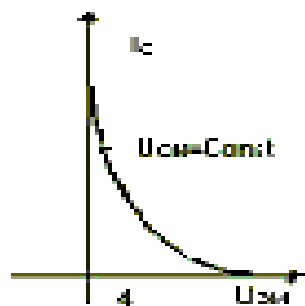
B)



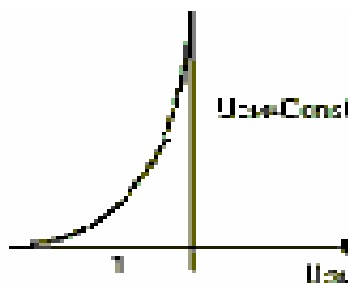
C)



D)



E)



\$\$\$ 10

От чего в основном зависит проводимость примесных полупроводников?

A) от концентрации примесей;

B) от полярности приложенного напряжения;

- С) от направления протекающего тока;
- Д) от типа электропроводности основного полупроводника;
- Е) от типа примесей.

\$\$\$ 11

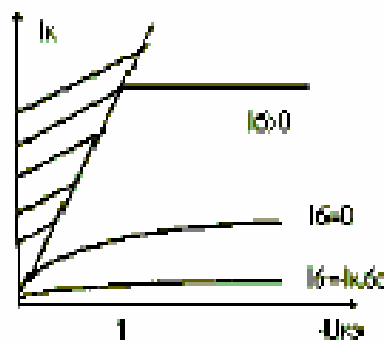
Что такое дрейф носителей заряда в полупроводнике?

- А) движение носителей за счет электрического поля;
- В) хаотическое тепловое движение;
- С) движение за счет разности концентрации;
- Д) квантовое излучение;
- Е) движение носителей за счет магнитного поля.

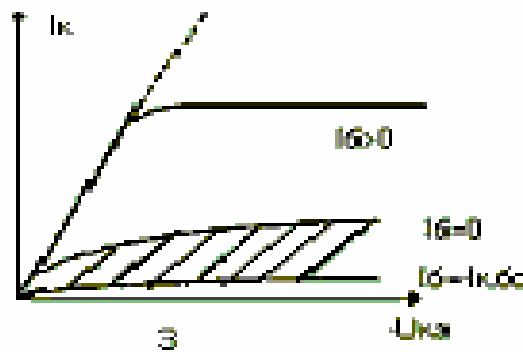
\$\$\$ 12

Укажите область режима насыщения на характеристиках транзистора (область заштрихована).

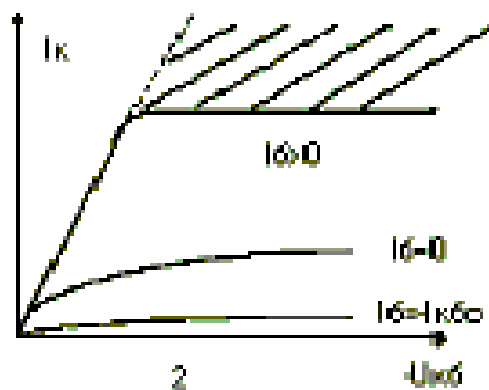
А)



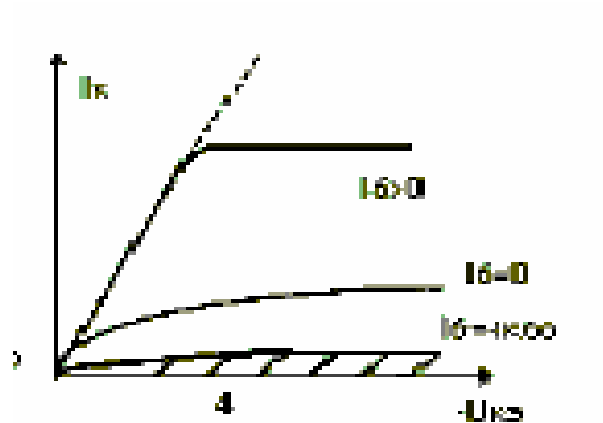
В)



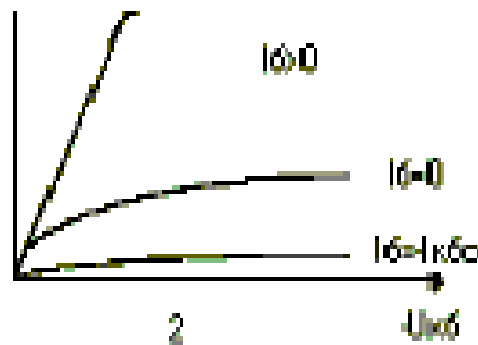
С)



D)



E)



\$\$\$ 13

Можно ли получить усиление тока при включении транзистора по схеме с ОБ?

- A) можно;
- B) нельзя;
- C) при малых нагрузках в цепи коллектора можно, при больших – нельзя;
- D) можно, при определенном  $E_k$  ;
- E) можно, при высоком коэффициенте усиления транзистора.

\$\$\$ 14

Транзистор это прибор для усиления тока или напряжения?

- A) напряжения;
- B) и того и другого;
- C) зависит от напряжения питания;
- D) тока;
- E) вопрос некорректен.

\$\$\$ 15

В каком направлении смещен электронно – дырочный переход в полевом транзисторе:

- A) в прямом направлении;
- B) в обратном направлении;
- C) в любом из двух направлений;
- D) переход вообще находится в равновесном состоянии;
- E) налево.

\$\$\$ 16

Какой полупроводник называется собственным?

Полупроводник

- A) без примесей;
- B) с донорными и акцепторными примесями;
- C) у которого валентная зона занята дырками;
- D) у которого зона проводимости занята дырками;
- E) только с примесью одной группы.

\$\$\$ 17

Что такое энергетический уровень?

- A) уровень энергии электрона;
- B) уровень энергии положительного иона;
- C) уровень энергии отрицательного иона;
- D) уровень энергии атома;
- E) уровень энергии протона.

\$\$\$ 18

Как добиться , чтобы эффективность эмиттера была возможно больше?

- A) сделать удельное сопротивление эмиттера много меньше удельного сопротивления базы;
- B) увеличить плотность эмиттерного перехода;
- C) уменьшить ширину базы;
- D) уменьшить удельное сопротивление базы в сравнении с удельным сопротивлением эмиттера;
- E) увеличить площадь эмиттерного перехода.

\$\$\$ 19

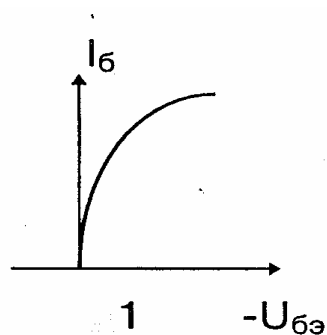
Чем ограничены значения коллекторного напряжения ?

- A) ограничивается пробоем коллекторного перехода;
- B) величиной коэффициента переноса;
- C) величиной коллекторного перехода;
- D) предельно допустимым коэффициентом обратной связи;
- E) емкостью коллектора.

\$\$\$ 20

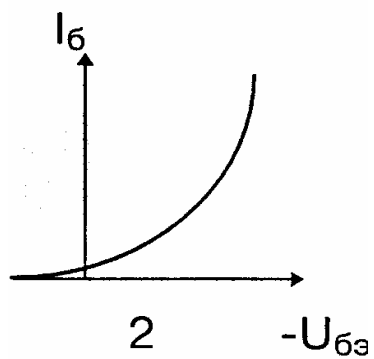
Укажите входную характеристику транзистора включенного по схеме с ОЭ, при  $U_{кэ} = 0$ .

A)

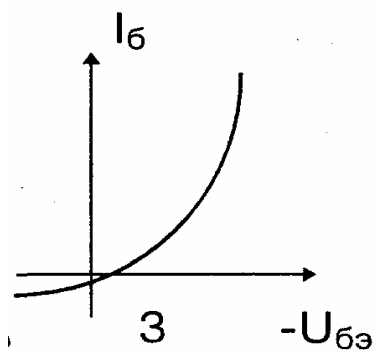




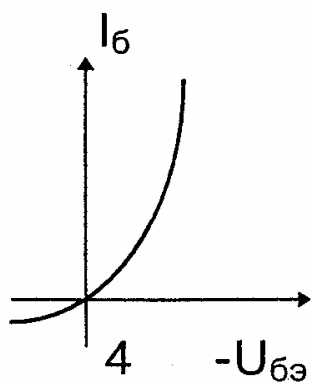
B)



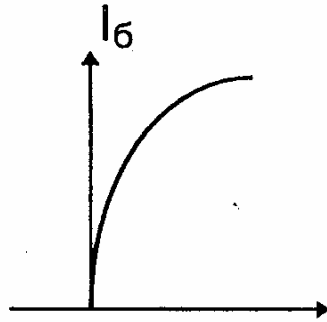
C)



D)



Е)



\$\$\$ 21

Что такое режим отсечки?

- А) коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный в обратном;
- В) коллекторный переход смещен в обратном направлении, а эмиттерный в прямом;
- С) коллекторный и эмиттерный переход смещены в прямом направлении;
- Д) коллекторный и эмиттерный переход смещены в обратном направлении;
- Е) когда отсутствует напряжение на коллекторе.

\$\$\$ 22

Движением каких носителей зарядов обусловлен ток в полевом транзисторе?

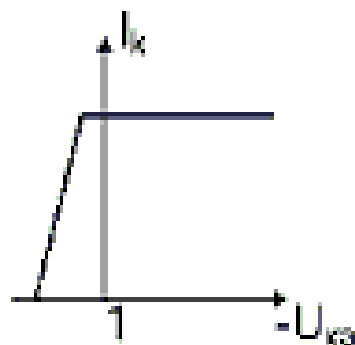
Движением:

- А) неосновных носителей;
- В) основных и неосновных носителей;
- С) неосновных носителей при положительном напряжении и основных при отрицательном напряжении  $U_{си}$ ;
- Д) основных носителей;
- Е) ионов.

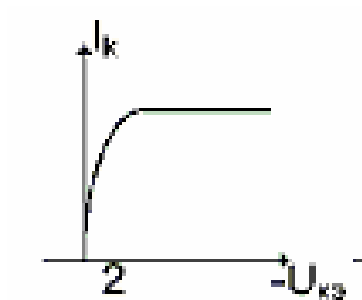
\$\$\$ 23

Укажите выходную характеристику транзистора включенного по схеме с ОЭ, при  $I_b > 0$ .

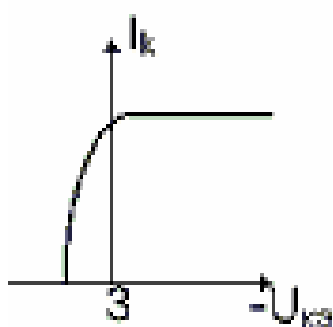
А)



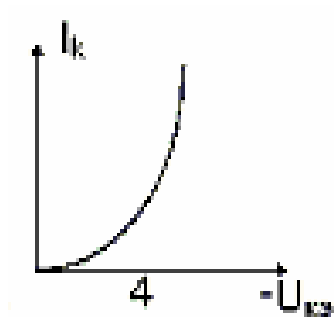
B)



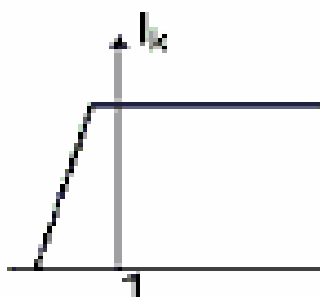
C)



D)



E)



\$\$\$ 24

Что такое запрещенные энергетические зоны?

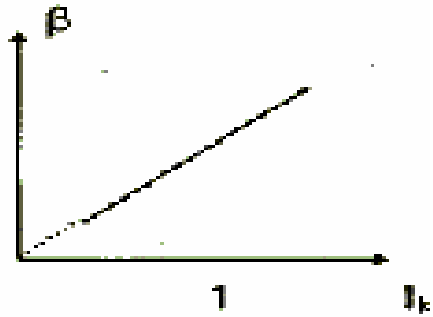
Это зоны, которые могут быть:

- A) заняты электронами;
- B) положительными ионами;
- C) отрицательными ионами;
- D) не могут быть заняты электронами;
- E) могут быть заняты протонами.

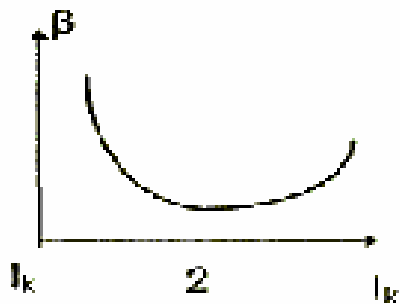
\$\$\$ 25

Как зависит коэффициент усиления базового тока от тока коллектора?

A)



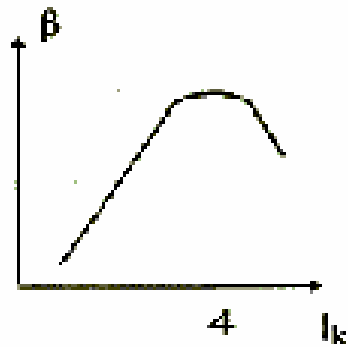
B)



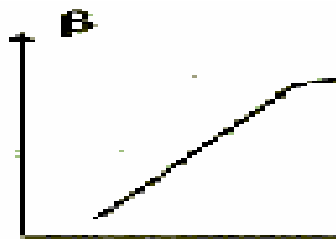
C)



D)



E)



\$\$\$ 26

Примеси какой валентности обеспечивают получение полупроводников p - типа?

- A) с меньшей валентностью, чем у исходного материала;
- B) четырехвалентные (C, Sn);
- C) пятивалентные (As, Sb);
- D) с валентностью, большей, чем у исходного материала;
- E) с валентностью 10.

\$\$\$ 27

Какой из h-параметров является выходной проводимостью транзистора?

- A)  $h_{11}$ ;
- B)  $h_{22}$ ;
- C)  $h_{12}$ ;
- D)  $h_{21}$ ;
- E)  $h_{33}$ .

\$\$\$ 28

Что называется напряжением отсечки в полевом транзисторе? Это напряжение...

- A)  $U_{си}$ , при котором происходит перекрытие канала;
- B)  $U_{си}$ , при котором происходит перекрытие канала при нулевом токе транзистора;
- C)  $U_{зи}$ , при котором происходит перекрытие канала при  $I \neq 0$ ;
- D)  $U_{зи}$ , при котором происходит перекрытие канала при  $I = 0$ ;
- E) при котором ток максимален.

\$\$\$ 29

Примеси какой валентности обеспечивают получение полупроводников n-типа?

- A) трехвалентные (In, Ga);
- B) четырехвалентные (C, Sn);
- C) с валентностью, большей, чем у исходного материала (As, Sb);
- D) с меньшей валентностью чем у исходного материала;
- E) с валентностью 10.

\$\$\$ 30

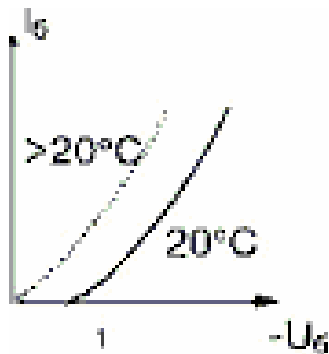
Какой из p-n переходов транзистора обычно имеет большую площадь?

- A) эмиттерный переход;
- B) коллекторный переход;
- C) оба перехода имеют одинаковую площадь;
- D) сток;
- E) исток.

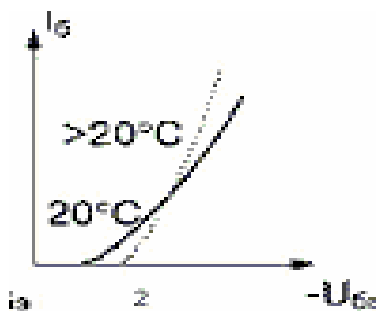
\$\$\$ 31

Укажите, как изменится входная характеристика транзистора типа p-n-p в схеме с ОЭ при увеличении температуры?

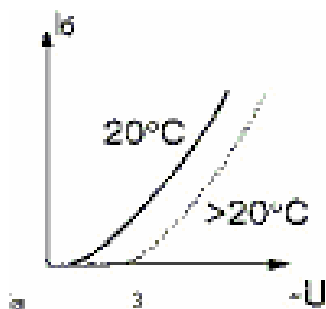
- A)



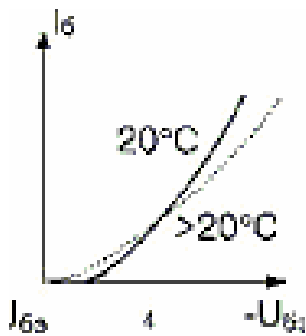
- B)



- C)



D)



E) в 2 раза

\$\$\$ 32

Какой из h-параметров является входным сопротивлением транзистора?

- A)  $h_{22}$  ;
- B)  $h_{21}$  ;
- C)  $h_{12}$  ;
- D)  $h_{11}$  ;
- E)  $h_{33}$ .

\$\$\$ 33

Какие из семейств статических характеристик транзистора являются основными?

Семейства...

- A) характеристик входных и передачи тока;
- B) входных и обратной связи;
- C) характеристики передачи тока и обратной связи;
- D) входных и выходных характеристик;
- E) проходных характеристик.

\$\$\$ 34

Что называется пороговым напряжением в МДП - транзисторе с индуцированным каналом?

- A)  $U_{си}$ , при котором образуется канал проводимости;
- B)  $U_{си}$ , при котором наступает насыщение;
- C)  $U_{зи}$  при котором наступает насыщение;
- D)  $U_{зи}$  при котором образуется канал проводимости;
- E) Максимальное напряжение.

\$\$\$ 35

Что такое p-n - переход?

- A) область между полупроводниками различных типов, соприкасающихся между собой;
- B) обедненный подвижными носителями заряда слой на границе раздела двух полупроводников с разным типом проводимости;
- C) скачок потенциала на границе соединения различных полупроводников;
- D) область слоев полупроводника, имеющая металлургическую границу;
- E) туннельный переход.

\$\$\$ 36

Чем определяется максимальное значение рабочего тока стабилитрона?

- A) наступлением теплового пробоя;
- B) моментом перехода из области насыщения в область пробоя;
- C) устойчивостью лавинного пробоя;

- D) величиной рабочего напряжения;
- E) количеством электронов в переходе.

\$\$\$ 37

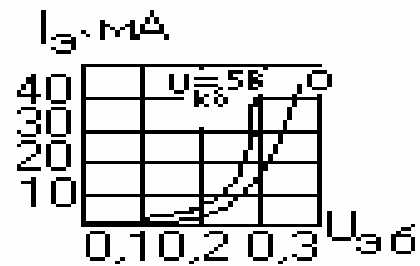
Какими носителями заряда, основными или не основными, обусловлен обратный ток коллектора?

- A) основными носителями в области базы;
- B) неосновными носителями, имеющимися в области базы и области коллектора;
- C) основными носителями в области коллектора;
- D) неосновными носителями в области эмиттера;
- E) основными носителями в области эмиттера.

\$\$\$ 38

Заданы входные характеристики транзистора, работающего в активном режиме. Какой схеме включения транзистора и какому типу электропроводности они соответствуют?

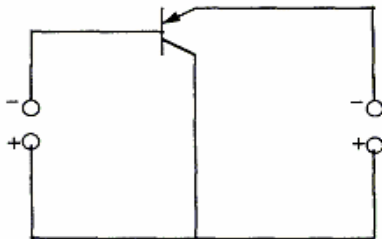
- A) p-n-p, ОБ;
- B) n-p-n, ОБ;
- C) p-n-p, ОЭ;
- D) n-p-n, ОЭ;
- E) p-n-p, ОК.



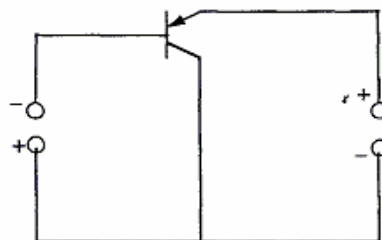
\$\$\$ 39

Какова полярность подключения источников питания к транзистору типа p-n-p в схеме с ОК?

A)

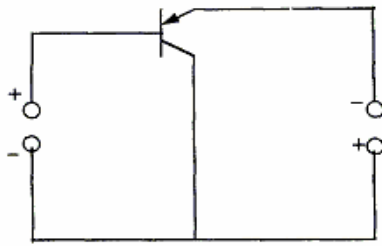


B)

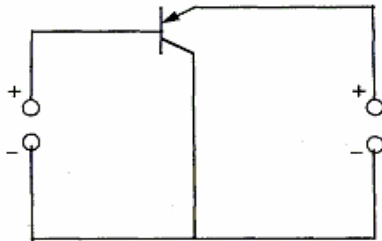




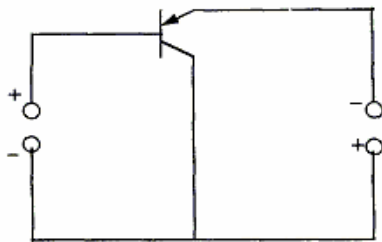
C)



D)



E)



\$\$\$ 40

Что понимают под обратным током базы  $I_{бэ}$ ?

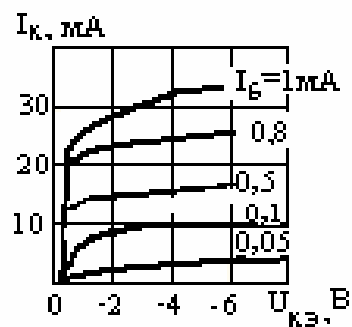
Понимают ток базы...

- A) при разомкнутом коллекторе и заданном напряжении  $U_{бэ}$ ;
- B) при замкнутом накоротко коллекторе и эмиттере и  $U_{бэ} = \text{const}$ ;
- C) при заданных обратных напряжениях  $U_{бэ}$  и  $U_{кэ}$ ;
- D) при замкнутом эмиттере и заданном обратном напряжении  $U_{кб}$ ;
- E) при пробое.

\$\$\$ 41

Представлены характеристики транзистора. Какой тип электропроводности и какая схема включения применена?

- A) p-n-p, ОБ;
- B) p-n-p, ОЭ;
- C) n-p-n, ОБ;
- D) n-p-n, ОЭ;
- E) n-p-n, ОИ.



\$\$\$ 42

Что ограничивает максимально допустимый прямой ток через диод?

- A) электрической пробой;
- B) лавинный пробой;
- C) разогрев p-n перехода;
- D) рост сопротивления;
- E) тепловой пробой.

\$\$\$ 43

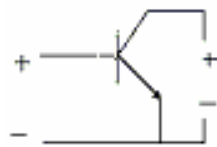
Как связаны между собой токи электродов транзистора?

- A)  $I_b = I_e + I_k$ ;
- B)  $I_b = -I_e + I_k$ ;
- C)  $I_b = I_e - I_k$ ;
- D)  $I_b = I_e - 2I_k$ ;
- E)  $I_b = I_e - I_k + 1$ .

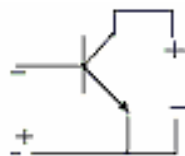
\$\$\$ 44

Каково рабочее смещение на транзисторе типа n-p-n при включении с ОЭ?

A)



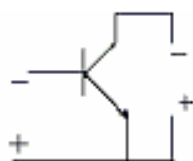
B)



C)



D)



E) отрицательное.

\$\$\$ 45

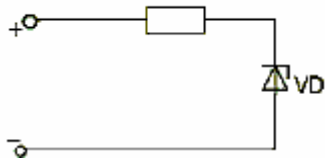
Емкость какого перехода больше, ЭП или КП ?

- A) ЭП;
- B) КП;
- C) Емкости переходов одинаковы;
- D) Зависит от типа проводимости транзистора;
- E) Зависит от схемы включения.

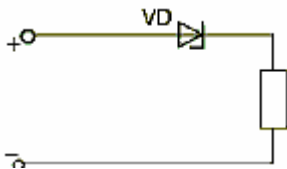
\$\$\$ 46

Укажите правильную схему включения стабилитрона.

A)



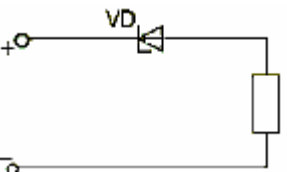
B)



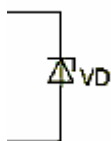
C)



D)



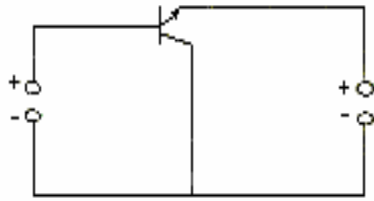
E)



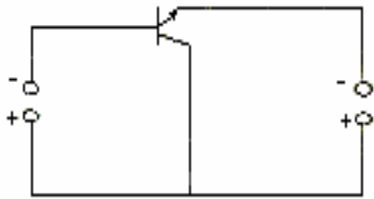
\$\$\$ 47

Каково рабочее смещение на транзисторе типа n-p -n при включении по схеме с ОК?

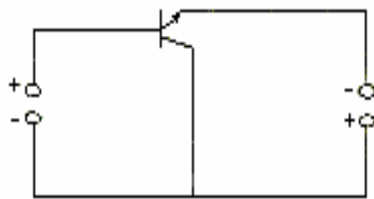
A)



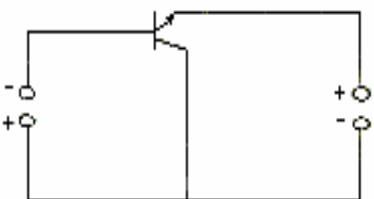
B)



C)



D)

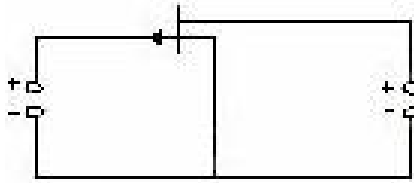


E) 25 В

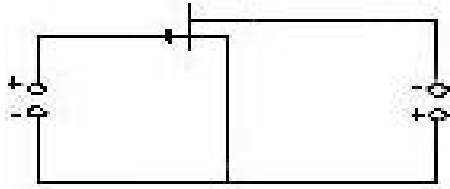
\$\$\$ 48

Каково рабочее смещение на транзисторе с управляющим p-n переходом и p - каналом в схеме с ОИ?

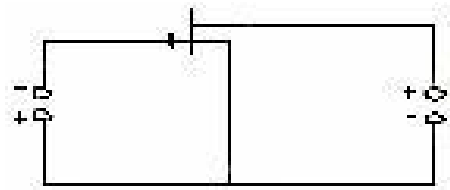
A)



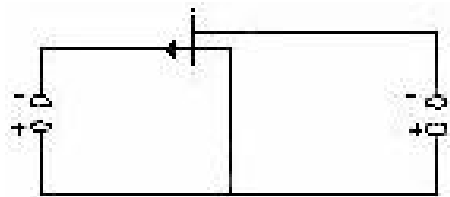
B)



C)



D)

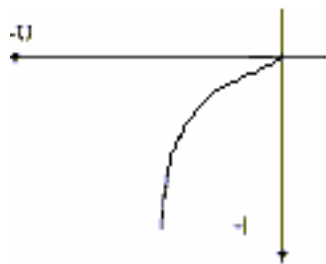


E) 10 В.

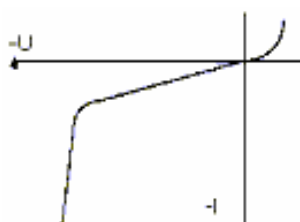
\$\$\$ 49

Укажите рабочую ветвь ВАХ стабилитрона.

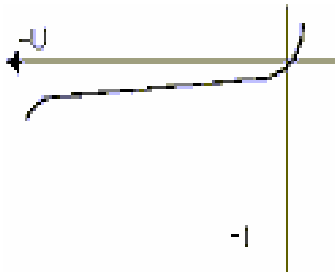
A)



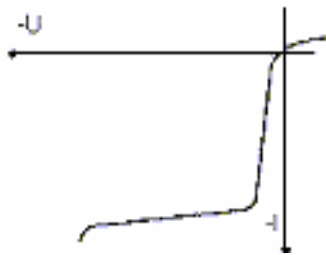
B)



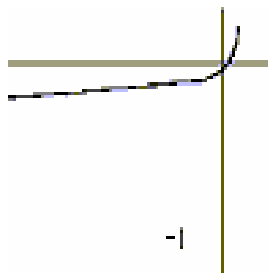
C)



D)



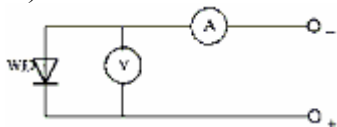
E)



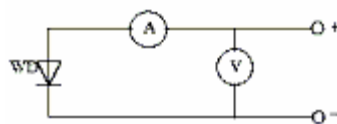
\$\$\$ 50

Укажите схему включения выпрямительного диода для исследования обратной ветви ВАХ.

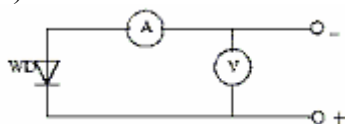
A)



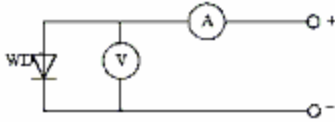
B)



C)



D)



Е) с общей базой.

\$\$\$ 51

Как зависит обратный ток полупроводникового диода от температуры?

- А) сначала растет, потом остается постоянным;
- В) уменьшается с ростом температуры;
- С) увеличивается с ростом температуры;
- Д) растет и проходит через максимум;
- Е) проходит через минимум.

\$\$\$ 52

За счет чего (главная причина) может выйти из строя транзистор в схеме с ОЭ при обрыве базы?

- А) за счет недопустимого перераспределения напряжения источника питания между переходами;
- В) нет пути для электронов коллектора;
- С) за счет отрицательного пространственного заряда;
- Д) за счет уменьшения высоты потенциального барьера ЭП;
- Е) за счет потери эмиссии.

\$\$\$ 53

Что такое режим насыщения транзистора?

- А) ЭП и КП смещены в обратном направлении;
- В) ЭП смещен в прямом, а КП - в обратном;
- С) ЭП смещен в обратном, а КП - в прямом;
- Д) ЭП и КП смещены в прямом направлении;
- Е) режим теплового пробоя.

\$\$\$ 54

Укажите определение статического коэффициента передачи тока  $h_{21э}$  транзистора в схеме с ОЭ.

- А)  $h_{21э} = I_k / I_b$  при  $U_{кэ} = \text{const}$ .
- В)  $h_{21э} = I_k / I_b$  при  $U_{кб} = \text{const}$ .
- С)  $h_{21э} = (I_k - I_{кбо}) / (I_b + I_{кбо})$  при  $U_{кэ} = \text{const}$ .
- Д)  $h_{21э} = (I_b + I_{кбо}) / (I_k - I_{кбо})$  при  $U_{кэ} = \text{const}$ .
- Е)  $h_{21э} = I_k + I_b$ .

\$\$\$ 55

Какая часть полупроводника (ПП) в полевом транзисторе оказывает наибольшее сопротивление электрическому току?

- А) все части ПП оказывают одинаковое сопротивление, т.к. концентрация основных носителей везде одинакова;
- В) канал;
- С) узкая перекрестная часть канала;
- Д) зона эмиттера;
- Е) зона базы.

\$\$\$ 56

Что такое туннельный диод ?

- А) диод, у которого ВАХ монотонно возрастает;
- В) диод, у которого сопротивление не зависит от полярности напряжения;
- С) диод, с ВАХ с чередующимися возрастаниями и падающими участками;
- Д) диод, у которого на ВАХ имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
- Е) диод с туннелем для электронов.

\$\$\$ 57

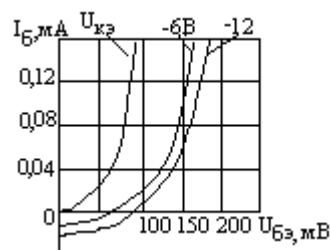
Что называется эмиттером? Область...

- А) с большей концентрацией примесей;
- В) назначением которой является инжекция в базу неосновных носителей;
- С) со стороны р-п перехода;
- Д) со стороны п-р перехода;
- Е) назначением которой является экстракция из базы неосновных носителей.

\$\$\$ 58

Представлены характеристики транзистора. Какая схема включения и тип электропроводности транзистора?

- А) р-п-р, ОБ.
- В) п-р-п, ОБ.
- С) р-п-р, ОЭ.
- Д) п-р-п, ОЭ.
- Е) р-п-п, ОК.



\$\$\$ 59

Что такое активный режим транзистора?

- А) ЭП и КП смещены в обратном направлении;
- В) ЭП и КП смещены в прямом направлении;
- С) ЭП смещен в прямом, а КП - в обратном направлении;
- Д) ЭП смещен в обратном, а КП - в прямом направлении;
- Е) ток коллектора отсутствует.

\$\$\$ 60

Какие подвижные носители являются основными в полупроводнике р-типа?

- А) электроны;
- В) положительные ионы;
- С) отрицательные ионы;
- Д) дырки;
- Е) дырки и отрицательные ионы.

\$\$\$ 61

Является ли наличие р-п перехода обязательным в полупроводниковом диоде?

- А) диод может не иметь р-п переход;
- В) наличие одного р-п перехода обязательно;
- С) необходимо не менее двух переходов;
- Д) диод может иметь и не иметь р-п переходы;
- Е) достаточно наличие полупроводника.



\$\$\$ 62

Какое явление в транзисторе называется инжекцией?

- A) введение основных носителей в область базы;
- B) введение не основных носителей в область базы;
- C) введение не основных носителей в область эмиттера;
- D) введение не основных носителей в область коллектора;
- E) столкновение дырки и электрона.

\$\$\$ 63

В какой схеме включения транзистора можно получить усиление тока?

В схеме...

- A) с ОБ;
- B) с ОЭ и ОК;
- C) с ОЭ и ОБ;
- D) с ОИ;
- E) с ОС.

\$\$\$ 64

Какие подвижные носители являются основными в полупроводнике n-типа?

- A) положительные ионы;
- B) электроны;
- C) отрицательные ионы;
- D) дырки;
- E) нейтроны.

\$\$\$ 65

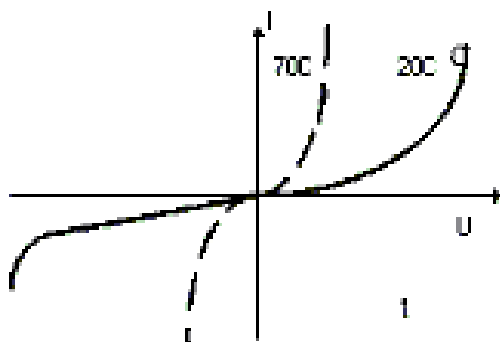
В каком направлении перемещаются электроны через p-n переход за счет электрического поля (каково направление движения)?

- A) из p-области в n-область;
- B) из n-области в p-область;
- C) равномерно в обоих направлениях;
- D) от отрицательного полюса источника;
- E) направо.

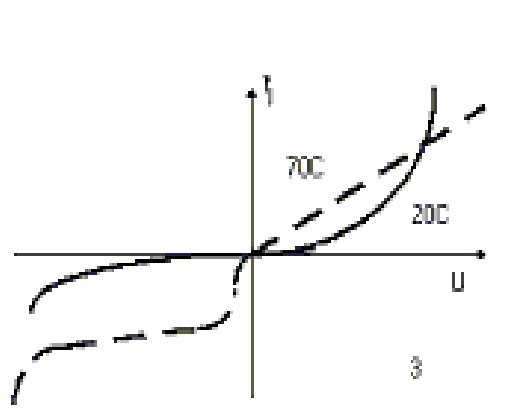
\$\$\$ 66

Как изменяется ВАХ выпрямительного диода при повышении температуры?

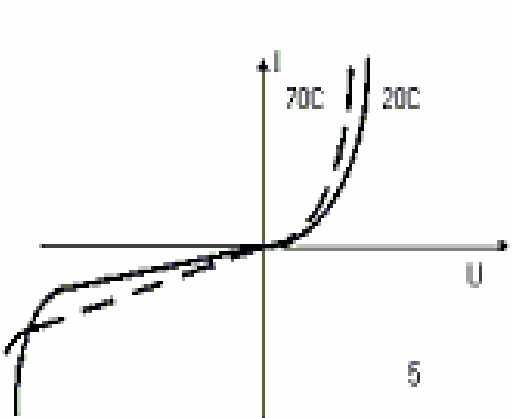
- A)



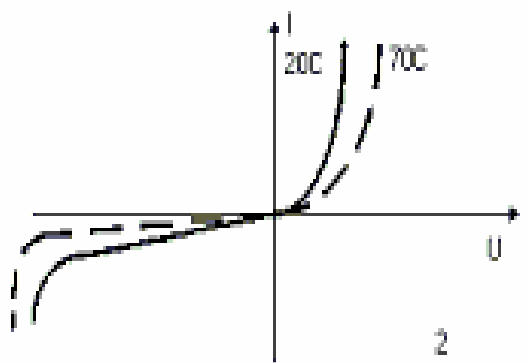
B)



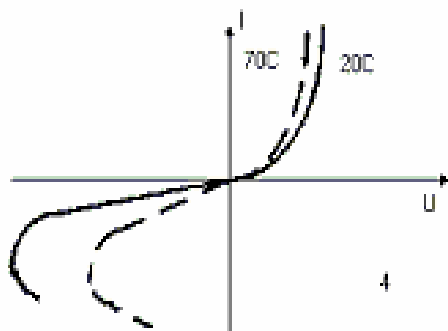
C)



D)



Е)



\$\$\$ 67

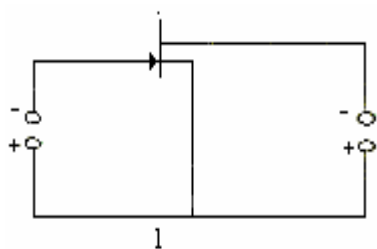
Какой ток протекает через транзистор в схеме с ОЭ при  $U_{бэ}=0$  (к.з. между базой и эмиттером)? Протекает начальный коллекторный ток...

- А)  $I_{кн} = I_{эо}$ ;
- В)  $I_{кн} = I_{ко}$ ;
- С)  $I_{эо} > I_{кн} > I_{ко}$ ;
- Д)  $I_{эбо}$ ;
- Е) равный нулю.

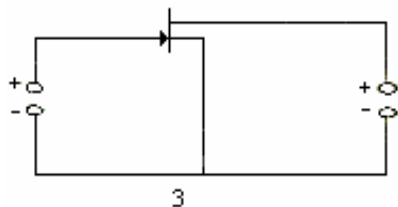
\$\$\$ 68

Каково рабочее смещение на транзисторе с управляющим р-п - переходом и п - каналом в схеме с ОИ?

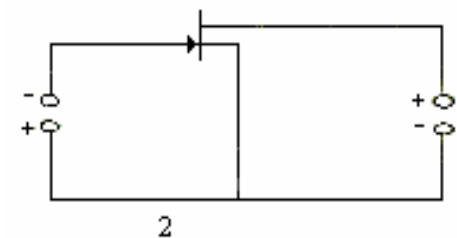
А)



В)



С)

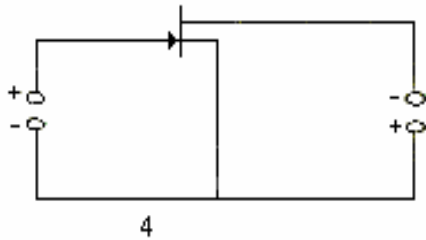


D) 5 В.

\$\$\$ 69

Что называется коллектором? Это область транзистора...

- A) со средней концентрацией примеси;
- B) назначением которой является инжекция неосновных носителей в базу;
- C) со стороны закрытого р-п-перехода;
- D) назначением которой является экстракция из базы неосновных носителей;
- E) где происходит аннигиляция.



\$\$\$ 70

В какой схеме включения транзистора усилительный каскад имеет минимальное  $R_{вых}$ ?

- A) в схеме с ОБ;
- B) с ОЭ;
- C) с ОК;
- D) в схеме с ОК при большом  $R_{вых}$  ;
- E) с общим анодом.

\$\$\$ 71

Какая из схем включения транзистора обеспечивает максимальное усиление мощности ? Схема...

- A) с ОБ;
- B) с ОЭ;
- C) с ОК;
- D) во всех схемах усиление мощности одинаково;
- E) с ОЗ.

\$\$\$ 72

На чем основано управление током в полевом транзисторе?

На изменении

- A) ширины переходов и смещение канала при изменении входного напряжения;
- B) сопротивления канала вследствие изменения концентрации инжектированных носителей;
- C) коэффициента передачи тока под действием входного напряжения;
- D) емкости переходов;
- E) объема кристалла.

\$\$\$ 73

**Какие основные электрические параметры характеризуют постоянный резистор?**

- A) мощность рассеивания, допустимое напряжение, номинал, допуск;
- B) мощность рассеивания, допустимый ток, сопротивление, цветные полосы;
- C) величина сопротивления, допуск, габаритные размеры, тип, цена;
- D) цветные полосы, угол поворота, мощность рассеивания, допуск;
- E) длина, ширина, вес.

\$\$\$ 74

Температурный коэффициент сопротивления показывает зависимость...

- A) величины сопротивления от угла поворота;
- B) величины допуска от температуры;
- C) величины сопротивления от температуры;
- D) величины мощности рассеивания от температуры;
- E) температуры резистора от сопротивления.

\$\$\$ 75

Переменный резистор, как элемент, предназначен для...

- A) регулирования отверткой;
- B) регулирования напряжением;
- C) регулирования током;
- D) регулирования с помощью ручки управления;
- E) регулирования температуры.

\$\$\$ 76

Мощность, рассеиваемая на резисторе, выражается формулой:

- A)  $P = I R$  ;
- B)  $P = U I$  ;
- C)  $P = U^2 / R$  ;
- D)  $P = I^2 / R$  ;
- E)  $P = I R^2$  .

\$\$\$ 77

Какие основные электрические параметры характеризуют конденсатор постоянной емкости?

- A) величина емкости, допуск, допустимое напряжение, ТКЕ;
- B) допустимый ток, мощность, величина емкости;
- C) полярность, тип диэлектрика, напряжение пробоя, ток разряда;
- D) тип, цвет, габаритные размеры;
- E) ток заряда, время разряда, электрическая емкость.

\$\$\$ 78

Какой может быть величина сопротивления резистора?

- A) любой;
- B) кратной  $2^n$  ;
- C) кратной  $10^n$  ;
- D) в соответствии с допуском по определенному ряду;
- E) определяется размером резистора.

\$\$\$ 79

Электролитические конденсаторы отличаются от остальных тем, что...

- A) имеют возможность регулировки величины емкости;
- B) имеют большие габаритные размеры;
- C) имеют большую величину емкости и напряжения;
- D) содержат электролит, имеют большую величину емкости, требуют определенную полярность включения;
- E) имеют отверстие для заливки электролита.

\$\$\$ 80

“Дырки ” в полупроводниковой структуре это...

- A) отрицательно заряженные частицы;
- B) положительно заряженные образования внутри вещества;
- C) отверстия в атомах полупроводника с положительным зарядом;
- D) атомы примеси;
- E) молекулы примеси.

\$\$\$ 81

Электрон имеет...

- A) положительный заряд;
- B) высокую удельную проводимость;
- C) низкий температурный коэффициент;
- D) отрицательный заряд;
- E) красный цвет излучения.

\$\$\$ 82

Полупроводник типа “р” имеет в своей структуре носители электрического заряда в виде...

- A) электронов;
- B) атомов;
- C) “дырок”;
- D) ионов;
- E) молекул.

\$\$\$ 83

Полупроводник типа “n” имеет в своей структуре носители электрического заряда в виде...

- A) атомов;
- B) электронов;
- C) нейтронов;
- D) “дырок”;
- E) ионов.

\$\$\$ 84.

Полупроводниковый переход обладает...

- A) высоким сопротивлением;
- B) двухсторонней проводимостью;
- C) высокой проводимостью;
- D) односторонней проводимостью;
- E) отсутствием проводимости.

\$\$\$ 85

Основными параметрами полупроводникового диода являются...

- A) наличие дырок и электронов;
- B) допустимая мощность рассеивания;
- C) прямой ток, импульсный ток, допустимое обратное напряжение;
- D) быстродействие, ток, мощность, прямое напряжение перехода;
- E) температура, сопротивление, частота.

\$\$\$ 86

Полупроводниковый стабилитрон, это элемент, работающий на...

- A) импульсную мощность;
- B) переменном токе;
- C) прямой ветви ВАХ;
- D) обратной ветви ВАХ;
- E) длительности импульса.

\$\$\$ 87

Основными параметрами стабилитрона являются...

- A) максимальный прямой ток и напряжение;
- B) напряжение включения и ток управления;
- C) напряжение стабилизации, максимальный и минимальный токи стабилизации;
- D) ток утечки, быстродействие, ток анода;
- E) ток базы, ток коллектора.

\$\$\$ 88

Светодиод – это оптоэлектронный прибор, работающий на...

- A) обратной ветви ВАХ;
- B) прямой ветви ВАХ;
- C) на переменном токе;
- D) на выходе аппаратуры;
- E) на входе устройства.

\$\$\$ 89

Транзистор – это электронный прибор, содержащий...

- A) два p-n перехода;
- B) три вывода;
- C) полупроводник p – типа;
- D) полупроводник n – типа;
- E) анод и катод.

\$\$\$ 90

Коэффициент усиления транзистора в схеме с общим эмиттером это...

- A) отношение токов базы и эмиттера;
- B) отношение токов коллектора и эмиттера;
- C) отношение напряжения коллектора к току базы;
- D) отношение тока коллектора к току базы;
- E) произведение тока коллектора и тока базы.

\$\$\$ 91

Коэффициент усиления транзистора в схеме с общим эмиттером...

- A) меньше единицы;
- B) равен единице;
- C) больше единицы;
- D) зависит от количества нейтронов в базе;
- E) равен нулю.

\$\$\$ 92

Входное сопротивление усилителя это...

- A) Разность между выходным и входным током;
- B) Отношение входного напряжения к выходному току;

- C) Отношение выходного напряжения к входному току;
- D) Отношение входного напряжения к входному току;
- E) Отношение выходного напряжения к выходному току.

\$\$\$ 93

Выходное сопротивление усилителя это...

- A) Разность между выходным и входным током;
- B) Отношение входного напряжения к выходному току;
- C) Отношение выходного напряжения к входному току;
- D) Отношение входного напряжения к входному току;
- E) Отношение выходного напряжения к выходному току.

\$\$\$ 94

Основными параметрами транзистора являются...

- A) мощность и ток;
- B) допустимые напряжения на переходах, максимальный ток коллектора, максимальная мощность коллектора, коэффициент усиления по току;
- C) ток, напряжение, мощность, габаритные размеры, коэффициент усиления по напряжению;
- D) сопротивление, напряжение стабилизации, обратное напряжение;
- E) температура, размер корпуса, количество выводов.

\$\$\$ 95

Коэффициент усиления по напряжению это...

- A) отношение напряжения источника питания к входному напряжению;
- B) отношение входного напряжения к выходному;
- C) разность между выходным и входным напряжением;
- D) отношение выходного напряжения к входному;
- E) произведение тока на напряжение.

\$\$\$ 96

Усилитель переменного тока обязательно содержит...

- A) переменные конденсаторы;
- B) переменные резисторы;
- C) разделительные конденсаторы;
- D) электролитические конденсаторы;
- E) светодиоды.

\$\$\$ 97

В многокаскадном усилителе общее усиление равно...

- A) произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов;
- B) сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов;
- C) разности коэффициентов усиления отдельных каскадов;
- D) частному от деления коэффициента усиления последнего и первого каскадов.
- E) усилению первого каскада.

\$\$\$ 98

Полевой транзистор с р-п переходом характеризуется...

- A) коэффициентом усиления по току;
- B) коэффициентом усиления по напряжению;
- C) напряжением срабатывания и током;
- D) начальным током и крутизной;
- E) током анода.



\$\$\$ 99

Тиристор - это полупроводниковый прибор, содержащий...

- A) базу, эмиттер и коллектор;
- B) анод и катод;
- C) затвор, сток и исток;
- D) анод, катод и управляющий электрод;
- E) одиночный p-n переход.

\$\$\$ 100

Однополупериодный выпрямитель содержит...

- A) один диод;
- B) два диода;
- C) четыре диода;
- D) два диода и стабилитрон;
- E) три диода.

\$\$\$ 101

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой содержит...

- A) четыре диода;
- B) три диода;
- C) два диода;
- D) один диод;
- E) стабилитрон.

\$\$\$ 102

Мостовая схема выпрямителя содержит...

- A) два диода;
- B) четыре диода;
- C) один диод;
- D) два светодиода;
- E) два стабилитрона.

\$\$\$ 103

Частота пульсаций на выходе однополупериодного выпрямителя равна...

- A) частоте сети;
- B) удвоенной частоте сети;
- C) половине частоты сети;
- D) учетверенной частоте сети;
- E) 50 Гц.

\$\$\$ 104

Частота пульсаций на выходе двухполупериодного выпрямителя равна...

- A) половине частоты сети;
- B) частоте сети;
- C) удвоенной частоте сети;
- D) учетверенной частоте сети;
- E) 100 Гц.

\$\$\$ 105

Конденсатор фильтра, подсоединенный к выходу выпрямителя, служит для...

- A) уменьшения выходного напряжения выпрямителя;
- B) увеличения выходного напряжения;
- C) сглаживания пульсаций и увеличения выходного напряжения;

- D) стабилизации выходного напряжения;
- E) увеличения внутреннего сопротивления.

\$\$\$ 106

Основным параметром усилителя напряжения является...

- A) коэффициент усиления по мощности;
- B) коэффициент шума;
- C) коэффициент усиления по напряжению;
- D) выходное напряжение;
- E) потребляемая мощность.

\$\$\$ 107

Если сигнал, поданный с выхода усилителя на вход, уменьшает его усиление, то такая обратная связь называется...

- A) глубокой;
- B) положительной;
- C) отрицательной;
- D) частотно-независимой;
- E) неустойчивой.

\$\$\$ 108

В усилителе, работающем в классе "B", рабочая точка выбирается из условия усиления...

- A) всего сигнала;
- B) верхней половины одной из полуволн сигнала;
- C) одной полуволны сигнала;
- D) минимального сигнала;
- E) частоты сигнала.

\$\$\$ 109

Усилитель работает в классе "A". При одинаковых параметрах рабочей точки, какая из схем обладает более высоким входным сопротивлением?

- A) схема на транзисторе n-p-n, с общим эмиттером и смещением рабочей точки фиксированным напряжением и резистором в цепи эмиттера;
- B) схема на транзисторе p-n-p, с общим эмиттером и смещением рабочей точки фиксированным током;
- C) схема на транзисторе n-p-n, с общим эмиттером и смещением рабочей точки фиксированным напряжением;
- D) схема на транзисторе p-n-p, с общим эмиттером смещением рабочей точки фиксированным напряжением;
- E) схема на транзисторе n-p-n, с общим коллектором.

\$\$\$ 110

Для превращения усилителя в генератор необходимо обеспечить следующие условия:

- A) большой коэффициент усиления;
- B) отрицательную обратную связь;
- C) баланс фаз и амплитуд;
- D) высокую частоту усиления;
- E) высокую мощность.

\$\$\$ 111

Типовой операционный усилитель имеет...

- A) один вход и один выход;
- B) один вход и два выхода;

- С) два одинаковых входа и один выход;
- Д) один прямой, один инверсный входы и один выход;
- Е) базу, эмиттер и коллектор.

\$\$\$ 112

В каком случае коэффициент усиления операционного усилителя выше?

- А) при использовании в качестве входа - инверсного входа;
- В) при использовании в качестве входа – не инвертирующего входа;
- С) при объединении входов;
- Д) при замыкании входов на землю;
- Е) при замыкании выхода на источник питания.

\$\$\$ 113

Дифференциальным называется усилитель, усиливающий...

- А) напряжение, подаваемое относительно общего провода на инверсный вход;
- В) напряжение, подаваемое относительно общего провода на не инвертирующий вход;
- С) переменное напряжение;
- Д) напряжение между входами усилителя;
- Е) постоянное напряжение.

\$\$\$ 114

Элемент имеет надпись на корпусе "КД213Б", это...

- А) транзистор;
- В) германиевый диод;
- С) резистор;
- Д) кремниевый диод;
- Е) конденсатор.

\$\$\$ 115

Элемент имеет надпись на корпусе "КР140УД8", это...

- А) транзистор;
- В) логическая микросхема;
- С) аналоговая микросхема;
- Д) тиристор;
- Е) резистор.

\$\$\$ 116

Элемент имеет надпись на корпусе "1К8И", это...

- А) конденсатор;
- В) транзистор;
- С) резистор величиной 1,8 Мом;
- Д) резистор величиной 1,8 кОм;
- Е) резистор величиной 18 кОм.

\$\$\$ 117

Биполярный транзистор – это прибор предназначенный для...

- А) усиления тока;
- В) для стабилизации напряжения;
- С) для индикации;
- Д) для нагрева радиатора;
- Е) для воспроизведения звука.

\$\$\$ 118

В биполярном транзисторе наибольшую величину имеет...

- A) ток базы;
- B) ток анода;
- C) ток катода;
- D) ток эмиттера;
- E) ток коллектора.

\$\$\$ 119

Положительным свойством полевого транзистора является...

- A) малый вес;
- B) большое входное сопротивление;
- C) высокий уровень шума;
- D) большая яркость;
- E) наличие магнитного поля.

\$\$\$ 120

Индикатор на жидких кристаллах дает наилучшее изображение...

- A) на морозе;
- B) в темноте;
- C) при ярком свете;
- D) при сильной жаре;
- E) при ударе.

\$\$\$ 121

Индикатор на светодиодах дает наилучшее изображение...

- A) на морозе;
- B) в темноте;
- C) при ярком свете;
- D) при сильной жаре;
- E) при ударе.

\$\$\$ 122

В режиме насыщения у транзисторного ключа напряжение между коллектором и эмиттером...

- A) равно источнику питания;
- B) очень мало;
- C) равно напряжению сети;
- D) равно входному напряжению;
- E) отсутствует.

\$\$\$ 123

Тиристор – это полупроводниковый прибор, применяемый для...

- A) усиления аналоговых сигналов;
- B) для регулирования выпрямленного напряжения;
- C) для стабилизации тока анода;
- D) для нагрева корпуса аппарата;
- E) для преобразования спектра.

\$\$\$ 124

Интегральная микросхема – это...

- A) маленькое изображение схемы на дисплее компьютера;
- B) наклейка на плате электронного блока;

- С) полупроводниковый прибор, содержащий внутри определенное сочетание элементов, предназначенных для выполнения какой-либо функции;
- Д) интеграл от функции, описывающей логику функционирования схемы;
- Е) цифровая запись изображения схемы.

\$\$\$ 125

Светодиод внутри своей структуры содержит...

- А) полупроводник одного типа;
- В) маленькую лампочку различного цвета;
- С) полупроводниковый р-п переход, аналогичный обычному диоду;
- Д) маленькую спираль накаливания;
- Е) р-і-п структуру.

\$\$\$ 126

Фотодиод предназначен для...

- А) преобразования тепла в электрический ток;
- В) освещения шкалы прибора;
- С) преобразования светового потока в электрический параметр;
- Д) получения фотографии;
- Е) для контроля температуры.

\$\$\$ 127

Элемент имеет надпись на корпусе "КТ201Б", это...

- А) диод;
- В) тиристор;
- С) транзистор;
- Д) резистор;
- Е) варистор.

\$\$\$ 128

При переводе усилителя из усиления в классе " В " в режим, соответствующий классу " А ", ток, потребляемый усилителем...

- А) уменьшится;
- В) увеличится;
- С) не изменится;
- Д) станет равным нулю;
- Е) станет реактивным.

\$\$\$ 129

Для открывания тиристора необходимо обеспечить следующие условия:

- А) переменное напряжение на анод;
- В) напряжение соответствующей полярности между анодом и катодом;
- С) напряжение соответствующей полярности на управляющем электроде при определенном напряжении между катодом и анодом;
- Д) ток анода меньше тока утечки;
- Е) переменный ток катода.

\$\$\$ 130

Для запираания открытого тиристора необходимо...

- А) увеличить ток анода;
- В) увеличить ток катода;
- С) уменьшить ток анода до определенной величины;
- Д) увеличить напряжение на управляющем электроде;

Е) уменьшить напряжение на управляющем электроде.

\$\$\$ 131

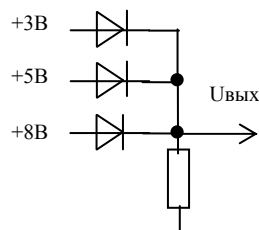
Динистор – это...

- А) дистанционно управляемый резистор;
- В) дискретный транзистор;
- С) двойной резистор;
- Д) двухполярный источник питания;
- Е) полупроводниковый элемент с внутренней положительной обратной связью.

\$\$\$ 132

Определить напряжение на выходе схемы (без учёта падения на диодах).

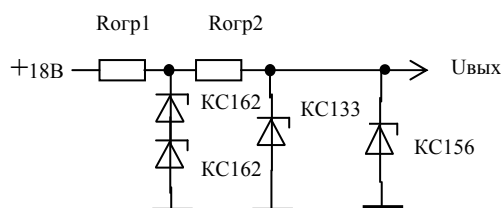
- А) +3В;
- В) +5В;
- С) +8В
- Д) +13В;
- Е) +16В.



\$\$\$ 133

Определить напряжение на выходе схемы.

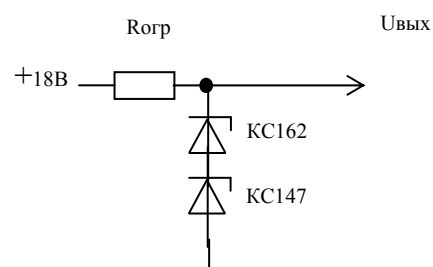
- А) 6.2В;
- В) 3.3В;
- С) 6.2+6.2В;
- Д) 5.6В;
- Е) 6.2+5.6В.



\$\$\$ 134

На выходе параметрического стабилизатора напряжения произошло короткое замыкание. Возможный исход?

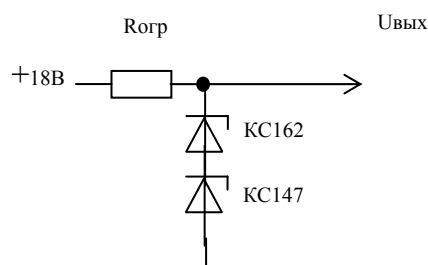
- А)  $U_{\text{вых}}$  снизится в 2 раза;
- В) неограниченное повышение тока через стабилитрон;
- С) повышение тока потребления по цепи: +18В;
- Д)  $U_{\text{вых}} = +18\text{В}$ ;
- Е) пробой нижнего, по схеме, стабилитрона.



\$\$\$ 135

На выходе параметрического стабилизатора напряжения произошел обрыв нагрузки. Возможный исход?

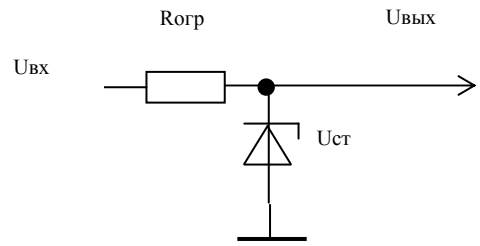
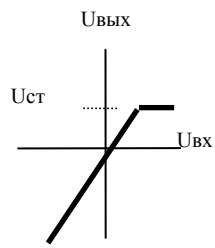
- А)  $U_{\text{вых}}$  увеличится в 2 раза;
- В) повышение тока через стабилитрон;
- С) через Rогр пойдёт недопустимо большой ток;
- Д)  $U_{\text{вых}}$  уменьшится в 2 раза;
- Е)  $U_{\text{вых}} = +18\text{В}$ .



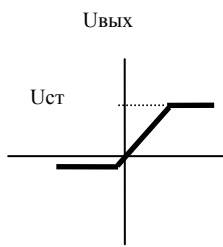
\$\$\$ 136

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

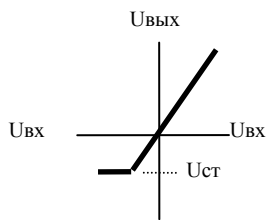
A)



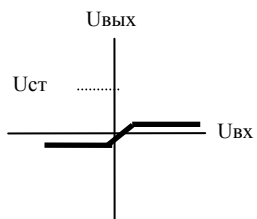
B)



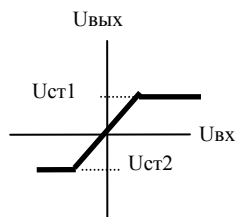
C)



D)



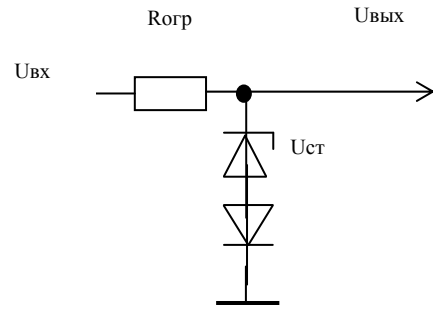
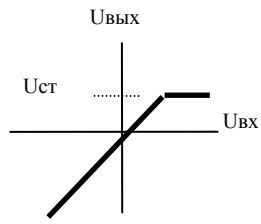
E)



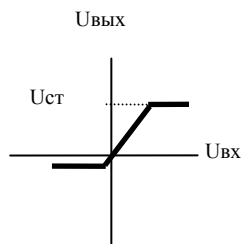
\$\$\$ 137

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

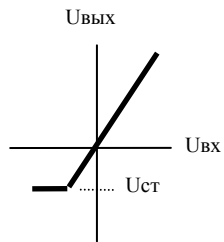
A)



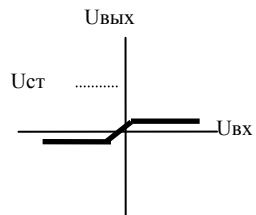
B)



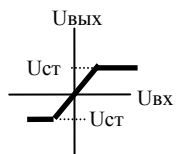
C)



D)



E)

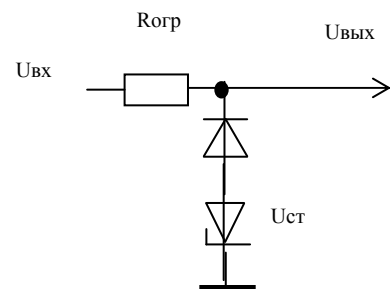
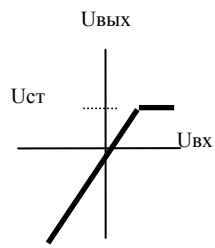




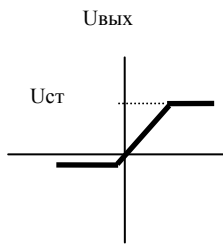
\$\$\$ 138

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

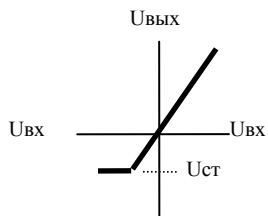
A)



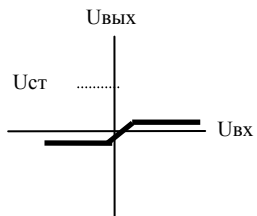
B)



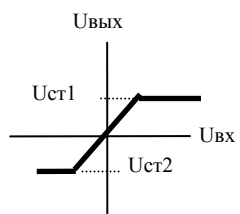
C)



D)



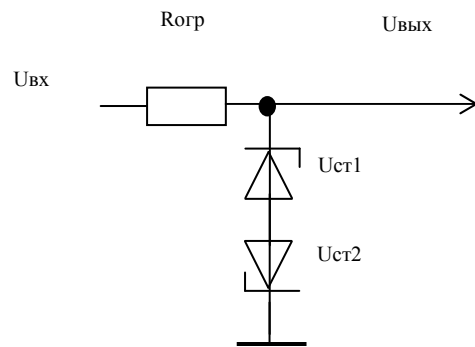
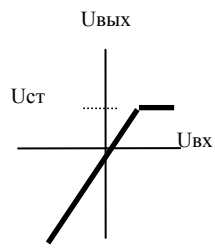
E)



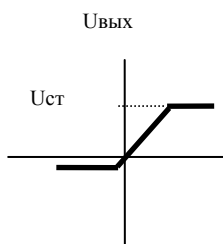
\$\$\$ 139

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

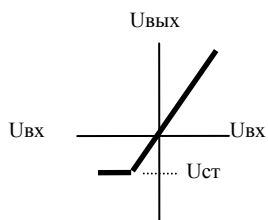
A)



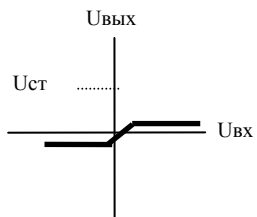
B)



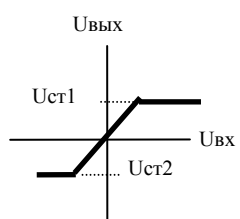
C)



D)



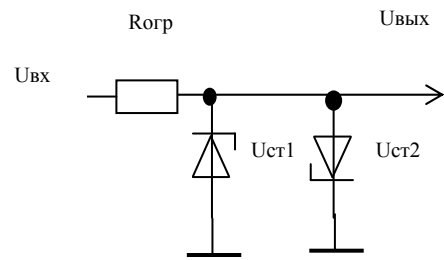
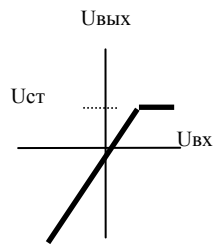
E)



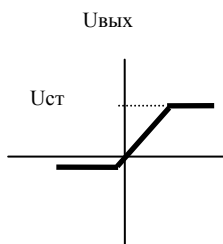
\$\$\$ 140

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

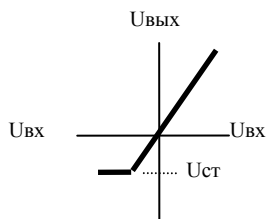
A)



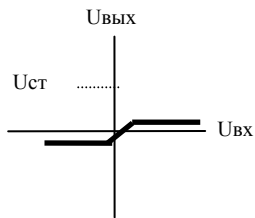
B)



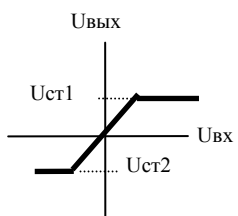
C)



D)



E)



\$\$\$ 141

Какие допущения сделаны при анализе схем "ОУ" с ООС?

- A)  $I_{кз}$  не превышает 25 мА;
- B)  $U_{вых}$  ОУ не может быть больше  $U_{пит}$  ОУ;
- C) входным сигналом является разность между сигналами на двух входах;
- D) разность сигналов между двумя входами равна нулю;
- E) типовое значение выходного тока ОУ  $I_{вых} = 5 \div 10$  мА.

\$\$\$ 142

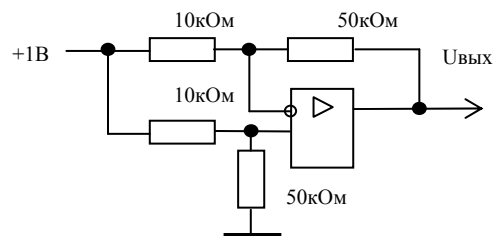
Напряжение на неинвертирующем входе больше, чем на инвертирующем на 2 В.  $U_{вых}$  оу, не охваченного "ООС" равно...

- A) -2В;
- B) 0В;
- C) меньше чем -2В;
- D) +2В;
- E) больше чем +2В.

\$\$\$ 143

Определить напряжение на выходе схемы.

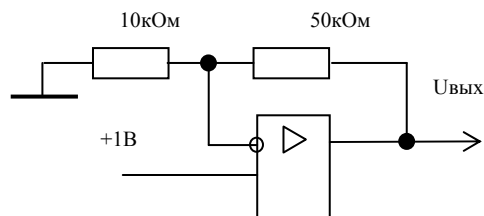
- A) +5В;
- B) 0В;
- C) -5В;
- D) +6В;
- E) -6В.



\$\$\$ 144

Определить напряжение на выходе схемы.

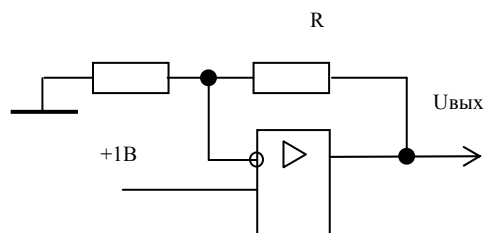
- A) +5В;
- B) 0В;
- C) -5В;
- D) +6В;
- E) -6В.



\$\$\$ 145

Определить сопротивление R при  $K_u = 10$ .

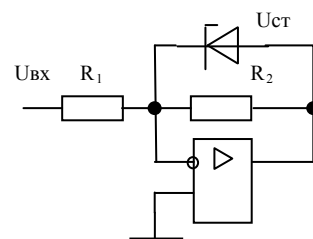
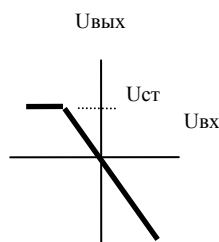
- A) 3 кОм;
- B) 30 кОм;
- C) 270 кОм;
- D) 300 кОм;
- E) 330 кОм.



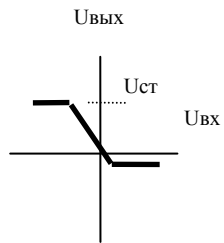
\$\$\$ 146

Какой передаточной характеристике соответствует схема?

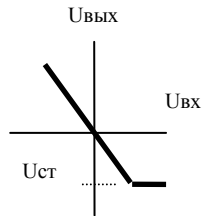
A)



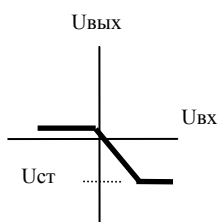
B)



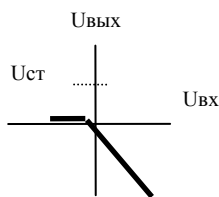
C)



D)



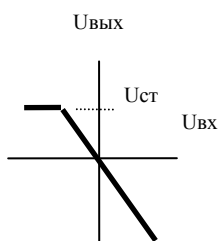
E)



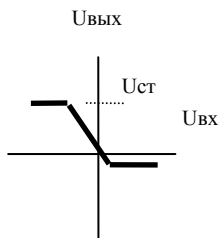
\$\$\$ 147

Какой передаточной характеристике соответствует схема?

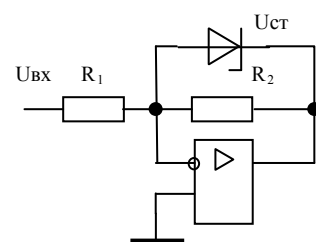
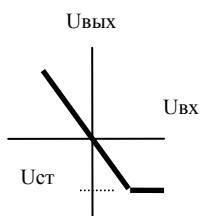
A)



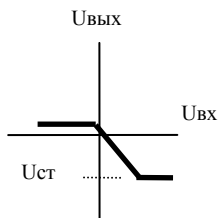
B)



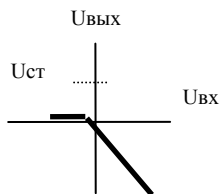
C)



D)



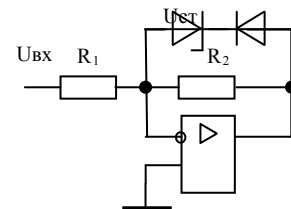
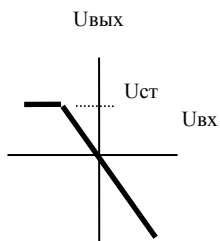
E)



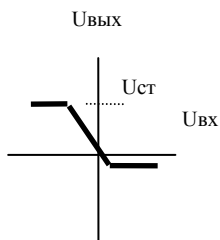
\$\$\$ 148

Какой передаточной характеристике соответствует схема?

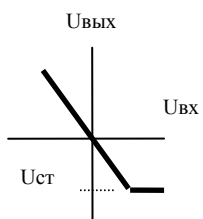
A)



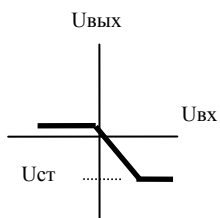
B)



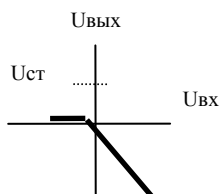
C)



D)



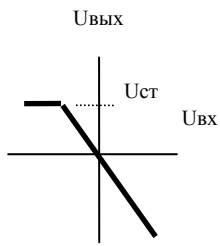
E)



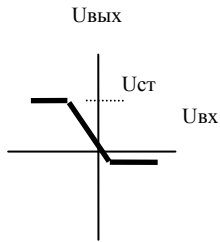
\$\$\$ 149

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

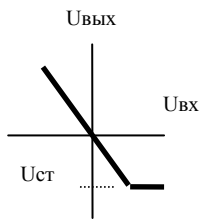
A)



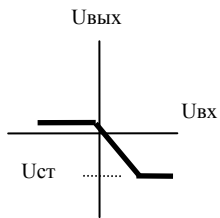
B)



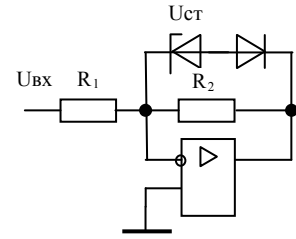
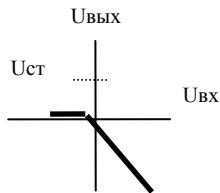
C)



D)



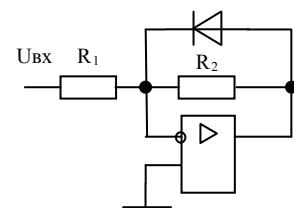
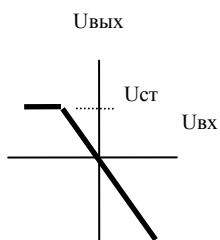
E)



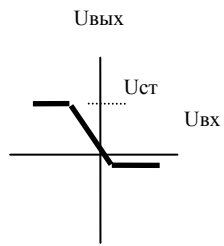
\$\$\$ 150

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

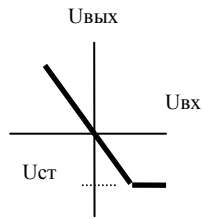
A)



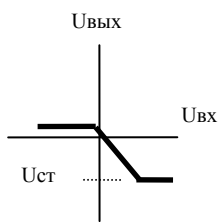
B)



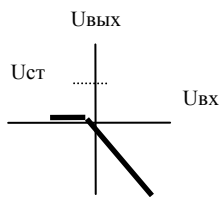
C)



D)



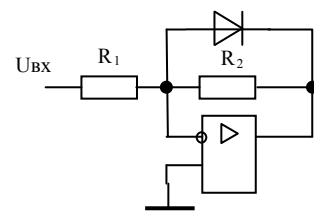
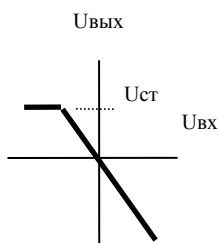
E)



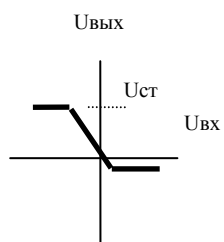
\$\$\$ 151

Какой передаточной характеристике соответствует схема:

A)

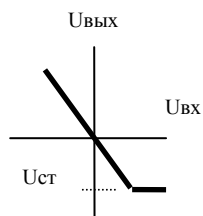


B)

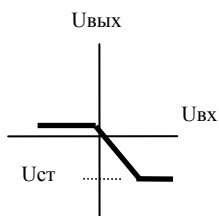




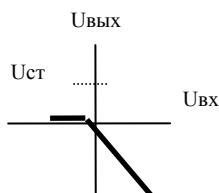
C)



D)



E)



\$\$\$ 152

От чего зависит сопротивление позистора?

- A) от напряжения;
- B) от тока;
- C) от освещенности;
- D) от давления;
- E) от температуры.

\$\$\$ 153

От чего зависит сопротивление фоторезистора?

- A) от напряжения;
- B) от тока;
- C) от освещенности;
- D) от давления;
- E) от температуры.

\$\$\$ 154

От чего зависит сопротивление тензорезистора?

- A) от напряжения;
- B) от тока;
- C) от освещенности;
- D) от давления;
- E) от температуры.

\$\$\$ 155

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых терморезистор с отрицательным ТКС, и находится в световом потоке. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 156

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых терморезистор с отрицательным ТКС, и находится в тепловом потоке. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 157

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых терморезистор с отрицательным ТКС, и находится под воздействием давления. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 158

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых проволочный тензорезистор, и находится в световом потоке. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 159

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых проволочный тензорезистор, и находится в тепловом потоке. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 160

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых проволочный тензорезистор, и находится под воздействием давления. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;

- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 161

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых фоторезистор, и находится в световом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 162

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых фоторезистор, и находится в тепловом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 163

Схема содержит два последовательно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых фоторезистор, и находится под воздействием давления.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 2 кОм;
- D) 1 кОм;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 164

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых фоторезистор, и находится в тепловом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 165

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых фоторезистор, и находится под воздействием давления.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 166

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых фоторезистор, и находится в световом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 167

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых проволочный тензорезистор, и находится в световом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 168

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых проволочный тензорезистор, и находится в тепловом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 169

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых проволочный тензорезистор, и находится под воздействием давления.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 170

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых терморезистор с отрицательным ТКС, и находится в световом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 171

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых терморезистор с отрицательным ТКС, и находится в тепловом потоке.

Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 172

Схема содержит два параллельно соединенных резистора величиной 1 кОм, один из которых терморезистор с отрицательным ТКС, и находится под воздействием давления. Каково общее сопротивление схемы?

- A) 2 кОм;
- B) более 2 кОм;
- C) менее 500 Ом;
- D) более 500 Ом;
- E) 500 Ом.

\$\$\$ 173

Схема содержит два параллельно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с отрицательным ТКЕ, и находится под воздействием давления.

Какова общая емкость схемы?

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;
- C) менее 0,5 мкФ;
- D) более 0,5 мкФ;
- E) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 174

Схема содержит два параллельно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с отрицательным ТКЕ, и находится в тепловом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;
- C) менее 2 мкФ;
- D) более 0,5 мкФ;
- E) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 175

Схема содержит два параллельно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с отрицательным ТКЕ, и находится в световом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;
- C) менее 0,5 мкФ;
- D) более 0,5 мкФ;
- E) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 176

Схема содержит два параллельно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с положительным ТКЕ, и находится под воздействием давления.

Какова общая емкость схемы?

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;

- С) менее 0,5 мкФ;
- Д) более 0,5 мкФ;
- Е) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 177

Схема содержит два параллельно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с положительным ТКЕ, и находится в тепловом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- А) 2 мкФ;
- В) более 2 мкФ;
- С) менее 0,5 мкФ;
- Д) более 0,5 мкФ;
- Е) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 178

Схема содержит два параллельно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с положительным ТКЕ, и находится в световом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- А) 2 мкФ;
- В) более 2 мкФ;
- С) менее 0,5 мкФ;
- Д) более 0,5 мкФ;
- Е) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 179

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с отрицательным ТКЕ, и находится под воздействием давления.

Какова общая емкость схемы?

- А) 2 мкФ;
- В) более 2 мкФ;
- С) менее 0,5 мкФ;
- Д) более 0,5 мкФ;
- Е) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 180

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с отрицательным ТКЕ, и находится в тепловом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- А) 2 мкФ;
- В) более 2 мкФ;
- С) менее 0,5 мкФ;
- Д) более 0,5 мкФ;
- Е) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 181

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с отрицательным ТКЕ, и находится в световом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- А) 2 мкФ;
- В) более 2 мкФ;
- С) менее 0,5 мкФ;
- Д) более 0,5 мкФ;
- Е) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 182

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с положительным ТКЕ, и находится под воздействием давления.

Какова общая емкость схемы:

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;
- C) менее 0,5 мкФ;
- D) более 0,5 мкФ;
- E) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 183

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с положительным ТКЕ, и находится в тепловом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;
- C) менее 0,5 мкФ;
- D) более 0,5 мкФ;
- E) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 184

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора величиной 1 мкФ с положительным ТКЕ, и находится в световом потоке.

Какова общая емкость схемы?

- A) 2 мкФ;
- B) более 2 мкФ;
- C) менее 0,5 мкФ;
- D) более 0,5 мкФ;
- E) 0,5 мкФ.

\$\$\$ 185

Где больше резисторов в диапазоне от 1 кОм до 100 кОм: в коробке с резисторами изготовленными по ряду E24 или в коробке с резисторами изготовленными по ряду E12?

- A) в коробке с резисторами по ряду E24;
- B) в коробке с резисторами по ряду E12;
- C) количество резисторов одинаково;
- D) вопрос не имеет смысла;
- E) ситуация зависит от размера резисторов.

\$\$\$ 186

Где больше резисторов в диапазоне от 1 кОм до 100 кОм: в коробке с резисторами изготовленными с допуском 5 % или в коробке с резисторами изготовленными с допуском 20%?

- A) в коробке с резисторами с допуском 5%;
- B) в коробке с резисторами с допуском 20%;
- C) количество резисторов одинаково;
- D) вопрос не имеет смысла;
- E) ситуация зависит от размера резисторов.

\$\$\$ 187

Чем вызвана проводимость электрического тока металлами?

- A) наличием свободных электронов;
- B) наличием ионов;

- С) наличием дырок;
- Д) наличием нейтронов;
- Е) магнитным полем Земли.

\$\$\$ 188

Основные переносчики зарядов в жидкостях...

- А) электроны;
- В) протоны;
- С) нейтроны;
- Д) ионы;
- Е) герконы.

\$\$\$ 189

К двум золотым электродам длиной 10 см, расположенным на расстоянии 20 см, подсоединен прибор для измерения сопротивления. Где показания прибора будут минимальными?

- А) в морской воде;
- В) в речной воде;
- С) в спирте;
- Д) в трансформаторном масле;
- Е) в бензине.

\$\$\$ 190

Имеется 2 конденсатора с воздушным диэлектриком. У первого конденсатора расстояние между пластинами в 2 раза больше чем у второго, а остальные параметры конденсаторов одинаковые. Во сколько раз отличается емкость второго конденсатора от первого?

- А) в 4 раза;
- В) не отличается;
- С) в 2 раза;
- Д) в 0,5 раза;
- Е) в 1 раз.

\$\$\$ 191

Имеется 2 конденсатора, один из которых с воздушным диэлектриком, а другой с керамическим диэлектриком с величиной относительной диэлектрической проницаемости равной 2. Остальные параметры конденсаторов одинаковые. Во сколько раз отличается емкость второго конденсатора от первого?

- А) в 4 раза;
- В) не отличается;
- С) в 2 раза;
- Д) в 0,5 раза;
- Е) в 1 раз.

\$\$\$ 192

Имеется 2 конденсатора с воздушным диэлектриком. У первого конденсатора площадь пластин в 2 раза больше чем у второго, а остальные параметры конденсаторов одинаковые. Во сколько раз отличается емкость первого конденсатора от второго?

- А) в 4 раза;
- В) не отличается;
- С) в 2 раза;
- Д) в 0,5 раза;
- Е) в 1 раз.



\$\$\$ 193

Имеется 2 конденсатора с воздушным диэлектриком. У первого конденсатора толщина пластин в 2 раза больше чем у другого, а остальные параметры конденсаторов одинаковые. Во сколько раз отличается емкость первого конденсатора от второго?

- A) в 4 раза;
- B) не отличается;
- C) в 2 раза;
- D) в 0,5 раза;
- E) в 1 раз.

\$\$\$ 194

К источнику питания напряжением 10 В подсоединены два последовательно соединенные диода в обратном включении. Каково напряжение на первом диоде, если обратный ток второго диода в 4 раза больше?

- A) 4 В;
- B) 10 В;
- C) 2 В;
- D) 8 В;
- E) 1 В.

\$\$\$ 195

К источнику питания напряжением 10 В подсоединены два последовательно соединенные диода в обратном включении. Каково напряжение на первом диоде, если обратный ток первого диода в 4 раза больше?

- A) 4 В;
- B) 10 В;
- C) 2 В;
- D) 5 В;
- E) 1 В.

\$\$\$ 196

К источнику питания напряжением 9 В подсоединены три последовательно соединенные диода в обратном включении. Каково напряжение на втором диоде, если обратные токи всех диодов одинаковы?

- A) 4 В;
- B) 10 В;
- C) 2 В;
- D) 3 В;
- E) 1 В.

\$\$\$ 197

К источнику питания напряжением 9 В подсоединены два последовательно соединенные диода в прямом включении и ограничительный резистор, причем первый диод изготовлен на основе германия, а второй диод - на основе кремния. Каково будет распределение напряжений на диодах?

- A) на первом больше, чем на втором;
- B) на втором больше, чем на первом;
- C) напряжения будут одинаковы;
- D) напряжений не будет;
- E) 9 В.

\$\$\$ 198

К источнику питания подсоединены последовательно соединенные диод в прямом включении и ограничительный резистор. Напряжение на диоде составляет величину  $U$ . Как изменится напряжение на диоде при повышении температуры?

- A) увеличится;
- B) останется неизменным;
- C) уменьшится;
- D) напряжения не будет;
- E)  $U$ .

\$\$\$ 199

К источнику питания подсоединены последовательно соединенные диод в прямом включении и ограничительный резистор. Напряжение на диоде составляет величину  $U$ . Как изменится напряжение на резисторе при повышении температуры?

- A) увеличится;
- B) останется неизменным;
- C) уменьшится;
- D) напряжения не будет;
- E)  $U$ .

\$\$\$ 200

К источнику питания подсоединены последовательно соединенные диод в обратном включении и ограничительный резистор. Напряжение на диоде составляет величину  $U$ . Как изменится напряжение на диоде при повышении температуры?

- A) увеличится;
- B) останется неизменным;
- C) уменьшится;
- D) напряжения не будет;
- E)  $U$ .

\$\$\$ 201

К источнику питания подсоединены последовательно соединенные диод в обратном включении и ограничительный резистор. Напряжение на диоде составляет величину  $U$ . Как изменится напряжение на резисторе при повышении температуры?

- A) увеличится;
- B) останется неизменным;
- C) уменьшится;
- D) напряжения не будет;
- E)  $U$ .

\$\$\$ 202

К источнику питания параллельно подсоединены две одинаковые электрические цепи, состоящие из последовательно соединенных диода в обратном включении и ограничительного резистора. Каково напряжение между теми электродами диодов, которые не соединены с источником питания?

- A) равно источнику питания;
- B) равно половине источника питания;
- C) равно четверти источника питания;
- D) напряжения не будет;
- E) равно удвоенной величине напряжения источника питания.

\$\$\$ 203

Полезным эффектом инверсного включения транзистора является:

- A) увеличение коэффициента усиления;

- В) уменьшение коэффициента усиления;
- С) уменьшение напряжения насыщения;
- Д) увеличение напряжения насыщения;
- Е) улучшение охлаждения.

\$\$\$ 204

Схема Дарлингтона позволяет:

- А) увеличить коэффициент усиления транзистора;
- В) уменьшить потребляемый от источника питания ток;
- С) улучшить охлаждение;
- Д) уменьшить коэффициент усиления по току;
- Е) уменьшить напряжение насыщения.

\$\$\$ 205

Операционный усилитель с полевыми транзисторами во входных цепях позволяет:

- А) увеличить стабильность усилителя;
- В) улучшить защиту от статического электричества;
- С) увеличить выходное напряжение;
- Д) увеличить входное сопротивление;
- Е) уменьшить выходное сопротивление.

\$\$\$ 206

Компаратор позволяет:

- А) произвести линейное усиление сигнала;
- В) суммировать напряжения;
- С) перемножать напряжения;
- Д) производить логическую операцию с входными сигналами;
- Е) делить напряжения.

#### Ключи правильных ответов

Номер вопроса	Уровень сложности	Правильный ответ
1	1	В
2	3	В
3	2	А
4	2	А
5	2	А
6	2	В
7	3	С
8	2	Д
9	3	В
10	2	А
11	3	А
12	3	А
13	1	В
14	2	Д
15	2	В
16	1	А
17	2	А
18	2	Е
19	2	А
20	3	С

21	3	D
22	3	D
23	2	B
24	2	D
25	3	D
26	2	A
27	2	B
28	2	D
29	2	C
30	2	A
31	3	A
32	2	D
33	2	D
34	2	D
35	2	B
36	2	A
37	2	B
38	3	D
39	3	D
40	3	A
41	3	B
42	2	C
43	2	C
44	2	A
45	2	A
46	2	A
47	2	B
48	3	B
49	2	A
50	2	A
51	2	C
52	2	B
53	2	D
54	1	A
55	3	C
56	1	D
57	2	B
58	2	C
59	2	C
60	2	D
61	1	B
62	3	B
63	1	B
64	2	B
65	2	B
66	2	A
67	2	B
68	2	C
69	2	D
70	2	C
71	1	B

72	2	B
73	1	A
74	1	C
75	1	D
76	1	C
77	1	A
78	2	D
79	1	D
80	1	B
81	1	D
82	2	C
83	2	B
84	2	D
85	1	C
86	1	D
87	1	C
88	1	B
89	1	A
90	1	D
91	1	C
92	2	D
93	2	E
94	2	B
95	2	D
96	2	C
97	2	A
98	2	D
99	1	D
100	1	A
101	1	C
102	1	B
103	2	A
104	2	C
105	2	C
106	1	C
107	2	C
108	3	C
109	3	E
110	3	C
111	2	D
112	2	B
113	2	D
114	2	D
115	2	C
116	2	D
117	1	A
118	1	D
119	1	B
120	1	C
121	1	B
122	2	B

123	2	B
124	2	C
125	2	E
126	1	C
127	2	C
128	3	B
129	3	C
130	3	C
131	2	E
132	3	C
133	3	B
134	3	C
135	3	B
136	3	B
137	3	A
138	3	C
139	3	E
140	3	D
141	3	D
142	2	E
143	3	B
144	3	D
145	3	C
146	3	D
147	3	B
148	3	A
149	3	C
150	3	E
151	3	E
152	2	E
153	1	C
154	1	D
155	2	A
156	2	C
157	2	A
158	2	A
159	2	A
160	2	B
161	2	C
162	2	A
163	2	A
164	2	E
165	2	E
166	2	C
167	2	E
168	2	E
169	2	D
170	2	E
171	2	C
172	2	E
173	2	A

174	2	C
175	2	A
176	2	A
177	2	B
178	2	A
179	2	E
180	2	C
181	2	E
182	2	E
183	2	D
184	2	E
185	1	A
186	1	A
187	1	A
188	1	D
189	1	A
190	2	C
191	2	C
192	2	C
193	2	B
194	3	D
195	3	C
196	3	D
197	3	B
198	3	C
199	3	A
200	3	C
201	3	A
202	3	D
203	3	C
204	3	A
205	3	D
206	2	D

## **8 Методические указания для выполнения курсового проекта**

### **8.1 Общие положения**

Курсовой проект проекта на тему “Измеритель температуры на интегральных микросхемах” позволяет закрепить и углубить знания по дисциплине “Электроника”, приобрести навыки использования и практического расчета устройств на интегральных микросхемах, познакомиться с элементной базой электроники, получить навыки оформления принципиальных схем и является подтверждением того, что студент умеет применить полученные знания при решении конкретной задачи.

Измеритель температуры предназначен для визуального контроля температуры окружающей среды с выводом текущей информации на стрелочный измерительный прибор с одновременным автоматическим контролем предельно заданной температуры.

В случае превышения предельной температуры устройство должно, в зависимости от варианта задания, выдать соответствующий сигнал на аварийную индикацию или узел отключения и оставаться в зафиксированном состоянии до отключения питания.

## 8.2 Последовательность выполнения курсового проекта

Устройство может иметь следующие составные части:

### 8.2.1 Датчик температуры

В зависимости от варианта в качестве датчика может быть использован :

- **терморезистор полупроводниковый;**

Температурная характеристика такого терморезистора описывается следующим уравнением :

$$R_T = R_N \exp [ B ( 1/T - 1/T_N ) ] ,$$

где  $R_T$  и  $R_N$  - соответственно сопротивления при температурах  $T$  и  $T_N$  ( в градусах Кельвина),  $B = (2000 - 5000) \text{ К}$  - константа материала терморезистора, имеющая размерность К. Величину сопротивления  $R_N$  выбрать самостоятельно по справочным материалам.

- **термопара ;**

Температурной характеристикой такого датчика является величина термо-ЭДС.

В случае термопары из меди и медно-никелевого сплава термо-ЭДС составляет

примерно  $40 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$  относительно температуры контрольного электрода или

аналогичного спая.

- **терморезистор проволоочный;**

Электрическое сопротивление металлических проводников изменяется согласно уравнению

$$R_1 = R_0 [ 1 + \alpha ( T_1 - T_0 ) ],$$

где  $R_0$  - сопротивление при  $0^\circ\text{С}$  (т.е. при 273 К),

$R_1$  - сопротивление при температуре  $T_1$  ,

$\alpha$  - температурный коэффициент , равный для платины  $3,9 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$  и для никеля  $5,39 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$  .

Сопротивление при  $0^\circ\text{С}$  в большинстве случаев выбирается равным 100 Ом.

Такие измерительные резисторы обозначаются Pt-100 или Ni-100.

### 8.2.2 Масштабирующий усилитель

Усилитель служит для преобразования или усиления сигнала с датчика температуры в уровень удобный для дальнейшей обработки.

### 8.2.3 Преобразователь напряжения в ток

Преобразователь служит для вывода информации о измеряемой температуре на стрелочный измерительный прибор.



## **8.2.4 Схема фиксации превышения сигнала температуры ( компаратор )**

### **8.2.5 Выходной каскад**

Каскад служит для согласования с нагрузкой в выходной цепи и выполняется в зависимости от варианта задания.

### **8.2.6 Содержание курсового проекта и порядок его выполнения**

Курсовой проект должен содержать :

- расчет измерительной цепи и действующих в ней сигналов;
- функциональную схему разрабатываемого устройства;
- расчет и принципиальные схемы составных частей устройства;
- выбор и обоснование элементной базы;
- полную принципиальную схему устройства и перечень элементов.

## **8.3 Оформление результатов курсового проектирования**

Курсовой проект должен содержать пояснительную записку, выполненную на листах белой бумаги формата А4, и итоговую электрическую принципиальную схему устройства необходимого формата на белой бумаге (ватмане).

Курсовой проект должен быть выполнен в соответствии с фирменными стандартами системы менеджмента качества:

- СМК ФС Р.4.2.3 – 03.05.2003. Правила оформления учебно-методической документации. Общие требования к текстовым документам.
- СМК ФС Р.4.2.3 – 03.06.2003. Правила оформления учебно-методической документации. Общие требования к графическим документам.
- СМК ФС Р.4.2.3 – 03.04.2003. Правила оформления учебно-методической документации. Основные надписи.

Кроме того, следует учитывать ГОСТ 2.702 - ГОСТ 2.759.

### Исходные данные для расчета

Основные исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Номером варианта является номер фамилии студента по списку в групповом журнале.

Недостающие исходные данные принять самостоятельно.

## **8.4 Рекомендуемая литература**

1. Виглеб Г. Датчики : Пер. с нем. – М.: Мир, 1989 .
2. Осипович Л.А. Датчики физических величин.- М.: Машиностроение, 1979 .
3. Алексенко А.Г. Основы микросхемотехники. Изд. 2-е. М.: Сов.радио,1977 .
4. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы : Справочное пособие/ Под. Ред. С.В. Якубовского.- 2-е. изд. М.: Радио и связь, 1984.
5. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы : Справочник/ Под ред. С.В. Якубовского.- М.: Радио и связь, 1990.
6. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности : Справочник/ Под ред. А.В. Голомедова.- М.: Радио и связь, 1989.
7. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности : Справочник/ Под ред. А.В. Голомедова.- М.: Радио и связь, 1989.

8. Граф Р. Электронные схемы : 1300 примеров : Пер. с англ.- М.: Мир, 1989.  
 9. Игловский И.Г., Владимиров Г.В. Справочник по слаботочным электрическим реле.- 3-е., -Л.: Энергоатомиздат, 1990.

### 8.5 Варианты заданий

Основные исходные данные для расчета приведены в таблице .  
 Номером варианта является номер фамилии студента по списку в групповом журнале.  
 Недостающие исходные данные принять самостоятельно.

Таблица 1 – Основные исходные данные для расчета

N вар	Датчик Температуры.	t <sub>нач.</sub> °С	t <sub>кон.</sub> °С	Ток индикатора мА	Выходная цепь	Примечание
1	Терморезистор п/п	0	40	0,1	светодиод кр.	B=2000 К
2	Терморезистор пров.	5	50	1	реле 220 В	Ni-100
3	Термопара	20	100	5	лампа	
4	Терморезистор п/п	15	55	5	лампа	B=3000 К
5	Терморезистор пров.	0	50	1	реле 27 В	Pt-100
6	Термопара	20	150	0,1	светодиод зел.	
7	Терморезистор п/п	20	60	0.1	светодиод жел.	B=4000 К
8	Терморезистор пров.	10	60	1	лампа	Ni-100
9	Термопара	20	200	5	светодиод кр.	
10	Терморезистор п/п	25	65	1	реле 36 В	B=2000 К
11	Терморезистор пров.	20	100	0,1	лампа	Pt-100
12	Термопара	10	250	0,1	реле 12 В	
13	Терморезистор п/п	30	70	1	светодиод зел.	B=3000 К
14	Терморезистор пров.	10	150	5	лампа	Ni-100
15	Термопара	0	200	1	реле 220 В	
16	Терморезистор п/п	10	75	0,1	светодиод жел.	B=4000 К
17	Терморезистор пров.	0	100	0,1	светодиод кр.	Pt-100
18	Термопара	20	120	1	лампа	
19	Терморезистор п/п	20	70	5	реле 12 В	B=4000 К
20	Терморезистор пров.	20	150	5	реле 36 В	Ni-100
21	Термопара	20	80	1	светодиод зел.	
22	Терморезистор п/п	10	50	0,1	лампа	B=3000 К
23	Терморезистор пров.	- 40	40	0,1	лампа	Pt-100
24	Термопара	20	300	1	реле 36 В	
25	Терморезистор п/п	20	50	5	светодиод кр.	B=2000 К

**Примечание :** в случае технической целесообразности задание может быть уточнено по согласованию с преподавателем.