

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«Амурский государственный университет»**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Основы радиоэлектроники»**

Специальности 010701 – «Физика»

Благовещенск 2012

УМКД разработан: доц. кафедры физики, канд. физ.-мат. наук , Копылова И.Б.

---

И.о. зав. кафедрой \_\_\_\_\_ /И.А.Голубева/

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2002 г.

**СОГЛАСОВАНО:**

Протокол заседания УМС Инженерно-физического факультета

№ \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Председатель УМС \_\_\_\_\_ / В.И. Митрофанова /

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**«Амурский государственный университет»**  
(ФГБОУ ВПО «АмГУ»)

Утверждаю  
Проректор по УР  
Проказин В.В.  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**Основы радиоэлектроники**  
(наименование учебной дисциплины/модуля)

Для специальности 010701.65 – «Физика»  
для специализаций: физическое материаловедение, медицинская физика,  
информационные технологии в образовании и научной деятельности

Квалификация выпускника: физик  
Курс II Семестр IV  
Лекции 54 (час.) Экзамен 4 семестр

Лабораторные занятия 36 (час.)

Самостоятельная работа 33 (час.)  
Общая трудоемкость дисциплины 123 (час.)  
Составитель И.Б. Копылова, канд. физ.-мат. наук, доцент  
(И.О.Ф., должность, ученое звание)

Факультет: инженерно-физический  
Кафедра: физики

Благовещенск. 2012г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования для специальности 010701.65 - «Физика».

Рабочая программа утверждена на заседании кафедры теоретической и экспериментальной физики

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2011г., протокол № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Е.А.Ванина

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета специальности 010701.65 - «физика»

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2011г., протокол № \_\_\_\_\_

Председатель УМСС \_\_\_\_\_ Е.А.Ванина

Рабочая программа переутверждена на заседании кафедры теоретической и экспериментальной физики от \_\_\_\_\_ протокол № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Е.А.Ванина

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2011 г.

СОГЛАСОВАНО

Председатель УМС факультета

В.И. Митрофанова

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2011 г.

СОГЛАСОВАНО

Заведующий выпускающей кафедрой

\_\_\_\_\_ Е.А.Ванина

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2011г.

СОГЛАСОВАНО

Директор научной библиотеки

\_\_\_\_\_ Л.А.Проказина

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2011г.

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

*Целями освоения дисциплины «Основы радиоэлектроники» являются:*

1. Изучение теории сигналов, преобразования сигналов в процессе передачи и приема, анализ сложных сигналов. Усиление, модулирование, генерирование сигналов.
2. Изучение основ цифровой электроники, работы систем последовательностного и комбинационного типа.

*Цель дисциплины:*

Целью изучения дисциплины является ознакомление с теорией и физикой процессов в основных радиоэлектронных устройствах, формирование навыков применения радиоэлектронных устройств в конкретном физическом эксперименте, умения работать с конкретными радиотехническими приборами, монтажа и наладки несложных радиоэлектронных устройств.

*Задачи дисциплины:*

1. Изучить терминологию и символику, которая применяется в радиоэлектронике, методы составления и чтения основных видов электрических схем.
2. Изучить основные положения теории преобразования сигналов.
3. Изучить принцип работы элементов электрических цепей, полупроводниковых приборов, цифровых устройств. Изучить принцип построения и работы усилителей, генераторов, фильтров, детекторов и модуляторов сигналов.
4. Сформировать навыки применения радиоэлектронных устройств в конкретном физическом эксперименте, умения работать с конкретными радиотехническими приборами, монтажа и наладки несложных радиоэлектронных устройств.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:

Дисциплина «Основы радиоэлектроники» входит в цикл ДС Дисциплины специализации. Дисциплина «Основы радиоэлектроники» изучается на основе знаний электричества и магнетизма, теории колебаний, математического анализа.

Для освоения дисциплины необходимо знать: основные законы электричества и магнетизма, теории колебаний, математического анализа, теории цепей, основные понятия физики твердого тела.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1. **Знать:** теоретические основы теории сигналов, преобразования сигналов в процессе передачи и приема; работу основных радиоэлектронных устройств, основные понятия схемотехники.

2. **Уметь:** производить измерения электрических величин с помощью электроизмерительных аналоговых и цифровых приборов, определять параметры радиоэлектронных устройств, самостоятельно разобраться в принципиальной схеме устройств, выполнить несложный монтаж радиоэлектронного устройства.

3. **Владеть:** математическими методами обработки и анализа электрических сигналов; построения простейших схем для усиления, преобразования и генерирования сигналов. Иметь навыки пайки и монтажа несложных радиоэлектронных устройств.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Основы радиоэлектроники»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 136 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы			Формы текущего контроля
		Лекции и (час.)	Лабораторные занятия (час.)	СРС (час.)	
1	<b>Введение</b>	1			
2	<b>Электрические сигналы.</b> Классификация сигналов. Шумы радиоэлектронных устройств. Модуляция сигналов.	5	6	4	Отчеты по выполнению лабораторных работ.
3	<b>Линейные пассивные РЭ цепи.</b> Активные и пассивные элементы цепи. АЧХ и ФЧХ цепей. Колебательный контур. Телеграфные уравнения.	8	6	4	Отчеты по выполнению лабораторных работ. Тест
4	<b>Нелинейные электрические цепи</b> Основы теории полупроводников. Транзисторы, диоды и другие полупроводниковые приборы	10	6	6	Отчеты по выполнению лабораторных работ. Коллоквиум (1-4 темы)
5	<b>Усилители электрических сигналов</b> Элементы теории четырехполюсников Классификация усилителей Обратная связь в усилителях	12	6	7	Отчеты по выполнению лабораторных работ.
6	<b>Генераторы электрических сигналов</b> Условие генерации сигналов. Классификация генераторов, работа генераторов различных типов	4	4	6	Отчеты по выполнению лабораторных работ.
7	<b>Основы цифровой радиоэлектроники</b> Базовые элементы цифровых схем Устройства комбинационного и последовательностного типа	14	8	6	Отчеты по выполнению лабораторных работ.
	<b>Итого</b>	54	36	33	

## **4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ***1. Введение: (1 час)***

Предмет и основные понятия радиоэлектроники. Элементарная база современной РЭ, области применения. Предмет и содержание курса - 1 час.

### ***2. Электрические сигналы. (5 час.)***

Классификация сигналов. Непрерывные и дискретные сигналы. Частотный спектр периодического и непериодического сигналов. Практическая ширина спектра сигнала. Природа шумов в радиоэлектронных устройствах. Тепловой, дробовой и  $1/f$  шум, другие виды шумов. - 3 часа.

Модуляция сигналов, виды модуляции. Амплитудная модуляция, спектральная и векторная характеристики АМ колебаний. Угловая модуляция. Спектр и параметры частотной модуляции. Фазовая модуляция колебаний, прохождение модулируемых колебаний через резонансные цепи. Способы осуществления модуляции гармонических колебаний - 2 час. {Модуляция цифровых сигналов.}

### ***3. Линейные пассивные РЭ цепи. (8 часов)***

Электрические цепи. Активные и пассивные элементы цепи. Линейные цепи с сосредоточенными параметрами. Классический метод анализа. Установившиеся и переходные процессы. Условия квазистационарности. Комплексный метод анализа линейных цепей. Комплексный коэффициент передачи, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики линейных систем. Частотные искажения сигналов в линейной системе. Комплексное сопротивление элементов электрической цепи. Обобщенный закон Ома. Дифференцирующие и интегрирующие цепи. - 4 часа.

Колебательный контур. Вынужденные колебания в последовательном колебательном контуре. Резонанс напряжений. Резонансные характеристики контура. Параллельный колебательный контур. Резонанс токов. Влияние параметров нагрузки на избирательные характеристики контуров. -2 часа.

Линейные цепи с распределенными параметрами. Коаксиальные, полосковые и волноводные линии. Длинные линии. Телеграфные уравнения. Световоды. Отражение волн от неоднородностей в линии. Объемные и квазиоптические резонаторы. - 2 часа.

### ***4. Нелинейные электрические цепи. (10 часов)***

Элементы нелинейных электрических цепей. Полупроводниковые приборы. Полупроводники и их свойства. Основные понятия зонной теории. Электронная и дырочная проводимости. Работа p-n перехода. -2 часа.

Полупроводниковый диод: вольтамперные и вольт-фарадные характеристики диода. Физические и математические модели. Выпрямление переменного сигнала. Однополупериодное, двухполупериодное выпрямление. Сглаживание сигнала. {Импульсные диоды с накоплением заряда. Варикап. Варистор}. - 2 часа.

Биполярный транзистор: принцип работы, схемы включения, модели транзистора с общим эмиттером: режимы работы, характеристики. Работа транзистора в ключевом режиме. - 2 часа.

Полевые транзисторы. МОП (МДП) транзисторы. Устройство, принцип работы, схемы включения, характеристики. Комплементарная пара. - 2 часа.

Прохождение гармонического сигнала через нелинейную цепь. Умножение частоты. Модуляция и детектирование. Амплитудный и частотный детектор. Преобразование частоты. Супергетеродинный приемник. Модуляционный радиометр. - 2 часа.

### **5. Усилители электрических сигналов. (12 часов)**

Четырехполюсники и их классификация. Характеристические параметры и передаточная функция четырехполюсника. Описание свойств активного четырехполюсника с помощью  $z$ ,  $y$  и  $h$  - параметров -2 часа.

Классификация усилителей. Схемы усилителей на биполярном и полевом транзисторе. Принцип усиления, расчет коэффициента усиления. Основные характеристики каскада: динамическая, амплитудно-частотная, фазо-частотная; входное и выходное сопротивление, паразитные параметры. Резонансные усилители, широкополосные усилители, усилители постоянного тока, усилители мощности. Параметрические цепи. Параметрический усилитель. Усилители СВЧ колебаний - 4 часа.

Обратные связи в усилителях. Обратная связь по току и по напряжению. Метод осуществления обратных связей. Влияние ОС на параметры усилителей. Операционный усилитель (ОУ). Преобразование сигналов в схемах на ОУ - дифференцирование, интегрирование, логарифмирование, потенцирование. ОУ в схемах активных фильтров, сумматоров, преобразователей сопротивлений.

Чувствительность усилителей к любому сигналу, эквивалентная шумовая температура усилителя. - 6 часов.

### **6. Генераторы электрических сигналов (4 часа)**

Генераторы. Самовозбуждение усилителей с положительной обратной связью. Генерирование гармонических колебаний. LC и RC - генераторы гармонических колебаний. Баланс амплитуд и фаз, стабильность частоты. Релаксационные генераторы. Генерирование колебаний в УКВ, СВЧ и оптическом диапазонах. Генераторы прямоугольных импульсов. Мультивибраторы. {Одновибраторы}. - 4 часа.

### **7. Основы цифровой радиоэлектроники. (14 часов)**

Цифровые двоичные сигналы. Дискретизация сигналов по времени и уровню. Теорема Котельникова. Основы булевой алгебры - основные теоремы, булевы функции, таблицы истинности. Синтез булевых функций по таблице истинности. - 2 часа.

Базовые логические элементы: НЕ, И, ИЛИ, их физическая реализация. {Базовые логические элементы современных микросхем (ТТЛ, ДТЛ, ИТЛ и др.)} - 2 часа.

Аналогово-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП, ЦАП). - 2 часа.

Триггеры. Триггеры на дискретных элементах. Триггеры на логических элементах. RS - триггеры, T, D, JK - триггеры. - 2 часа.

Комбинационные логические схемы. Сумматоры, шифраторы, мультиплексоры - 2 часа.

Логические схемы последовательного типа. Регистры. Запоминающие регистры. Счетчики. {Декадные.счетчики}. - 2 часа.

Элементы памяти. Обмен информации через общую шину. Магистральные усилители. Архитектура ЭВМ. - (2 часа)

## **5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ**

1. Подготовка к лабораторному практикуму – 15 час.

2. Подготовка к коллоквиуму – 8 час.

3. Изучение тем на самостоятельное изучение:

Модуляция цифровых сигналов – 2 час.

Импульсные диоды с накоплением заряда. Варикап. Варистор - 2 час.

Одновибраторы – 2 час.

Базовые логические элементы современных микросхем (ТТЛ, ДТЛ, ИТЛ и др.) - 2 час.

Декадные.счетчики – 2 час.



4. Подготовка к экзамену.  
Итого по всем разделам –33 час.

### ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ (36 часов).

1. Вводное занятие. Основные элементы радиоэлектронных схем. Маркировка радиоэлектронных элементов. (4 час.)
2. Формирование навыков пайки основных элементов радиоэлектронных схем. (2 час.)
3. Изучение работы пассивных элементов электронных цепей.
4. Изучение работы активных элементов электронных цепей.
5. Изучение работы полупроводникового диода и выпрямителя.
6. Изучение работы биполярных транзисторов.
7. Изучение работы полевых транзисторов.
8. Изучение работы базовых логических схем И, ИЛИ, НЕ.
9. Изучение работы операционного усилителя. (4 часа)
10. Изучение работы LC – генератора.
11. Построение модуляторов электрических сигналов.
12. Изучение работы триггерных схем.
13. Изучение работы АЦП и ЦАП.
14. Изучение работы усилителя на транзисторах.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ И ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА.

1. Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадой, состоящей из 2-3 студентов.
2. Следует учесть, что **подготовка к практикуму** требует немалого времени, поэтому целесообразно **планировать ее заранее!**
3. Для эффективной подготовки к лабораторной работе придерживайтесь следующих правил:
  - Внимательно прочтите описание работы в методическом пособии по лабораторному практикуму;
  - **Оформите шаблон отчета** по данной работе в индивидуальном лабораторном журнале (см. «Схема оформления отчета» в метод. указаниях к практикуму): укажите название, цель работы, изобразите схему установки, электрические схемы выполняются согласно ГОСТ. В пункте «Краткая теория» ответьте письменно на контрольные вопросы. Для этой работы **активно используйте конспекты лекций и учебные пособия.**
  - **Заготовьте формы таблиц**, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в методическом пособии)
4. Перед выполнением эксперимента студент должен пройти собеседование с преподавателем и получить допуск к работе. Для получения допуска студент должен ответить на следующие вопросы:
  - **Какова цель экспериментальной задачи?** Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?
  - **Каков принцип работы экспериментальной установки?** Перечислите основные этапы эксперимента.
5. Получив допуск, выполните эксперимент с соблюдением его методики и правил техники безопасности (см. в метод. пособии пункт «Выполнение работы»). Занесите данные измерений в таблицы вашего отчета. Произведите вычисление искомого параметра (или зависимости). Произведите статистическую обработку измерений. В случае графического представления результатов используйте только масштабную-координатную бумагу форматом 150-200 мм<sup>2</sup>.

6. Запишите результат экспериментального задания, укажите абсолютную и относительную погрешность измерений, сделайте выводы.

7. Для получения зачета студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и защищает его в ходе последующего собеседования.

8. Следует своевременно сдавать выполненные работы: не допускается выполнение следующей работы при наличии двух выполненных, но не сданных работ!

## **ПРАВИЛА**

### **выполнения лабораторного практикума**

1. Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадой, состоящей, как правило, из двух студентов.

2. Перед выполнением эксперимента студент должен пройти собеседование с преподавателем и получить допуск к работе. Для получения допуска следует самостоятельно изучить и законспектировать:

- Теорию изучаемого явления, основные понятия, формулы.

- Принцип работы установки, вывод рабочих формул.

Более подробно требования к подготовке определяются контрольными вопросами.

3. После выполнения эксперимента студент должен получить отметку преподавателя о выполнении работы. Без подписи преподавателя работа не считается выполненной. Не рекомендуется разбирать установку или изменять ее параметры до проверки результатов преподавателем. Одно измерение следует провести в присутствии преподавателя.

4. Для получения зачета студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми расчетами. Оформление результатов работы производится в личном лабораторном журнале студента. Графики выполняются только на масштабной координатной бумаге (миллиметровке) форматом 150x200 мм. Все расчеты должны быть представлены в лабораторном журнале.

5. Если студент не выполнил лабораторную работу, то на следующем занятии он выполняет следующую по графику работу. Пропущенную работу можно выполнить в течение семестра на дежурном практикуме, предварительно получив допуск у преподавателя.

6. Следует своевременно сдавать выполненные работы: не допускается выполнение следующей работы при наличии двух выполненных, но не зачтенных работ.

7. Лабораторный практикум выполняется в соответствии с пособиями:

а) Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств. Копылова И.Б. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т. 2002. - 21с.

б) Лабораторный практикум по радиоэлектронике. Копылова И.Б. Благовещенск: Амурский Гос. Ун-т. 2005. - 80с.

## **6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Проведение занятий в интерактивной форме.

При изучении дисциплины «Основы радиоэлектроники» применяются следующие интерактивные технологии:

1. Метод заданий – тема 3 ;

2. Метод презентации информации темы - темы 2-5.

Лекции проводятся с использованием интерактивной доски и мультимедийного оборудования. Практически каждая лекция сопровождается презентацией нового материала.

Лабораторный практикум включает 14 лабораторных работ. При выполнении работ используются следующие приемы интерактивного обучения: задание студентам для подготовки к выполнению лабораторной работы; обсуждение с преподавателем хода

выполнения работы и полученных результатов; обсуждение теоретических положений, справедливость которых была установлена в процессе выполнения лабораторной работы. В лабораторный практикум включены работы по моделированию радиоэлектронных устройств и изучению их работы.

## **7. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

### **ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНАМ**

1. Электрические сигналы. Классификация.
2. Спектр периодических и непериодических сигналов
3. Последовательность колебаний прямоугольной формы, одиночный импульс прямоугольной формы, скачок напряжения.
4. Интеграл Дюамеля. Представление сигналов различной формы с помощью интеграла Дюамеля.
5. Теорема Котельникова. Дискретизация сигналов по уровню и по времени.
6. Шумы радиоэлектронных устройств. Виды шумов и их характеристики.
7. Модуляция сигналов. Общие положения модуляции сигналов.
8. Амплитудная модуляция. Устройства для амплитудной модуляции. Применение амплитудной модуляции.
9. Частотная и фазовая модуляция. Устройства для фазовой и частотной модуляции. Применение фазовой и частотной модуляции.
10. Электрические цепи. Классификация. Основные характеристики электрических цепей.
11. Элементы электрических цепей, Классификация. Индуктивности. Емкости. Резисторы.
12. Установившиеся и переходные процессы в линейных электрических цепях.
13. Методы анализа линейных электрических цепей. Классический метод. Комплексный метод.
14. Основные характеристики линейных цепей. Коэффициент передачи. Амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики.
15. Дифференцирующие и интегрирующие цепи. Основные схемы. Коэффициент передачи.
16. Вынужденные колебания в последовательном колебательном контуре. Резонанс напряжений.
17. Вынужденные колебания в параллельном колебательном контуре. Резонанс токов.
18. Влияние нагрузки на характеристики контура. Изменение условий резонанса. Передаточные характеристики.
19. Линейные цепи с распределенными параметрами (длинные линии). Классификация, основные параметры.
20. Волновые уравнения длинной линии. Отражение сигнала на конце длинной линии.
21. Телеграфные уравнения.
22. Волноводы и объемные резонаторы. Устройство и применение. Основные характеристики.
23. Нелинейные электрические цепи. Элементы нелинейных цепей.
24. Полупроводники и их свойства. Полупроводниковые приборы.
25. Основные понятия зонной теории. Деление веществ на проводники, полупроводники и диэлектрики.

26. Примесная проводимость полупроводников. Электронная и дырочная проводимость.
27. Работа p-n перехода.
28. Полупроводниковые диоды. Характеристики. Применение диодов (однополупериодное выпрямление, двухполупериодное выпрямление, сглаживание сигнала).
29. Устройство и принцип действия биполярного транзистора. Основные характеристики биполярного транзистора. Схемы включения.
30. Работа биполярного транзистора в ключевом режиме.
31. Работа биполярного транзистора в усилительном режиме. Нагрузочная характеристика.
32. Графоаналитический расчет усилителя на биполярном транзисторе.
33. Полевые транзисторы. Классификация. Характеристики полевого транзистора. Схемы включения.
34. Работа полевого транзистора в ключевом и усилительном режиме.
35. Прохождение гармонического сигнала через нелинейную цепь.
36. Супергетеродинный приемник. Принцип построения и работы супергетеродинного приемника.
37. Преобразование частоты сигнала. Умножение, деление частоты. Принцип и реальные схемы.
38. Классификация четырехполосников. Основные принципы построения четырехполосников.
39. Основы теории четырехполосников. Способы написания основных уравнений четырехполосников, определение параметров четырехполосников.
40. Классификация фильтров. Назначение фильтров. Фильтры типа k. Фильтры типа m.
41. Основные схемы фильтров верхних и нижних частот. Полосовые фильтры. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики.
42. Классификация усилителей. Принципы построения усилительных схем.
43. Основные характеристики усилителей: амплитудочастотная, фазочастотная, входное и выходное сопротивление.
44. Принцип усиления. Расчет коэффициента усиления.
45. Обратная связь. Положительная обратная связь. Отрицательная обратная связь.
46. Обратная связь по напряжению и по току (последовательная и параллельная).
47. Влияние ОС на параметры усилителей.
48. Узкополосные усилители. Особенности, основные схемы и характеристики.
49. Широкополосные усилители. Основные схемы и характеристики.
50. Усилители постоянного тока на биполярных и полевых транзисторах. Принцип работы и характеристики.
51. Дифференциальные усилители. Принцип построения, характеристики.
52. Усилители мощности. Принцип построения, характеристики.
53. Операционные усилители. Принцип виртуального замыкания входа. Принцип построения и характеристики.
54. Преобразование сигналов в схемах с ОУ: интегрирование, дифференцирование, логарифмирование, потенцирование и суммирование сигнала.
55. LC-генератор гармонических колебаний. Схемы и основные характеристики.
56. RC-генератор гармонических колебаний. Схемы и основные характеристики.
57. Баланс амплитуд и фаз. Стабильность частоты в генераторах гармонических колебаний.
58. Релаксационные генераторы. Схемы, основные характеристики.
59. Мультивибраторы. Схемы, основные характеристики.
60. Генераторы пилообразных напряжений. Схемы и основные характеристики.

61. Аналоговые и импульсные сигналы. Основные характеристики импульсных сигналов.
62. Интегральные микросхемы. Основные определения и характеристики.
63. Логические элементы “И”, “ИЛИ”, “НЕ”. Схемы, таблицы истинности.
64. Базовые логические элементы. ИС резисторно-транзисторной (РТЛ) и диодно-транзисторной (ДТЛ) логики.
65. Биполярные технологии. ИС транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), транзисторная логика с эмиттерными связями (ЭСЛ), интегральная инжекционная логика.
66. Типовые комбинационные устройства. Сумматоры. Схема исключаящее “ИЛИ”.
67. Шифраторы. Дешифраторы.
68. Мультиплексоры и демультиплексоры.
69. Типовые последовательностные устройства. РС-триггеры, асинхронные и синхронные.
70. D, T, JK-триггеры. Таблицы истинности.
71. Счетчики. Декадные счетчики. Таблицы истинности.
72. Регистры. Таблицы истинности.
73. Микропроцессоры. Общие принципы построения. Назначение отдельных узлов.
74. Назначение и структура ЭВМ.

### КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

Оценка	Полнота, системность, прочность знаний	Обобщенность знаний
«5»	Изложение полученных знаний в устной, письменной или графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются единичные несущественные ошибки, самостоятельно исправляемые студентами.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений; свободное оперирование известными фактами и сведениями с использованием сведений из других предметов.
«4»	Изложение полученных знаний в устной, письменной и графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются отдельные несущественные ошибки, исправляемые студентами после указания преподавателя на них.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений, в которых могут быть отдельные несущественные ошибки; подтверждение изученного известными фактами и сведениями.
«3»	Изложение полученных знаний неполное, однако это не препятствует усвоению последующего программного –материала; допускаются отдельные существенные ошибки, исправление с помощью преподавателя.	Затруднения при выполнении существенных признаков изученного, при выявлении причинно-следственных связей и формулировке выводов.
«2»	Изложение учебного материала неполное, бессистемное, что препятствует усвоению последующей учебной информации; существенные	Бессистемное выделение случайных признаков изученного; неумение производить простейшие операции анализа и синтеза; делать обобщения,

	ошибки, неисправляемые даже с помощью преподавателя.	выводы.
«1»	Полное незнание и непонимание учебного материала (студент не может ответить ни на один поставленный вопрос).	

**Зачет и экзамен** – итоговая аттестация по дисциплине. Оценка (зачет) по этим видам контроля складывается из текущей работы студента в семестре, промежуточного контроля, самостоятельной работы и ответа на экзамене (зачете) (40% - промежуточный контроль знаний студентов, 60% - результаты итогового зачета (экзамена)).

Кафедра имеет право перераспределить это соотношение до 10%.

**Промежуточный контроль** – осуществляется два раза в семестр в виде контрольных точек. Преподаватель проверяет знания студентов в виде контрольных работ, тестов и др. по блоку изученной дисциплины. Фиксируется в журналах успеваемости, находящихся в деканатах.

Результаты учитываются при допуске к сдаче зачета или экзамена.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Основы радиоэлектроники»

### а) основная литература:

1. Лачин В.И. Электроника : учеб. пособие : рек. УМО/ В. И. Лачин, Н. С. Савелов. -6-е изд., перераб. и доп.. -Ростов н/Д: Феникс, 2007.-704 с. :а-рис.. -(Высшее образование). - Библиогр. : с. 697 .
2. Прянишников В.А. Электроника : полный курс лекций/ В. А. Прянишников. -7-е изд.. - СПб.: Корона-Век, 2010.-415 с. :а-ил..
3. Першин В.Т. Основы современной радиоэлектроники : учеб. пособие/ В. Т. Першин. - Ростов н/Д: Феникс, 2009.-542 с. :а-рис.. -(Высшее образование). -Библиогр. : с. 537 .

### б) дополнительная литература:

1. Твердотельная электроника : учеб. пособие : рек. УМО/ Э. Н. Воронков [и др.]. -М.: Академия, 2009.-320 с.. -(Высшее проф. образование. Радиоэлектроника). -Библиогр. : с. 315.
2. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника : учеб. : доп. Мин. обр. РФ/ В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. -5-е изд., стер.. -М.: Высш. шк., 2008.-799 с. :а-ил.. -(Для высших учебных заведений). -Библиогр. : с. 786.
3. Джонс М.Х. Электроника - практический курс : пер. с англ./ М. Х. Джонс. -2-е изд., испр. . -М.: Техносфера, 2006.-511 с. :а-рис.. -(Мир электроники). -На корешке: VII-22. - Библиогр.: с. 498 .
4. Хоровиц П. Искусство схемотехники : моногр./ П. Хоровиц, У. Хилл ; пер. с англ. Б. Н. Бронин. -5-е изд., перераб.. -М.: Мир, 1998.-704 с..
5. Бобровников Л.З. Электроника : учеб.: доп. Мин. обр. РФ/ Л. З. Бобровников. -5-е изд., перераб. и доп.. -СПб.: Питер, 2004.-558 с. :а-рис.. -(Учебник для вузов). -Предм. указ.: с. 552. - Библиогр.: с. 557.
6. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи : Учеб.: рек. Мин. обр. РФ/ В.И. Нефедов. -2-е изд., перераб. и доп.. -М.: Высш. шк., 2002.-511 с. :z-рис.. -Библиогр.: с. 499.
7. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : Учебник: рек. Мин. обр. РФ/ С.И. Баскаков. -4-е изд., перераб. и доп.. -М.: Высш. шк., 2003.-464 с. :z-рис.. -Библиогр.: с. 457-458.

### в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://ru.wikipedia.org">http://ru.wikipedia.org</a>	Интернет-энциклопедия образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочники, а также статьи различной тематики. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам, отраслям знания.
2	Электронная библиотечная система « <b>Университетская библиотека-online</b> » <a href="http://www.biblioclub.ru">http://www.biblioclub.ru</a>	ЭБС по тематике охватывает всю область естественнонаучных знаний и предназначена для использования в процессе обучения в высшей школе как преподавателями, так и студентами.
3	<b>Единое окно</b> доступа к образовательным ресурсам <a href="http://window.edu.ru/window/library">window.edu.ru/window/library</a>	Раздел «математика и естественнонаучное образование» содержит большой перечень учебников и учебно-методических пособий по всем разделам курса молекулярной физики и термодинамики.
4	Электронный информационный ресурс АРБИКОН ( <a href="http://arbicon.ru">http://arbicon.ru</a> ).	Содержит разветвленную сеть ссылок на разнообразные образовательные ресурсы в российском интернете.
6	Электронный ресурс МАРС ( <a href="http://mars.arbicon.ru">http://mars.arbicon.ru</a> ).	Электронная система доставки документов. Позволяет найти нужный документ и получить его по электронной почте.
7	<a href="http://uisrussia.msu.ru/is4/main.jsp">http://uisrussia.msu.ru/is4/main.jsp</a> .	Университетская информационная система России. Обеспечивает просмотр материалов по изучаемым предметам, разработанных в других вузах.

## 9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Основы радиоэлектроники»

### Оборудование

1. Интерактивная доска, мультимедийное оборудование в аудитории.
2. Видеопроектор Epson.
3. Цветной телевизор ABEST, 2003 г.
4. Ноутбук Пентиум 100, 2003 г., компьютер Celeron-03
5. Компьютер Пентиум-4шт.+Виртуальная лаб.по радиоэлектронике Electronik WorkBench.
6. Лабораторные установки:
  - 6.1 Универсальный лаб.стенд НТК ФИЗЭКС-Зраб.м.
  - 6.2 Лабораторные установки, изготовленные ИТЦ АмГУ.
  - 6.3 Универсальный лаб.стенд «Сигнал-1»

## ПЛАН - КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

### *Введение*

Предмет и основные понятия радиоэлектроники. Элементарная база современной РЭ, области применения. Предмет и содержание курса.

Исторический аспект развития системы связи и передачи информации: появление радио, радиотехника, электроника, микроэлектроника, вычислительная техника, наноэлектроника.

Понятие информации и ее основные параметры. Понятие сигнала. Информационные системы: симплексные, дуплексные, полудуплексные. Классификация информационных систем: системы радиовещания, радиолокационные системы, радионавигационные системы, системы радиотелеуправления, мобильные системы подвижной связи, системы цветного и цифрового телевидения.

Современная элементная база радиоэлектроники основана на применении полупроводниковых приборов. В настоящее время полупроводниковые приборы изготавливаются как на основе природных полупроводников, так и на основе синтезированных полупроводников.

### *Электрические сигналы.*

Классификация сигналов. Непрерывные и дискретные сигналы. Частотный спектр периодического и непериодического сигналов. Практическая ширина спектра сигнала. Природа шумов в радиоэлектронных устройствах. Тепловой, дробовой и  $1/f$  шум, другие виды шумов. - 3 часа.

Модуляция сигналов, виды модуляции. Амплитудная модуляция, спектральная и векторная характеристики АМ колебаний. Угловая модуляция. Спектр и параметры частотной модуляции. Фазовая модуляция колебаний, прохождение модулируемых колебаний через резонансные цепи. Способы осуществления модуляции гармонических колебаний - 2 часа. {Модуляция цифровых сигналов.}

Сигнал - это любой физический носитель сообщения. Электрические и неэлектрические сигналы; полезные и мешающие (помехи) сигналы. Аналоговые и дискретные (цифровые) сигналы. Понятия периодического и непериодического сигналов; детерминированного (регулярного) и недетерминированного (случайного или нерегулярного) сигнала, стационарного и нестационарного сигнала.

Временной и частотный (спектральный) способ представления сигнала. Прямое и обратное преобразование Фурье. Представление спектра периодического сигнала: расчет коэффициентов ряда Фурье. Понятие ширины спектра. Динамический диапазон сигнала. Спектр непериодического сигнала: периодическая последовательность колебаний прямоугольной формы; одиночный импульс прямоугольной формы. Спектры неинтегрируемых сигналов: понятие дельта-функции и ее спектр, основные свойства дельта-функции; спектр единичной функции (скачок напряжения). Отклик системы на единичную ступеньку и единичный импульс, понятия переходной и импульсной характеристики. Интеграл Дюамеля.

Шумы и помехи радиоэлектронной аппаратуры. Классификация помех: сосредоточенные по спектру, импульсные, флуктуационные помехи. Шумы: тепловой шум, избыточный шум. Способы устранения шумов.

### Классификация сигналов.

Передача сигналов неэлектрической природы, сигналов низкой частоты. Понятие модуляции сигналов. Амплитудная модуляция (АМ) – изменение амплитуды сигнала по закону модулирующего колебания. Угловая модуляция: изменение фазы (ФМ) или частоты (ЧМ). Суммарно-разностный метод модуляции (полярная модуляция) для создания стереоэффекта. Понятие поднесущей частоты. Виды импульсной модуляции (манипуляции): амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ), частотно-импульсная (ЧИМ), импульсно-кодовая ИКМ.

Простейшие модуляторы и демодуляторы сигналов.

### *Линейные пассивные РЭ цепи.*



Понятия: электрическая цепь, линейные и нелинейные цепи, элементы цепей, активные и пассивные элементы цепей, понятие эквивалентных схем.

Цепи с сосредоточенными параметрами. Прохождение переменного тока через элементы электрических цепей: резистор, индуктивность, емкость. Векторные диаграммы тока и напряжения на этих элементах. Мощность цепи переменного тока.

Установившиеся и переходные режимы работы. Законы коммутации.

Методы анализа линейных цепей с сосредоточенными параметрами: классический, комплексный. Основные параметры цепи: коэффициент передачи, амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики цепи. Коэффициенты передачи тока и напряжения в цепи. Основные свойства линейных цепей.

Дифференцирующие и интегрирующие цепи, основные схемы, коэффициенты передачи, АЧХ и ФЧХ. Применение дифференцирующих и интегрирующих цепей.

Колебательные контуры являются наиболее распространенными избирательными схемами радиоэлектроники.

Последовательный колебательный контур. Вынужденные колебания в последовательном колебательном контуре. Полное сопротивление контура. Построение векторной диаграммы и вычисление условий резонанса в последовательном колебательном контуре. Резонанс напряжений. Волновое или характеристическое сопротивление контура. Добротность контура. Понятие расстройки контура. Резонансные характеристики контура. АЧХ и ФЧХ контура.

Параллельный колебательный контур. Разновидности схем контуров. Построение векторной диаграммы и вычисление условий резонанса в параллельном колебательном контуре, понятие сопротивления контура при резонансе. Резонанс токов. Резонансные характеристики контура. АЧХ и ФЧХ контура. Влияние нагрузки на избирательные характеристики контура.

Линейные цепи с распределенными параметрами. Основные понятия. Виды длинных линий: двухпроводные, коаксиальные линии, волноводы и полосковые линии.

Однородные длинные линии без потерь. Вывод основных уравнений длинной линии. Отражение волн на конце линии с нагрузкой и без нагрузки. Понятие коэффициента отражения. Амплитуда тока и напряжения на конце линии. Стоячие волны в линии. Коэффициент стоячей волны.

Реальные длинные линии (линии с потерями). Вывод телеграфных уравнений. Коэффициент затухания и коэффициент фазы волны.

Основные принципы построения волноводов, расчет параметров. Возбуждение электромагнитных волн в волноводах. Объемные резонаторы.

### ***Нелинейные электрические цепи.***

Понятие нелинейных электрических цепей. Основные элементы нелинейных цепей. Классификация: безинерционные и инерционные. Активные элементы.

Элементы зонной теории. Некоторые сведения о строении атома. Состояние электрона в атоме, решение уравнения Шредингера для электрона в атоме. Принцип Паули.

Образование кристалла, объединение атомов, расщепление энергетических уровней в энергетические зоны. Заполнение зон. Понятие запрещенных и разрешенных зон. Понятие подуровня и расстояние между уровнями в энергетической зоне. Разделение твердых тел на проводники, диэлектрики, полупроводники. Валентная зона. Зона проводимости. Ширина запрещенной зоны и энергия активации.

Полупроводники. Основные свойства полупроводников. Собственная проводимость полупроводников. Примесная проводимость полупроводников. Доноры и акцепторы.

Соединение полупроводников с различным видом проводимости. P-n – переход. Физические процессы, протекающие при образовании p-n – перехода. Работа p-n – перехода при приложении внешнего электрического поля.

Полупроводниковый диод. Классификация диодов, области применения. Вольтамперная характеристика диода. Возникновение барьерной емкости диода, вольфарадная характеристика диода. Виды пробоя в диоде.

Выпрямление переменного тока: однополупериодное выпрямление, двухполупериодное выпрямление, сглаживание сигнала (получение постоянного тока).

Диоды специального назначения: стабилитроны, импульсные диоды, варикапы, варисторы, тиристоры, фотодиоды, светодиоды.

Биполярные транзисторы. Устройство, принцип работы и условные обозначения биполярных транзисторов. Работа биполярного транзистора. Эквивалентная схема транзистора, математическая модель транзистора. Основные характеристики транзистора: входная (зависимость тока базы от напряжения между эмиттером и базой); выходная (зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером), управляющая (зависимость тока коллектора от тока базы); коэффициенты усиления по току и по напряжению. Основные схемы включения и особенности их работы. Работа транзистора в ключевом и усилительном режимах.

Полевой (униполярный) транзистор. Устройство, принцип работы и условные обозначения полевых транзисторов. Классификация полевых транзисторов: транзисторы с управляющим электродом, транзисторы со встроенным каналом, транзисторы с инжектированным каналом. Понятие и МОП (МДП) технологиях. Работа полевого транзистора. Основные характеристики транзистора: входная (зависимость тока стока от напряжения между затвором и стоком); выходная (зависимость тока стока от напряжения между стоком и истоком); коэффициенты усиления по току и по напряжению. Основные схемы включения и особенности их работы. Работа полевого транзистора в ключевом и усилительном режимах. Ключ на МОП транзисторах.

Прохождение гармонического сигнала через нелинейную цепь. Зависимость выходного сигнала от выбора рабочей точки активного элемента. Сопротивление цепи активного элемента, дифференциальное сопротивление. Появление в выходном сигнале гармоник с частотами кратными входному сигналу.

Преобразование частоты. Сложение и вычитание частот, умножение, деление частоты. Способы преобразования частоты: создание биений; изменение коэффициента передачи. Использование дополнительного генератора (гетеродина).

Супергетеродинный приемник, блок-схема, принцип работы, преобразование частоты, повышение помехоустойчивости.

### ***Усилители электрических сигналов.***

Четырехполюсники, основные понятия теории четырехполюсников. Классификация четырехполюсников. Эквивалентные схемы четырехполюсников, переход от соединения «звездой» к соединению «треугольником» и наоборот. Основы теории четырехполюсников. Входные и выходные параметры. Уравнения четырехполюсников, связывающие входные и выходные параметры. Смысл коэффициентов уравнений теории четырехполюсников, их взаимосвязь. Характеристическое сопротивление и коэффициент распространения.

Фильтры. Классификация фильтров. Фильтры типа k, основные схемы, фильтры нижних и верхних частот, расчет частоты. Фильтры типа m, фильтры нижних и верхних частот, основные схемы, расчет частоты. Полосовой фильтр, фильтры с параллельными и последовательными колебательными контурами. АЧХ и ФЧХ фильтров.

Усилители электрических сигналов. Классификация усилителей: по роду усиливаемой величины, по характеру усиливаемого тока, по форме усиливаемого сигнала. Коэффициент усиления, АЧХ и ФЧХ усилителя, входное и выходное сопротивления

усилителя, паразитные параметры усилителя. Понятие годографа, оценка устойчивости усилителя. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя. Коэффициент мощности. Коэффициент нелинейных искажений. Коэффициент шума. Динамический диапазон усилителя. Чувствительность усилителя.

Графоаналитический расчет усилителя. Расчет усилителей на биполярном и полевом транзисторах с использованием теории четырехполюсников и основных характеристик транзисторов.

Обратная связь в усилителях. Понятие обратной связи, глубина обратной связи, модуль и фаза обратной связи. Положительная (ПОС) и отрицательная (ООС) обратная связь. Основные свойства ПОС и ООС, комплексно-положительная и комплексно-отрицательная обратная связь. Расчет коэффициента усиления усилителя при наличии ПОС и ООС. Последовательная и параллельная обратная связь по току и по напряжению. Влияние ОС на параметры усилителей: изменение коэффициента передачи, уменьшение времени запаздывания гармоник, уменьшение помех в канале усилителя. Диаграмма Найквиста.

Некоторые специальные усилители. Узкополосные (избирательные) усилители: резонансные усилители, усилители с  $RC$  фильтрами. Усилители с последовательными и параллельными колебательными контурами. Понятие добротности контуров усилителей, расчет добротности контуров усилителей. Резонансные усилители.

Широкополосные усилители. Особенности схем широкополосных усилителей. Видеоусилители.

Усилители постоянного тока (слабо меняющихся сигналов). Особенности схем усилителей постоянного тока: отсутствие реактивных элементов, дрейф нуля и способы его устранения. Однотактные и двухтактные усилители постоянного тока (УПТ), балансные усилители, УПТ с модуляцией. Дифференциальные (разностные) усилители, схема, коэффициент усиления, режимы работы.

Усилители мощности. Режимы работы усилителей и их особенности, выбор режима работы в соответствии с выбором рабочей точки транзистора. Коэффициент полезного действия усилителя мощности. Коэффициенты использования коллекторного тока и коллекторного напряжения в различных режимах работы. Расчет схем усилителей мощности в различных режимах работы. Оценка нелинейных искажений в схемах.

Операционные усилители (ОУ) (УПТ с дифференциальным входом и однотактным выходом). Входное и выходное сопротивление усилителя, принцип виртуального замыкания. Коэффициент передачи усилителя с обязательной ООС. Решающие схемы на операционных усилителях: инвертор, не инвертирующий усилитель, преобразование источника тока в источник напряжения, интегрирование сигнала, дифференцирование сигнала, логарифмирование сигнала, потенцирование сигнала, активные фильтры на ОУ, сумматоры на ОУ, простейший цифроаналоговый преобразователь.

### ***Генераторы электрических сигналов***

Основные понятия теории создания генераторных схем. Восстановление потерь энергии в генераторе, понятие отрицательного сопротивления, роль ПОС для создания генераторов незатухающих сигналов. Классификация генераторов.

Генераторы синусоидальных колебаний.  $LC$  и  $RC$  генераторы. Баланс фаз и баланс амплитуд. Условия стабильности частоты. Кварцевые резонаторы. Генераторы низкочастотных колебаний. Мост Вина, коэффициент передачи моста Вина.

Релаксационные генераторы (генераторы со 100% ПОС). Классификация релаксационных генераторов. Блокинг-генераторы. Работа блокинг-генератора в режимах самовозбуждения и ждущем режиме. Период колебаний и длительность импульсов.

Мультивибраторы – генераторы, работающие в режиме переключения. Режим самовозбуждения, ждущий режим. Период колебаний. Одновибраторы. Схемы

мультивибраторов и одновибраторов на транзисторах и цифровых интегральных элементах.

Генератор пилообразных напряжений.

### ***Основы цифровой радиоэлектроники.***

Цифровые двоичные сигналы. Реальный импульс. Основные параметры импульса. Понятие о логическом нуле (0), логической единице (1). Высокопотенциальная (положительная) и низкопотенциальная (отрицательная) логика.

Дискретизация сигналов. Теорема Котельникова. Дискретизация сигналов по времени и уровню. Шаг дискретизации. Кодирование информации.

Основы булевой алгебры - основные теоремы, булевы функции, таблицы истинности. Синтез булевых функций по таблице истинности. Базовые логические элементы: НЕ, И, ИЛИ, их физическая реализация. Базовые логические элементы современных микросхем (ТТЛ, ДТЛ, ИТЛ и др.).

Аналогово-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП, ЦАП).

Комбинационные логические схемы. Элемент Шеффера (ИЛИ-НЕ). Элемент Пирса (И-НЕ).

Сумматоры. Сумматор по модулю 2 (ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ). Полусумматор по модулю 2. Полный сумматор. Таблицы истинности. Шифраторы (кодеры). Дешифраторы (декодеры). Таблицы истинности.

Мультиплексоры - преобразователи параллельных кодов в последовательные. Демультимплексоры - преобразователи последовательных кодов в параллельные.

Преобразователи кодов. Сравнивающие устройства. Арифметическо-логическое устройство (АЛУ).

Логические схемы последовательностного типа. Триггеры. Триггеры на дискретных элементах (транзисторах). Основы работы триггеров, формирование устойчивых состояний.

Триггеры на логических элементах. RS - триггеры, асинхронные и синхронные, таблицы истинности. T- триггер – счетный триггер, D- триггер – триггер задержки, JK – триггер – универсальный триггер. Режимы работы JK – триггера, создание RS, D, T- триггеров на основе JK – триггера.

Регистры. Запоминающие регистры, регистры хранения, регистры сдвига. Разрядность регистров. Регистры с параллельным, последовательным и параллельно-последовательным алгоритмом записи информации.

Счетчики. Счетчики с параллельным и последовательным переносом. Суммирующие, вычитающие, реверсивные счетчики. Декадные счетчики. Распределители импульсов, классификация.

Интегральные микросхемы, основные определения. Характеристики интегральных микросхем.

Элементы памяти. Элементы памяти на КМОП – транзисторах. Запоминающие устройства. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) . Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ). Обмен информации через общую шину. Магистральные усилители.

Назначение ЭВМ. Архитектура ЭВМ. Микропроцессоры. Структурная схема микропроцессора.

### **ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ (36 часов).**

1. Вводное занятие. Основные элементы радиоэлектронных схем. Маркировка радиоэлектронных элементов. (4 час.)
2. Формирование навыков пайки основных элементов радиоэлектронных схем. (2 час.)
3. Изучение работы пассивных элементов электронных цепей.

4. Изучение работы активных элементов электронных цепей.
5. Изучение работы полупроводникового диода и выпрямителя.
6. Изучение работы биполярных транзисторов.
7. Изучение работы полевых транзисторов.
8. Изучение работы базовых логических схем И, ИЛИ, НЕ.
9. Изучение работы операционного усилителя. (4 часа)
10. Изучение работы LC – генератора.
11. Построение модуляторов электрических сигналов.
12. Изучение работы триггерных схем.
13. Изучение работы АЦП и ЦАП.
15. Изучение работы усилителя на транзисторах.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ И ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА.**

1. Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадой, состоящей из 2-3 студентов.
2. Следует учесть, что **подготовка к практикуму** требует немалого времени, поэтому целесообразно **планировать ее заранее!**
3. Для эффективной подготовки к лабораторной работе придерживайтесь следующих правил:
  4. Внимательно прочтите описание работы в методическом пособии по лабораторному практикуму;
  5. **Оформите шаблон отчета** по данной работе в индивидуальном лабораторном журнале (см. «Схема оформления отчета» в метод. указаниях к практикуму): укажите название, цель работы, изобразите схему установки, электрические схемы выполняются согласно ГОСТ. В пункте «Краткая теория» ответьте письменно на контрольные вопросы. Для этой работы **активно используйте конспекты лекций и учебные пособия.**
  6. **Заготовьте формы таблиц**, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в методическом пособии)
  7. Перед выполнением эксперимента студент должен пройти собеседование с преподавателем и получить допуск к работе. Для получения допуска студент должен ответить на следующие вопросы:
    8. **Какова цель экспериментальной задачи?** Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?
    9. **Каков принцип работы экспериментальной установки?** Перечислите основные этапы эксперимента.
    10. Получив допуск, выполните эксперимент с соблюдением его методики и правил техники безопасности (см. в метод. пособии пункт «Выполнение работы»). Занесите данные измерений в таблицы вашего отчета. Произведите вычисление искомого параметра (или зависимости). Произведите статистическую обработку измерений. В случае графического представления результатов используйте только масштабную координатную бумагу форматом 150-200 мм<sup>2</sup>.
    11. Запишите результат экспериментального задания, укажите абсолютную и относительную погрешность измерений, сделайте выводы.
    12. **Для получения зачета** студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и защищает его в ходе последующего собеседования.

13. **Следует своевременно сдавать выполненные работы:** не допускается выполнение следующей работы при наличии двух выполненных, но не сданных работ!

## **ПРАВИЛА**

### **выполнения лабораторного практикума**

1. Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадой, состоящей, как правило, из двух студентов.

2. Перед выполнением эксперимента студент должен пройти собеседование с преподавателем и получить допуск к работе. Для получения допуска следует самостоятельно изучить и законспектировать:

-Теорию изучаемого явления, основные понятия, формулы.

-Принцип работы установки, вывод рабочих формул.

Более подробно требования к подготовке определяются контрольными вопросами.

3. После выполнения эксперимента студент должен получить отметку преподавателя о выполнении работы. Без подписи преподавателя работа не считается выполненной. Не рекомендуется разбирать установку или изменять ее параметры до проверки результатов преподавателем. Одно измерение следует провести в присутствии преподавателя.

4. Для получения зачета студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми расчетами. Оформление результатов работы производится в личном лабораторном журнале студента. Графики выполняются только на масштабной координатной бумаге (миллиметровке) форматом 150x200 мм. Все расчеты должны быть представлены в лабораторном журнале.

5. Если студент не выполнил лабораторную работу, то на следующем занятии он выполняет следующую по графику работу. Пропущенную работу можно выполнить в течение семестра на дежурном практикуме, предварительно получив допуск у преподавателя.

6. Следует своевременно сдавать выполненные работы: не допускается выполнение следующей работы при наличии двух выполненных, но не зачтенных работ.

7. Лабораторный практикум выполняется в соответствии с пособиями:

а) Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств. Копылова И.Б. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т. 2002. - 21с.

б) Лабораторный практикум по радиоэлектронике. Копылова И.Б. Благовещенск: Амурский Гос. Ун-т. 2005. - 80с.

### **Схема оформления отчета**

#### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №.X-XX.**

#### **НАИМЕНОВАНИЕ РАБОТЫ**

ЦЕЛЬ:.....

ОБОРУДОВАНИЕ:.....

*ОСНОВЫ ТЕОРИИ*

(Ответы на контрольные вопросы).....

*СХЕМА УСТАНОВКИ*

*РАБОЧИЕ ФОРМУЛЫ*

*РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ*


*РАСЧЕТЫ*

(следует привести все расчеты )

*РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ*

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

1. Электрические сигналы. Классификация.
2. Спектр периодических и непериодических сигналов
3. Последовательность колебаний прямоугольной формы, одиночный импульс прямоугольной формы, скачок напряжения.
4. Интеграл Дюамеля. Представление сигналов различной формы с помощью интеграла Дюамеля.
5. Теорема Котельникова. Дискретизация сигналов по уровню и по времени.
6. Шумы радиоэлектронных устройств. Виды шумов и их характеристики.
7. Модуляция сигналов. Общие положения модуляции сигналов.
8. Амплитудная модуляция. Устройства для амплитудной модуляции. Применение амплитудной модуляции.
9. Частотная и фазовая модуляция. Устройства для фазовой и частотной модуляции. Применение фазовой и частотной модуляции.
10. Электрические цепи. Классификация. Основные характеристики электрических цепей.
11. Элементы электрических цепей, Классификация. Индуктивности. Емкости. Резисторы.
12. Установившиеся и переходные процессы в линейных электрических цепях.
13. Методы анализа линейных электрических цепей. Классический метод. Комплексный метод.
14. Основные характеристики линейных цепей. Коэффициент передачи. Амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики.
15. Дифференцирующие и интегрирующие цепи. Основные схемы. Коэффициент передачи.
16. Вынужденные колебания в последовательном колебательном контуре. Резонанс напряжений.
17. Вынужденные колебания в параллельном колебательном контуре. Резонанс токов.
18. Влияние нагрузки на характеристики контура. Изменение условий резонанса. Передаточные характеристики.
19. Линейные цепи с распределенными параметрами (длинные линии). Классификация, основные параметры.
20. Волновые уравнения длинной линии. Отражение сигнала на конце длинной линии.
21. Телеграфные уравнения.
22. Волноводы и объемные резонаторы. Устройство и применение. Основные характеристики.
23. Нелинейные электрические цепи. Элементы нелинейных цепей.
24. Полупроводники и их свойства. Полупроводниковые приборы.
25. Основные понятия зонной теории. Деление веществ на проводники, полупроводники и диэлектрики.
26. Примесная проводимость полупроводников. Электронная и дырочная проводимость.
27. Работа p-n перехода.
28. Полупроводниковые диоды. Характеристики. Применение диодов (однополупериодное выпрямление, двухполупериодное выпрямление, сглаживание сигнала).
29. Устройство и принцип действия биполярного транзистора. Основные характеристики биполярного транзистора. Схемы включения.
30. Работа биполярного транзистора в ключевом режиме.



31. Работа биполярного транзистора в усилительном режиме. Нагрузочная характеристика.
32. Графоаналитический расчет усилителя на биполярном транзисторе.
33. Полевые транзисторы. Классификация. Характеристики полевого транзистора. Схемы включения.
34. Работа полевого транзистора в ключевом и усилительном режиме.
35. Прохождение гармонического сигнала через нелинейную цепь.
36. Супергетеродинный приемник. Принцип построения и работы супергетеродинного приемника.
37. Преобразование частоты сигнала. Умножение, деление частоты. Принцип и реальные схемы.
38. Классификация четырехполосников. Основные принципы построения четырехполосников.
39. Основы теории четырехполосников. Способы написания основных уравнений четырехполосников, определение параметров четырехполосников.
40. Классификация фильтров. Назначение фильтров. Фильтры типа  $k$ . Фильтры типа  $m$ .
41. Основные схемы фильтров верхних и нижних частот. Полосовые фильтры. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики.
42. Классификация усилителей. Принципы построения усилительных схем.
43. Основные характеристики усилителей: амплитудочастотная, фазочастотная, входное и выходное сопротивление.
44. Принцип усиления. Расчет коэффициента усиления.
45. Обратная связь. Положительная обратная связь. Отрицательная обратная связь.
46. Обратная связь по напряжению и по току (последовательная и параллельная).
47. Влияние ОС на параметры усилителей.
48. Узкополосные усилители. Особенности, основные схемы и характеристики.
49. Широкополосные усилители. Основные схемы и характеристики.
50. Усилители постоянного тока на биполярных и полевых транзисторах. Принцип работы и характеристики.
51. Дифференциальные усилители. Принцип построения, характеристики.
52. Усилители мощности. Принцип построения, характеристики.
53. Операционные усилители. Принцип виртуального замыкания входа. Принцип построения и характеристики.
54. Преобразование сигналов в схемах с ОУ: интегрирование, дифференцирование, логарифмирование, потенцирование и суммирование сигнала.
55. LC-генератор гармонических колебаний. Схемы и основные характеристики.
56. RC-генератор гармонических колебаний. Схемы и основные характеристики.
57. Баланс амплитуд и фаз. Стабильность частоты в генераторах гармонических колебаний.
58. Релаксационные генераторы. Схемы, основные характеристики.
59. Мультивибраторы. Схемы, основные характеристики.
60. Генераторы пилообразных напряжений. Схемы и основные характеристики.
61. Аналоговые и импульсные сигналы. Основные характеристики импульсных сигналов.
62. Интегральные микросхемы. Основные определения и характеристики.
63. Логические элементы "И", "ИЛИ", "НЕ". Схемы, таблицы истинности.
64. Базовые логические элементы. ИС резисторно-транзисторной (РТЛ) и диодно-транзисторной (ДТЛ) логики.
65. Биполярные технологии. ИС транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), транзисторная логика с эмиттерными связями (ЭСЛ), интегральная инжекционная логика.

- 66. Типовые комбинационные устройства. Сумматоры. Схема исключающее “ИЛИ”.
- 67. Шифраторы. Дешифраторы.
- 68. Мультиплексоры и демультимплексоры.
- 69. Типовые последовательностные устройства. РС-триггеры, асинхронные и синхронные.
- 70. D, T, JK-триггеры. Таблицы истинности.
- 71. Счетчики. Декадные счетчики. Таблицы истинности.
- 72. Регистры. Таблицы истинности.
- 73. Микропроцессоры. Общие принципы построения. Назначение отдельных узлов.
- 74. Назначение и структура ЭВМ.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ

АмГУ

Утверждено на заседании кафедры  
"\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 г.

Кафедра ТиЭФ  
Факультет ИФ

Заведующий кафедрой

Курс 2

Утверждаю:

Дисц. Основы Радиоэлектроники.

#### БИЛЕТ № 1

- 1. Электрические сигналы, частотная и временная форма представления сигнала.
- 2. Усилители электрических сигналов. Основные характеристики усилителей. Режим работы.

#### БИЛЕТ № 2

- 1. Периодические и непериодические сигналы. Спектры периодических и непериодических сигналов.
- 2. Генераторы. Основные принципы построения генераторов. Генераторы синусоидальных колебаний. Баланс фаз, баланс амплитуд.

#### БИЛЕТ № 3

- 1. Последовательность прямоугольных импульсов. Основные характеристики. Меандр.
- 2. Релаксационные генераторы. Генерирование колебаний в УКВ и СВЧ диапазона.

#### БИЛЕТ № 4

- 1. Реакция системы на входные сигналы. Одиночный импульс. Интеграл Дюамеля. Передаточная функция.
- 2. Фильтры. Классификация. Фильтры k и m типов. Частотные характеристики фильтров.

#### БИЛЕТ № 5

- 1. Модуляция сигналов. Основные принципы модуляции сигналов. Амплитудная модуляция.
- 2. Типовые последовательностные устройства. Синхронные и асинхронные РС-триггеры. Таблицы истинности.

#### БИЛЕТ № 6

- 1. Модуляция сигналов. Частотная и фазовая модуляция сигналов.

2. Типовые комбинационные устройства и схема “Исключающее ИЛИ”. Сумматор.

#### БИЛЕТ № 7

1. Линейные цепи. Основные определения. Амплитудочастотные и фазочастотные характеристики линейных цепей.

2. RC и LC генераторы. Схемы и принцип работы.

#### БИЛЕТ № 8

1. Дифференцирующие и интегрирующие цепи. Частотные характеристики цепей.

2. Основы вычислительной техники. Схемы одноступенчатой логики “И”, “ИЛИ”, “НЕ”. Таблицы истинности.

#### БИЛЕТ № 9

1. Последовательный колебательный контур. Резонанс напряжений. Резонансные характеристики контура.

2. Четырехполюсники. Классификация. Основы теории четырехполюсников.

#### БИЛЕТ № 10

1. Параллельный колебательный контур. Резонанс токов. Резонансные характеристики контура.

2. Узкополосные усилители с RC фильтрами.

#### БИЛЕТ № 11

1. Длинные линии. Волновое уравнение длинной линии. Отражение волн на конце линии.

2. Супергетеродинный приемник. Особенности работы.

#### БИЛЕТ № 12

1. Пассивные линии с сосредоточенными параметрами. Резисторы. Конденсаторы. Индуктивности.

2. Дискретизация по уровню и по времени. Теорема Котельникова. Кодирование сигналов.

#### БИЛЕТ № 13

1. Реальные длинные цепи. Телеграфные уравнения.

2. Обратная связь в усилителях. ПОС и ООС и ее свойства, области применения.

#### БИЛЕТ № 14

1. Нелинейные электрические цепи. Элементы нелинейных цепей. Вольтамперные характеристики нелинейных элементов.

2. Расчет усилителя на биполярном транзисторе с использованием характеристик транзистора и теории четырехполюсников.

#### БИЛЕТ № 15

1. Полупроводники. Особенности проводимости. Объяснение проводимости полупроводников с точки зрения зонной теории.

2. Операционные усилители. Особенности их работы. Логарифмирование, интегрирование, дифференцирование сигнала.

#### БИЛЕТ № 16

1. Полупроводники. Примесная и собственная проводимость полупроводников.
2. Широкополосные усилители. Усилители мощности, режимы работы, особенности.

#### БИЛЕТ № 17

1. Физические основы образования р-п перехода. Работа р-п перехода при приложении внешнего поля.
2. Операционные усилители. Активные фильтры. Сумматоры. Преобразование сопротивлений.

#### БИЛЕТ № 18

1. Полупроводниковый диод. Выпрямление переменного сигнала (однополупериодное, двухполупериодное). Сглаживание переменного сигнала.
2. ОС в усилителях ОС по напряжению и по току (параллельная и последовательная).

#### БИЛЕТ № 19

1. Биполярные транзисторы. Основы работы биполярного транзистора. Характеристики. Схемы включения.
2. Типовые последовательностные схемы. Триггеры. Триггеры D, T, JK. Таблица истинности.

#### БИЛЕТ № 20

1. Работа биполярного транзистора в ключевом и усилительном режиме.
2. Модуляция сигналов. Частотная и фазовая модуляция сигналов.

#### БИЛЕТ № 21

1. Усилитель на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером. Способы стабилизации рабочей точки. Температурная стабилизация усилителя.
2. Счетчики импульсов. Регистры. Таблицы истинности.

#### БИЛЕТ № 22

1. Усилитель постоянного тока. Основные характеристики и особенности построения схем. Дифференциальный усилитель. Особенности работы.
2. Элементы памяти. Принцип организации памяти, ОЗУ, ПЗУ.

#### БИЛЕТ № 23

1. Полевые транзисторы. Принцип работы полевых транзисторов. Классификация, основные характеристики.
2. Интегральные микросхемы. Основные определения и характеристики.

#### БИЛЕТ № 24

1. Прохождение гармонического сигнала через нелинейную цепь.

2. Триггер на биполярных транзисторах. Особенности формирования выходных сигналов. Работа триггера в режиме разделенного запуска.

## КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ

### ВАРИАНТ № 1

1. Какой сигнал является гармоническим?
2. Что такое дискретизация сигнала по уровню? Пояснить рисунком.
3. Параллельный колебательный контур. Резонанс тонов. Векторная диаграмма.
4. Дырочная и электронная проводимость полупроводников. Объяснить с точки зрения зонной теории.
5. Обратная связь. Виды обратной связи. Назначение ОС.
6. Изобразить схему простейшего усилителя на транзисторе.
7. RS-триггер. Схема, таблица.

### ВАРИАНТ № 2

1. Что такое спектр сигнала?
2. Что такое дискретизация сигнала по времени. Пояснить рисунком.
3. Последовательный колебательный контур. Резонанс напряжений. Векторная диаграмма.
4. Образование и работа p-n-перехода.
5. Какие бывают фильтры? Для чего используются фильтры?
6. Изобразить схему простейшего генератора.
7. Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Таблица истинности.

### ВАРИАНТ № 3

1. Что собой представляет непериодический сигнал?
2. Теорема Котельникова (теорема о дискретизации сигнала).
3. Привести простейшие схемы дифференцирующих и интегрирующих цепей.
4. Полупроводниковый диод. Работа, вольт-амперная характеристика, применение (одна из схем).
5. Что такое четырехполюсник? Основные характеристики (перечислить).
6. Изобразить схему простейшего мультивибратора.
7. Логический элемент «ИЛИ», схема, таблица истинности.

### ВАРИАНТ № 4

1. Дать понятие периодического сигнала.
2. Что такое модуляция сигнала?
3. Нелинейные электрические цепи. Элементы нелинейных цепей.
4. Биполярный транзистор. Виды транзисторов, основные характеристики. Работа.
5. Особенности операционного усилителя. Для создания каких устройств он используется?
6. Изобразить блок схему супергетеродинного приемника.
7. Логический элемент «И», схема, таблица истинности

### ВАРИАНТ № 5

1. Что такое меандр?
2. Виды модуляции сигнала. Пояснить рисунком один из видов модуляции.
3. Линейные электрические цепи. Основные элементы цепей. Векторные диаграммы.
4. Полевые транзисторы. Виды транзисторов, основные характеристики. Работа.

5. С какой целью используются усилители? Какие бывают усилители?
6. Изобразить схему простейшего триггера.
7. Логический элемент «НЕ» – схема, таблица истинности.

### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

Оценка	Полнота, системность, прочность знаний	Обобщенность знаний
«5»	Изложение полученных знаний в устной, письменной или графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются единичные несущественные ошибки, самостоятельно исправляемые студентами.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений; свободное оперирование известными фактами и сведениями с использованием сведений из других предметов.
«4»	Изложение полученных знаний в устной, письменной и графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются отдельные несущественные ошибки, исправляемые студентами после указания преподавателя на них.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений, в которых могут быть отдельные несущественные ошибки; подтверждение изученного известными фактами и сведениями.
«3»	Изложение полученных знаний неполное, однако это не препятствует усвоению последующего программного –материала; допускаются отдельные существенные ошибки, исправление с помощью преподавателя.	Затруднения при выполнении существенных признаков изученного, при выявлении причинно-следственных связей и формулировке выводов.
«2»	Изложение учебного материала неполное, бессистемное, что препятствует усвоению последующей учебной информации; существенные ошибки, неисправляемые даже с помощью преподавателя.	Бессистемное выделение случайных признаков изученного; неумение производить простейшие операции анализа и синтеза; делать обобщения, выводы.
«1»	Полное незнание и непонимание учебного материала (студент не может ответить ни на один поставленный вопрос).	

**Зачет и экзамен** – итоговая аттестация по дисциплине. Оценка (зачет) по этим видам контроля складывается из текущей работы студента в семестре, промежуточного контроля, самостоятельной работы и ответа на экзамене (зачете) (40% - промежуточный контроль знаний студентов, 60% - результаты итогового зачета (экзамена)).

Кафедра имеет право перераспределить это соотношение до 10%.

**Промежуточный контроль** – осуществляется два раза в семестр в виде контрольных точек. Преподаватель проверяет знания студентов в виде контрольных работ, тестов и др. по блоку изученной дисциплины. Фиксируется в журналах успеваемости, находящихся в деканатах.

Результаты учитываются при допуске к сдаче зачета или экзамена.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1  
Министерство образования и науки Российской Федерации  
Амурский государственный университет

(ГОУВПО «АмГУ»)

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**  
Методические указания для студентов специальности 01.04.00 – физика

Благовещенск  
2005

Лабораторный практикум по радиоэлектронике

Копылова И.Б. Благовещенск: Амурский Гос. Ун-т. 2005. - 80с.

Составитель: канд. физ.-мат. наук

Копылова И.Б.

Содержит описание 7 лабораторных работ по дисциплине «Основы радиоэлектроники».

Для студентов специальности 01.04.00 – физика.

Рецензент: док. физ.-мат. наук, профессор

Барышников С.В.

Амурский государственный университет, 2005



## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение. Основы теории и работа полупроводниковых приборов.	36
2. Работа 1. Изучение работы полупроводникового диода и выпрямителя.	42
3. Работа 2. Изучение работы биполярного транзистора	50
4. Работа 3 Изучение работы полевых транзисторов.	59
5. Работа 4. Изучение работы операционного усилителя.	67
6. Работа 5. Изучение работы базовых логических элементов.	76
7. Работа 6.Изучение работы триггеров.	83
8. Работа 7. Изучение принципов построения и работы АЦП и ЦАП.	89
9. Список литературы	89

### **Основы теории и работа полупроводниковых приборов.**

С точки зрения способности проводить электрический ток все вещества можно разделить на проводники (вещества, которые хорошо проводят электрический ток), диэлектрики (изоляторы, вещества, в которых электрический ток невозможен), полупроводники (занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками).

Отличительной особенностью полупроводников является увеличение проводимости при увеличении температуры и при наличии примеси, в то время как у проводников проводимость падает. Объяснение этого факта с точки зрения электронной теории проводимости невозможно.

Для объяснения свойства проводимости была создана зонная теория, которая основана на современной теории строения вещества.

В каждом атоме электроны могут вращаться только по строго заданным орбитам, имеющим определенные значения энергий.

Состояние электрона в атоме описывается определенным набором четырех квантовых чисел ( $n$ -главное квантовое число, определяет энергию орбиты;  $l$ -орбитальное квантовое число, определяет ориентацию орбиты,  $m$ -магнитное квантовое число – определяет ориентацию собственного магнитного момента атома). Одинаковое значение всех трех чисел может иметь только два электрона согласно принципу Паули. Четвертое квантовое число (спин) для электрона может принимать только два значения  $\pm 1/2$ .

В кристалле энергия валентных электронов (электронов на внешнем энергетическом уровне, которые ответственны за реакционную способность атома, а также определяют вид химической связи атомов в веществе) изменяется квазинепрерывно. Это означает, что спектр энергий валентных электронов представляет собой множество дискретных близкорасположенных уровней. Если предположить, что валентные электроны могут свободно перемещаться по решетке, то они будут двигаться в периодическом поле решетки. Это приводит к тому, что спектр возможных значений энергий электронов распадается на ряд запрещенных и разрешенных зон.

При соединении  $N$  атомов в кристалле каждый энергетический уровень распадается на зону, состоящую из  $N$  близкорасположенных подуровней, настолько близких, что их энергия отличается на величину порядка  $10^{-23}$  эВ.

Наиболее сложному расщеплению подвергаются электроны внешних энергетических уровней.

За проводимость отвечают электроны, способные оторваться от собственного атома, поэтому электрическая зона, в которой они находятся, называется свободной или зоной проводимости. Зона, в которой располагаются валентные электроны – валентной. Для того чтобы перейти из валентной зоны в свободную зону, электрон должен преодолеть запрещенную зону, т.е. такой переход требует некоторых энергетических затрат.

С точки зрения зонной теории все вещества подразделяются на три класса: проводники, полупроводники, диэлектрики. На рис.1 представлена схема расположения основных зон в веществе.



Рис.1.

У металлов ширина запрещенной  $\Delta E$  зоны составляет доли электронвольта (эВ), либо зоны проводимости и валентная перекрываются. У полупроводников  $\Delta E$  порядка 1-3 эВ, у диэлектриков свыше 3 эВ.

К полупроводникам относятся элементы IV группы таблицы Менделеева, наиболее распространенные – германий и кремний. В настоящее время создан значительный ряд полупроводников представляющих собой более сложные соединения нескольких элементов (например, арсенид галлия).

Рассмотрим возникновение собственной проводимости в полупроводниках. В германии и кремнии каждый атом связан с другими ковалентной (парноэлектронной) связью (рис.2). В результате теплового движения один из электронов может покинуть свою связь. На его месте образуется условно положительный заряд, который называется дыркой. Чем выше температура, тем больше электронно-дырочных пар в полупроводнике.

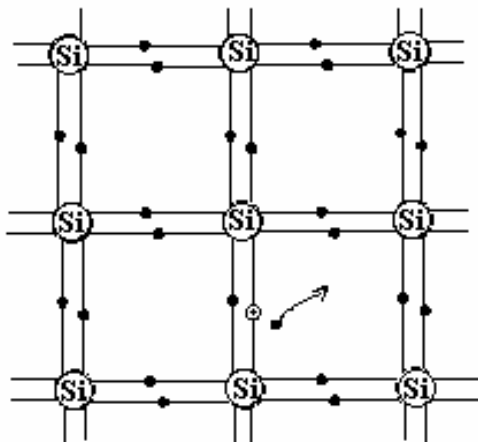


Рис.2

Электропроводность полупроводников определяется соотношением

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

$\Delta E$  – ширина запрещенной зоны;

$kT$  – энергия теплового движения

$\sigma_0$  – величина, которая изменяется значительно медленнее, чем экспонента и ее можно считать константой.

Концентрация электронов ( $n$ ) и дырок ( $p$ ) в собственном полупроводнике одинакова  $n_n = n_p$ .

При перемещении электронов по кристаллу возможно и восстановление ковалентной связи. Этот процесс называется рекомбинацией, при этом носители зарядов «исчезают».

Рассмотрим процесс возникновения проводимости при наличии в полупроводниках примесей. Если в полупроводник ввести элементы V группы (например, в германий ввести фосфор), то 4 электрона фосфора образуют ковалентные связи с германием. Пятый электрон оказывается слабо связанным с атомом фосфора и может стать свободным при получении небольшой энергии порядка энергии теплового движения.

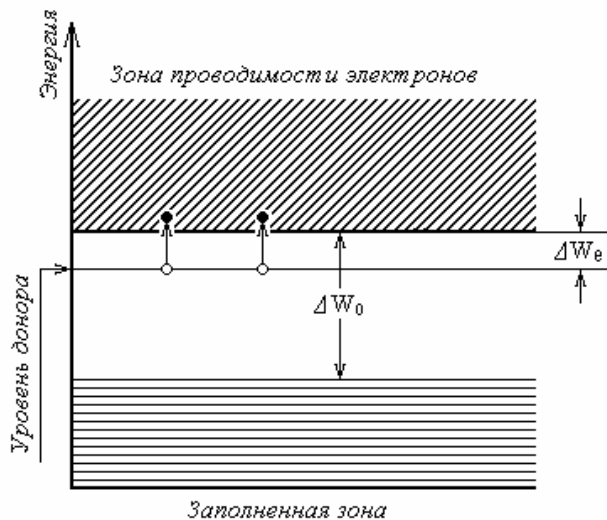


Рис.3

Такой вид проводимости называется электронным, а полупроводники называют полупроводниками n-типа (рис. 3,4).

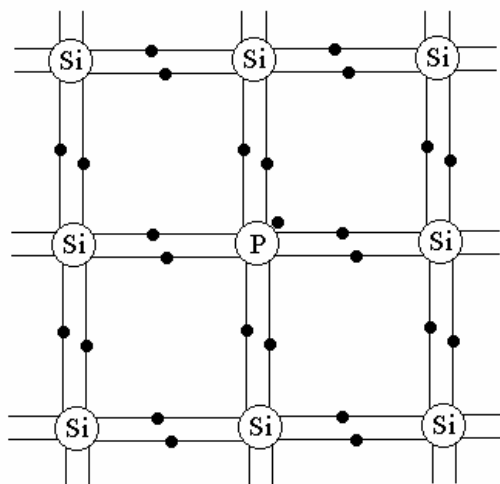


Рис.4

Если в полупроводник ввести элемент 3 группы таблицы Менделеева, то три электрона образуют ковалентные связи, а четвертая связь останется незаполненной, т.е. образуется дырка. Такой вид проводимости называется дырочным (p-типа).

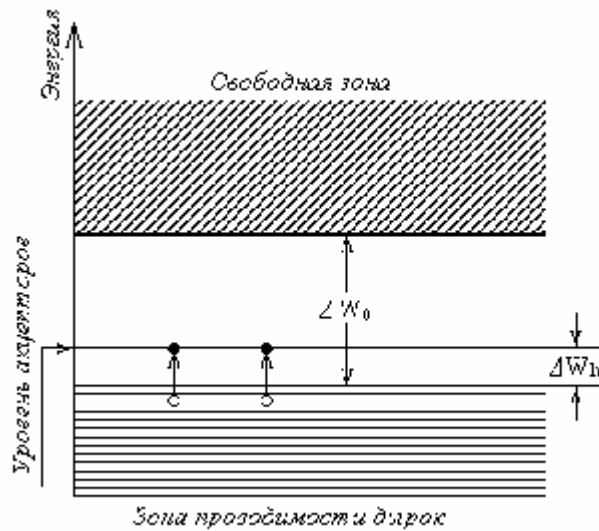


Рис. 5

С точки зрения зонной теории увеличение проводимости можно объяснить возникновением в зоне проводимости дополнительного примесного уровня. В случае проводимости n-типа дополнительный уровень возникает ближе к дну зоны проводимости (рис. 3). Поэтому небольшая энергия требуется для перевода электрона в зону проводимости. Такой уровень называется донорным, а примесь – донором (рис.4).

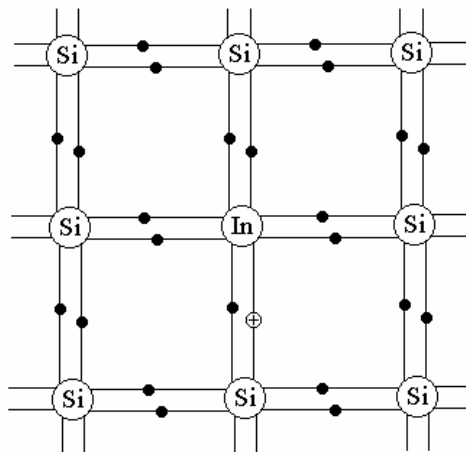


Рис.6.

Если возникает проводимость р-типа, то дополнительный уровень образуется вблизи потолка зоны валентной (рис.5).

Электроны из валентной зоны переходят на дополнительный уровень, образуя в валентной зоне дырку. Такой уровень называется акцепторным, а примесь акцептором.

### ***Работа p-n – перехода.***

В основе устройства любого полупроводникового прибора лежит p-n – переход.

Рассмотрим два полупроводника с различным типом проводимости, соединенные вместе в единую структуру (p-n – переход) рис.7.

В полупроводнике р-типа основными носителями являются дырки. В полупроводнике n-типа – электроны. Эти носители являются основными. В то же время в полупроводниках р-типа присутствует незначительное количество электронов, а в n-типа – дырок, которые являются не основными носителями. Различная концентрация носителей по обе стороны перехода приводит к

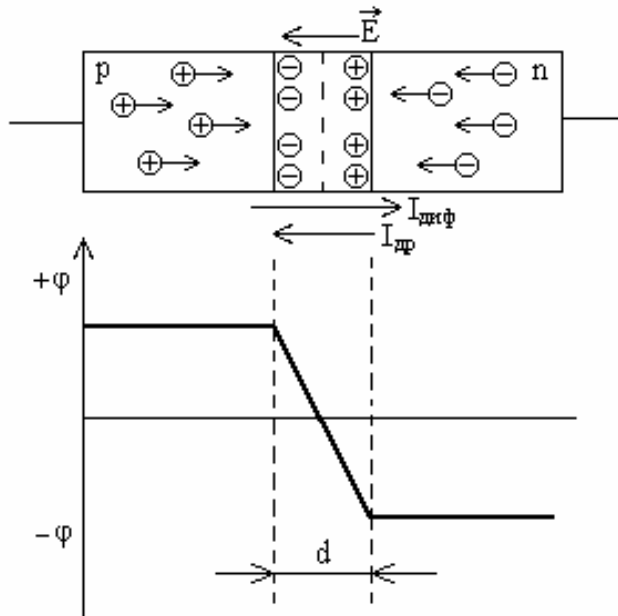


Рис.7.

диффузии основных носителей через переход: дырки движутся в n-область, электроны – в p-область.

Таким образом, через переход начинает течь ток диффузии  $I_{диф}$ . На границе перехода происходит и рекомбинация носителей. Вероятность этого процесса на границе наиболее высока. Рекомбинация приводит к уменьшению концентрации носителей на границе, что в свою очередь приводит к уменьшению скорости движения носителей. В результате по обе стороны перехода выстраиваются заряды различного знака. Это приводит к замедлению процесса диффузии и образованию на границе p-n-перехода двойного электрического слоя и внутреннего электрического поля  $E_{вн}$ , которое препятствует дальнейшей диффузии основных носителей. Наличие внутреннего поля способствует движению не основных носителей через переход: электроны из p-области, и дырки из n-области дрейфуют через переход, создавая ток дрейфа  $I_{др}$ . Дрейфовый ток значительно меньше, чем диффузионный, т.к. концентрация не основных носителей значительно меньше концентрации основных.

Суммарный ток, протекающий через переход равен сумме токов.

$$I = I_{диф} - I_{др}$$

Образование двойного электрического слоя и внутреннего поля  $E_{вн}$  приводит к выравниванию токов основных и не основных носителей  $I_{диф} = I_{др}$  и, таким образом, ток через переход будет равен нулю.

Весь процесс протекает в доли секунды. Поведение p-n-перехода теперь будет зависеть от внешних условий и, прежде всего, от наличия внешнего электрического поля.

Если к p-области подключить положительный полюс источника питания, а к n-области – отрицательный, то появляется внешнее поле, которое направлено навстречу внутреннему полю и уменьшает внутреннее поле. Ток основных носителей через переход возрастает. А двойной электрический слой уменьшается (рис.8).

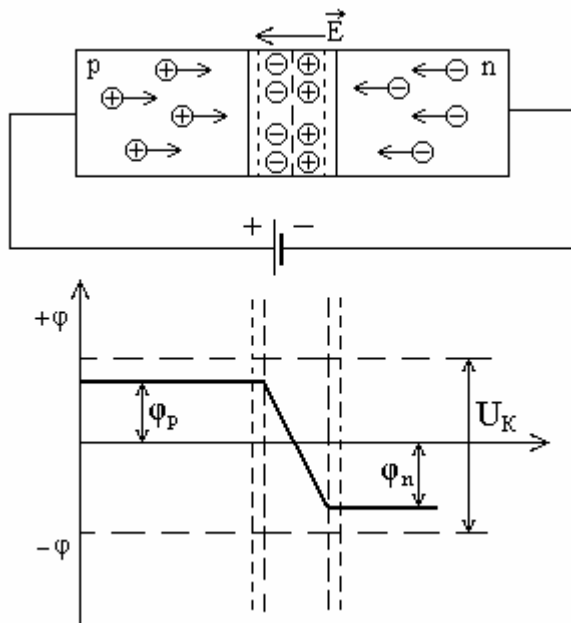


Рис.8.

Обратное включение приводит к уменьшению тока основных носителей и возрастанию дрейфового тока. Двойной электрический слой расширяется (рис.9).

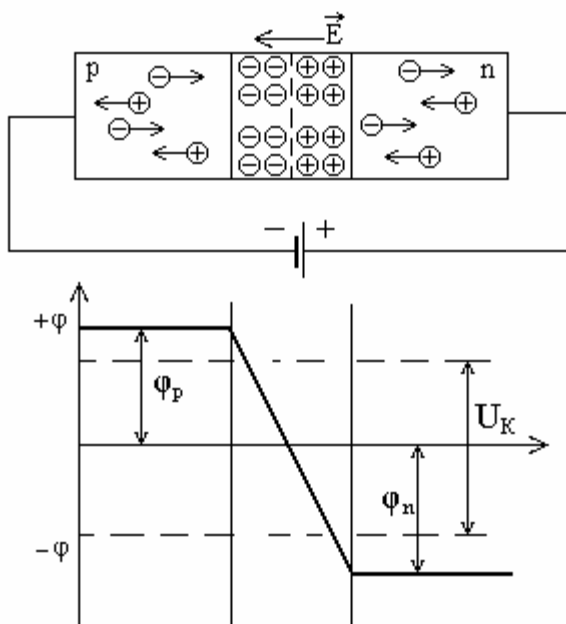


Рис.9.

Таким образом p-n-переход обладает односторонней проводимостью при наличии внешнего электрического поля. Именно это свойство перехода и используется при создании полупроводниковых приборов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА И ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Изучить работу р-п-перехода.  
2. Снять вольтамперную характеристику диода.  
3. Изучить работу различных схем выпрямителя переменного тока.

**ПРИБОРЫ:** универсальный лабораторный стенд, осциллограф, вольтметр, сменная плата.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В основе работы полупроводникового диода лежит работа р-п перехода. Свойство перехода проводить электрический ток только в одном направлении позволяет использовать их в качестве выпрямителей переменного тока.

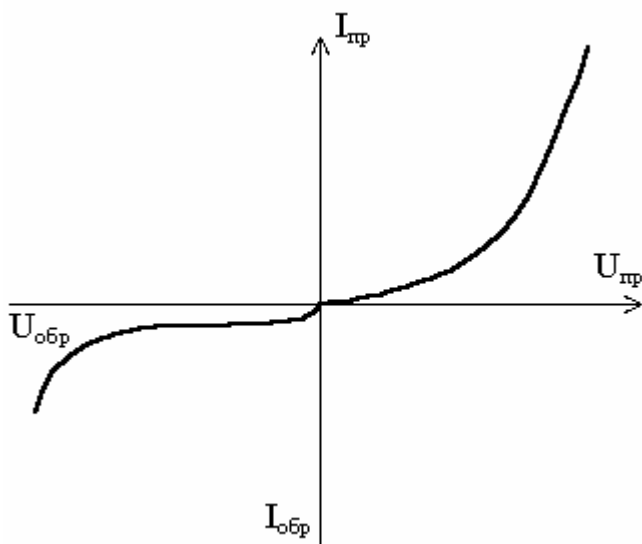


Рис. 1.

На рисунке 1 приведена вольтамперная характеристика диода. Прямая ветвь характеристики получена для напряжений  $U_{пр}$  порядка десятков вольт, обратная ветвь получается при напряжении  $U_{об}$  порядка сотен вольт. Это означает, что диод хорошо проводит электрический ток в прямом направлении при достаточно низких значениях напряжения, пробой же диода происходит при достаточно высоком обратном (приложенном к закрытому переходу) напряжении, для различных типов диодов это напряжение составляет сотни и даже тысячи вольт.

#### ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Способность диода проводить электрический ток только в одном направлении используется для создания выпрямителей переменного тока. Простейшая схема выпрямителя переменного тока показана на рисунке 2.

Данная схема предназначена для однополупериодного выпрямления переменного тока. Рассмотрим работу схемы. С вторичной обмотки трансформатора на вход схемы подается



переменное напряжение  $U_2$  (рис. 3). При подаче на вход диода переменного напряжения положительной

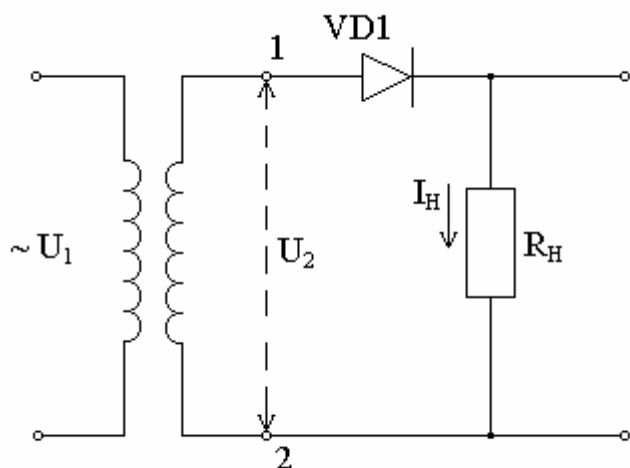


Рис. 2.

полярности, зажим  $T_1$  (точка 1 на схеме) будет положителен по отношению к зажиму  $T_2$  (точка 2 на схеме). Во время этого полупериода напряжение, подаваемое на диод, является прямым, и через диод проходит ток, создающий на нагрузочном резисторе падение напряжения  $U_H$ . В течение следующего полупериода входное напряжение отрицательно, потенциал зажима  $T_1$  отрицательный, а зажима  $T_2$  - положительный. Такое напряжение для диода является обратным, тока через диод почти нет, и напряжение на нагрузочном резисторе будет равно нулю  $U_H = 0$ .

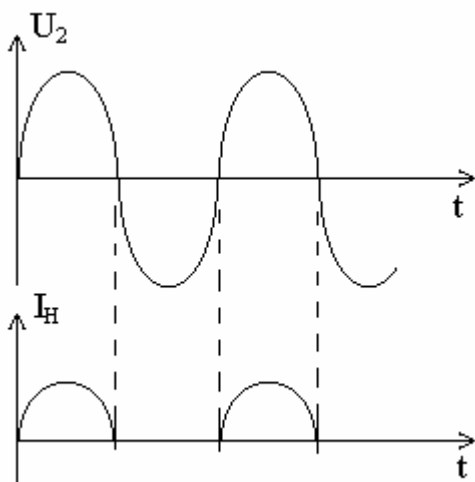


Рис. 3.

Таким образом, через диод и нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длительность которых равна половине периода переменного входного напряжения, пауза между импульсами также равна половине периода.

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя, схема которого показана на рис. 4. В отличие от предыдущей схемы в схему включены два диода  $VD1$  и  $VD2$ , на которые от вторичной обмотки трансформатора подается переменное напряжение.

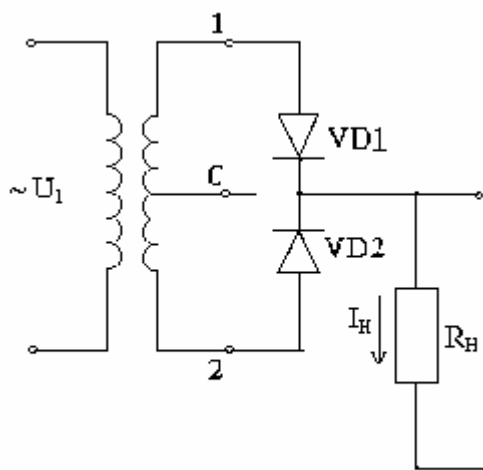


Рис. 4.

Два выпрямляющих диода имеют общую точку, с которой снимается выпрямленное напряжение. Когда между верхним выводом  $T1$  вторичной обмотки и средней точкой  $Tc$  действует положительная полуволна переменного напряжения (см. рис. 4), то ток будет протекать через диод  $VD1$ , в то время как диод  $VD2$  будет заперт. Когда же между нижним выводом обмотки  $T2$  и средней точкой  $Tc$  действует положительная полуволна напряжения, диод  $VD1$  закрыт, а диод  $VD2$  проводит ток, протекающий в направлении от нижнего вывода  $T2$  вторичной обмотки через цепь нагрузки и замыкает, через общий провод. В отличие от схемы на рисунке 2 на выходе схемы с двумя диодами сигнал присутствует и в первый и во второй полупериод (рисунок 5), что делает эту схему более экономичной.

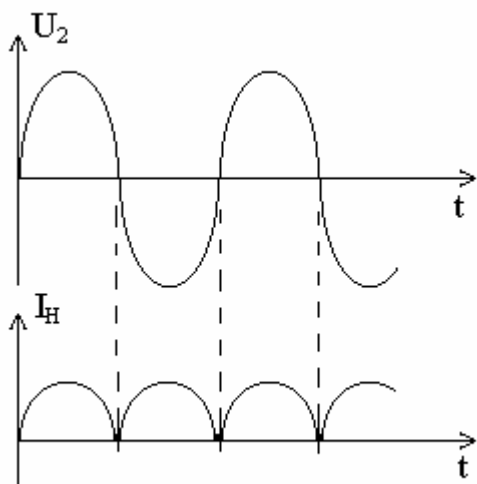


Рис.5.

Наиболее распространенной для создания выпрямителей переменного тока является мостовая схема. Мостовая схема применяется для двухполупериодного выпрямления переменного тока (рисунок 6).

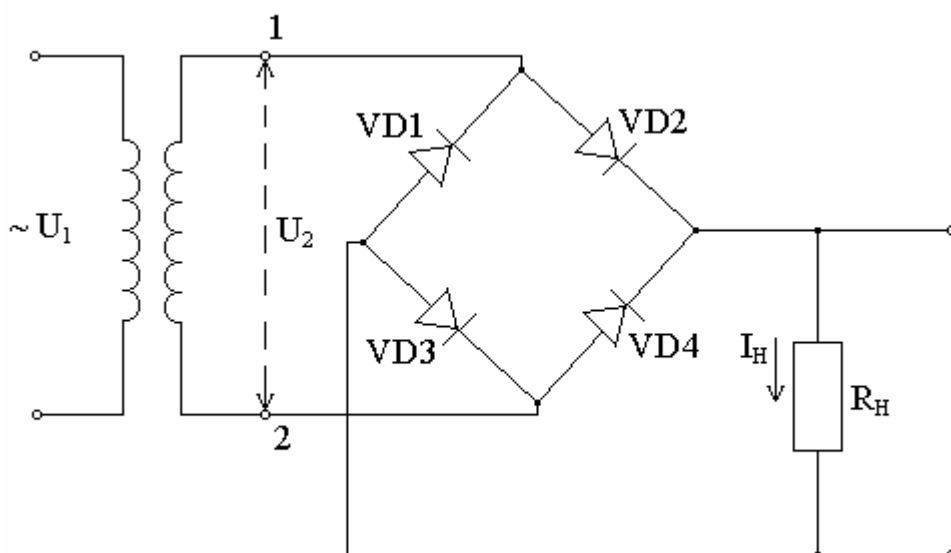


Рис.6.

В этой схеме переменное напряжение подается на противоположные узлы диодного моста и преобразуется в пульсирующее выпрямленное напряжение, которое снимается с двух других узлов. При действии на входе схемы полуволны переменного напряжения (рис.5) положительной полярности зажим  $T_1$  будет положителен по отношению к зажиму  $T_2$ . В этом случае ток будет протекать через диод  $VD_2$ , нагрузку  $R_H$  и диод  $VD_3$ , затем к точке  $T_2$ .

Полярность напряжения, приложенного к диодам  $VD_1$  и  $VD_4$ , является запирающей, поэтому через эти диоды ток не проходит.

В течение следующего полупериода изменения входного напряжения потенциал точки  $T_1$  отрицательный, а точки  $T_2$  - положительный.

Поэтому ток будет течь от точки  $T_1$  к узлу с диодами  $VD_1$  и  $VD_3$ , и, поскольку лишь диод  $VD_1$  открыт для прохождения тока такого направления, далее ток проходит через этот диод, резистор  $R_H$ , создавая на нем падение напряжения той же полярности, что и в первом случае, а затем через диод  $VD_4$  к зажиму  $T_2$ . Таким образом, мостовой выпрямитель обеспечивает двухполупериодное выпрямление переменного тока, попеременно включая две пары диодов:  $VD_2$  и  $VD_3$  при прохождении через цепь положительной полуволны,  $VD_1$  и  $VD_4$  при отрицательной полуволне входного напряжения.

### **СГЛАЖИВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА**

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в выпрямителях применяют специальные сглаживающие фильтры. Простейший сглаживающий фильтр представляет собой конденсатор большой емкости. Иногда в фильтрах используются дроссели, т.е. катушки с большой индуктивностью. Чем выше частота пульсаций, тем меньше сопротивление конденсатора и больше сопротивление дросселей, а, следовательно, тем эффективнее работает сглаживающий фильтр. Простейшая схема для сглаживания пульсаций с применением фильтра в виде конденсатора  $C$ , шунтирующего резистор нагрузки  $R_H$  может быть собрана на основе схемы 2. Для этого параллельно резистору нагрузки включается конденсатор большой емкости.

Во время положительного полупериода, когда напряжение на диоде прямое, через диод проходит ток, заряжающий конденсатор. Когда ток через диод не проходит, конденсатор разряжается через нагрузку  $R_H$  и создает на ней напряжение, которое постепенно снижается. В каждый следующий положительный полупериод конденсатор подзаряжается, и его напряжение снова возрастает. Разрядка конденсатора через сравнительно большое сопротивление нагрузки совершается гораздо медленнее (рис. 7).

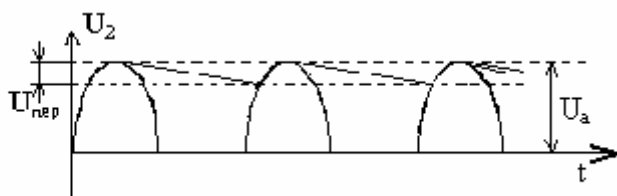


Рис. 7

Вследствие этого, напряжение на конденсаторе и включенной параллельно ему нагрузке пульсирует незначительно. На выходе схемы будет практически постоянное напряжение с небольшой по амплитуде переменной составляющей. Для устранения переменной составляющей можно поставить еще один конденсатор.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе для изучения полупроводниковых приборов используется универсальный лабораторный стенд, который содержит источник переменного напряжения и сменную плату, на которой смонтированы диоды, резисторы и конденсаторы, необходимые для выполнения эксперимента.

Принципиальная электрическая схема сменной платы приведена на рисунке 8. На сменной плате расположены полупроводниковые кремниевые диоды  $VD$ ,  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$ ,  $VD4$ , необходимые для изучения различных схем выпрямления переменного тока. Постоянные резисторы  $R1$  и  $R2$  являются нагрузочными сопротивлениями в исследуемых схемах. Наблюдение осциллограмм при изучении различных схем выпрямителей переменного тока осуществляется при помощи осциллографа.

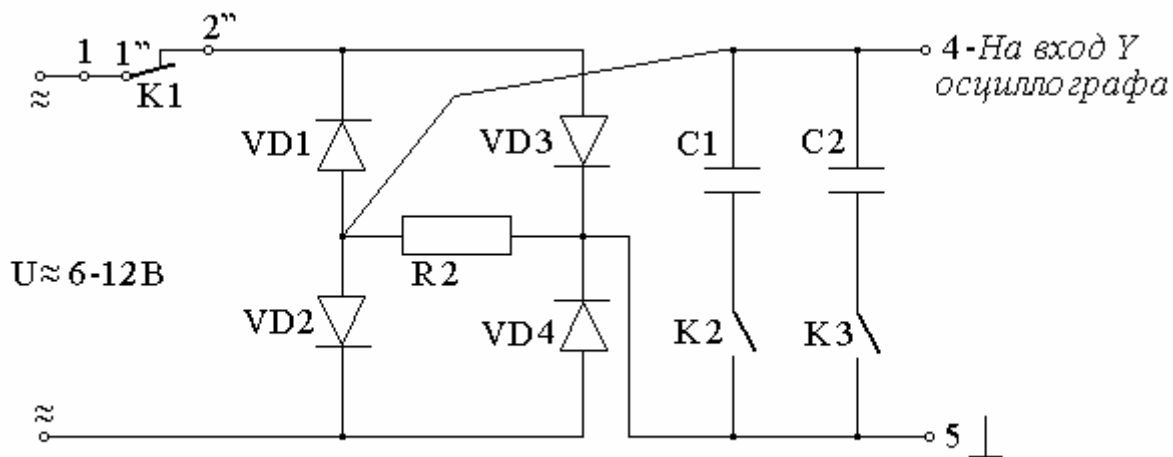


Рис. 8.

Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  необходимы для сглаживания выпрямленного напряжения. Переключатели  $K2$  и  $K3$  предназначены для поочередного подключения конденсаторов в исследуемую цепь. При помощи переключателя  $K1$  осуществляется подключение к источнику переменного напряжения одной из двух возможных электрических схем. В верхнем положении переключателя  $K1$  (положение 1' - 2') реализуется схема для изучения двухполупериодного мостового выпрямителя, в нижнем положении  $K1$  (положение 1' - 3') реализуется схема для снятия вольтамперной характеристики диода и изучения однополупериодного выпрямителя. На сменной плате имеется ряд дополнительных гнезд "1 - 5" для монтажа схем.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

**УПРАЖНЕНИЕ 1.** Наблюдение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа.

Наблюдение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа осуществляется при помощи электрической схемы (рис. 9).

1. Данная электрическая схема собрана на сменной плате. Для наблюдения вольтамперной характеристики установите сменную плату в лабораторный стенд, отключите генератор развертки осциллографа от горизонтально отключающихся пластин осциллографа, при помощи соединительных проводов используя соответствующие гнезда "1 -3", подсоедините осциллограф к схеме.

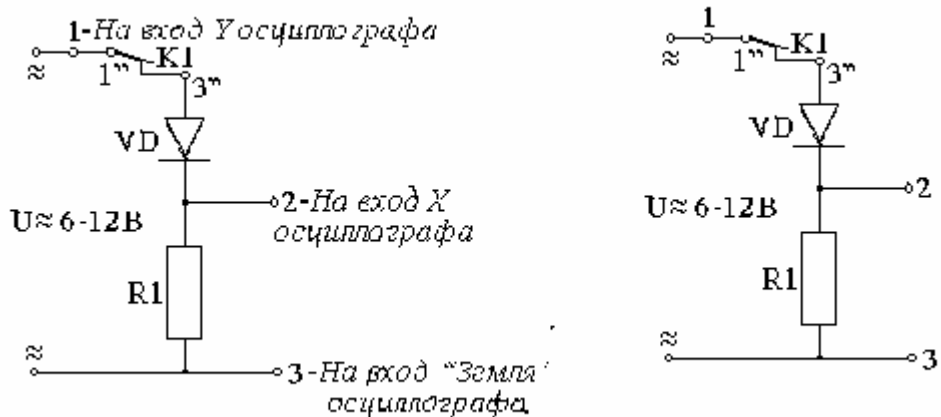


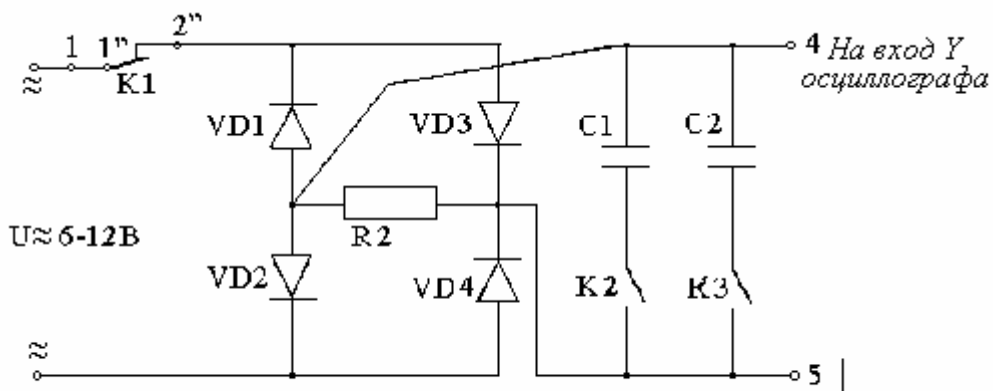
Рис. 9

2. Ключ  $K1$  поставьте в нижнее положение.

3. Включите приборы в сеть, дайте им прогреться 10-15 минут. Схему подсоедините к осциллографу. На экране осциллографа будет видно изображение вольтамперной характеристики диода, которую необходимо зарисовать в тетрадь, сохраняя масштаб.

**УПРАЖНЕНИЕ 2.** Однополупериодный выпрямитель.

Для изучения однополупериодного выпрямителя на сменной плате собрана электронная схема, которая приведена на рис.2.



1. Для изучения работы однополупериодного выпрямителя осциллограф установите в режим внутренней развертки, т.е. подключите генератор развертки к горизонтально отклоняющим пластинам осциллографа.

2. При помощи соединительных проводов подайте переменное напряжение с гнезд "1-3" на выход "Y" осциллографа.

3. Ключ  $K1$  поставьте в нижнее положение.
4. Установите на экране осциллографа изображение двух-трех периодов сигнала, зарисуйте осциллограмму переменного напряжения на миллиметровой бумаге.
5. Определите амплитудное значение  $U$  переменного напряжения и действующее значение напряжения при помощи осциллографа. В последующих упражнениях чувствительность осциллографа не меняйте.
6. Подайте на вход “Y” осциллографа выпрямленное напряжение с гнезд “1 - 2” или “1 - 3”.
7. Зарисуйте осциллограмму выпрямленного напряжения.
8. Определите амплитудное значение  $U_m$  выпрямленного (пульсирующего) напряжения при помощи осциллографа.

### *УПРАЖНЕНИЕ 3. Двухполупериодный мостовой выпрямитель.*

Изучение двухполупериодного мостового выпрямителя осуществляется при помощи электрической схемы, которая дана на рис. 6.

1. Для наблюдения осциллограммы двухполупериодного выпрямителя установите сменную плату в стенд. На сменной плате переключатель  $K1$  установите в положение “1 - 2”.
2. Подайте на вход “Y” осциллографа выпрямленное напряжение с гнезд “4 - 5”.
3. Зарисуйте осциллограмму выпрямленного напряжения.
4. Определите амплитудное значение  $U_m$  выпрямленного (пульсирующего) напряжения при помощи осциллографа.

### *УПРАЖНЕНИЕ 4. Сглаживание выпрямленного напряжения.*

Изучение явления сглаживания выпрямленного напряжения осуществляется при помощи той же электрической схемы. В этом случае конденсаторы  $C1$  и  $C2$  подключаются к выходу выпрямителя с помощью тумблеров  $K2$  и  $K3$ .

1. Получите на экране осциллографа и зарисуйте осциллограммы напряжений при одном и двух конденсаторах, подключенных к резистору  $R2$  в двухполупериодный мостовой выпрямитель для сглаживания выпрямленного напряжения.
2. Определите при помощи осциллографа величину постоянной составляющей  $U_{пост}$  выпрямленного напряжения.
3. Увеличивая чувствительность осциллографа по выходу “Y”, определите амплитуду переменной составляющей  $U_{пер}$  для каждого конденсатора и рассчитайте коэффициент пульсаций, т.е. сколько процентов составляет переменная составляющая  $U_{пер}$  от постоянной  $U_{пост}$  составляющей по формуле  

$$k = (U_{пер} / U_{пост}) \cdot 100\%.$$

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.**

1. Какова природа собственной проводимости полупроводников?
2. Каким образом создается примесная электронная или дырочная электропроводимость?
3. Какие процессы происходят при образовании запирающего слоя при соединении полупроводников p- и n-типов?
4. Что происходит в p-n -переходе при действии внешнего электрического поля?
5. Объясните ход вольтамперной характеристики диода.
6. В чем заключаются преимущества и недостатки изучаемых выпрямительных схем?
7. Как происходит сглаживание пульсирующего напряжения? Какова роль конденсаторов при сглаживании?

### **ЛИТЕРАТУРА**

[3], §11, с. 10-48; [6], §24, с.69-71; [2], §6.1, с.114-213.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N2

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

- ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Снять входную характеристику транзистора.  
2. Снять выходную характеристику транзистора.

**ПРИБОРЫ:** Универсальный вольтметр, специальный лабораторный стенд, сменная плата для изучения работы транзисторов.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

##### 1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА.

Транзистор-это электропреобразовательный полупроводниковый прибор, который может служить для усиления слабых переменных токов и напряжений.

Он имеет три вывода: один управляющий, два других присоединяют к управляющей цепи. По принципу работы различают биполярные и полевые (униполярные) транзисторы. Биполярные транзисторы управляются электрическим током; полярные - напряжением.

Устройство биполярных транзисторов типа n-p-n показано на рис. 1. Транзистор состоит из двух r-n переходов. Оба перехода

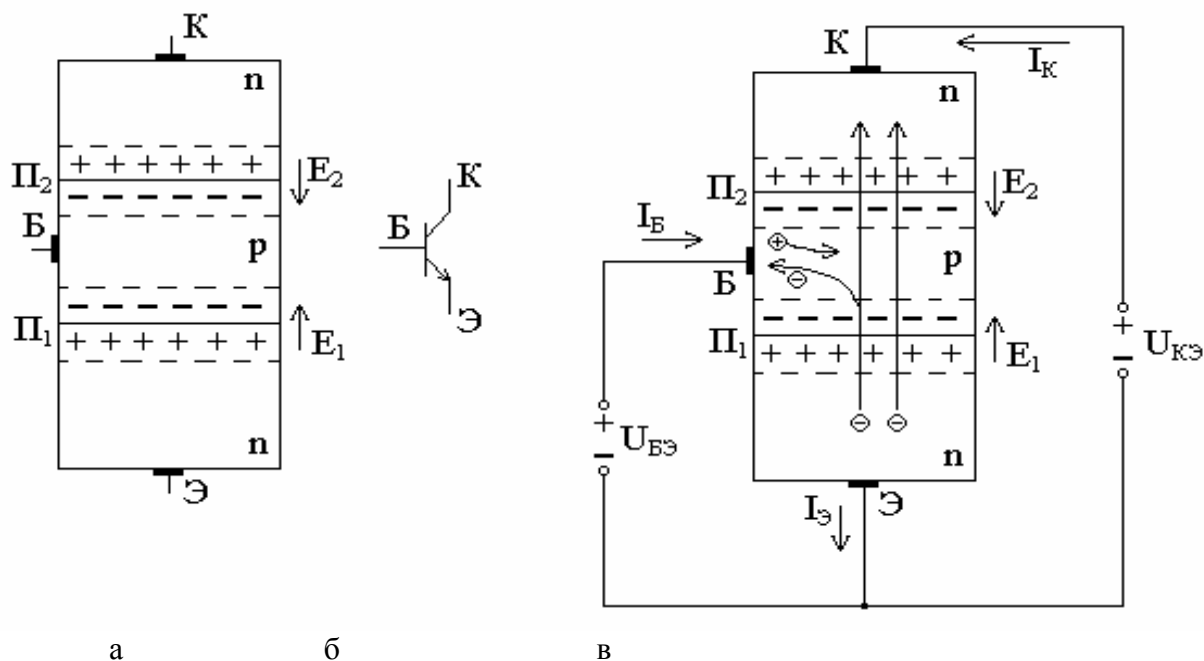


Рис.1

формируются на одном и том же кристалле полупроводника, при этом оба перехода имеют общую область, которую называют *базой* ( $B$ ) с дырочной проводимостью (p - типа), а две крайние - с электронной проводимостью (n - типа), (транзистор p-n-p типа соответственно наоборот). К каждой области делают металлический контакт. Две крайние области транзистора называют *коллектором* ( $K$ ) и *эмиттером* ( $\mathcal{E}$ ). Эмиттер служит источником носителей заряда, коллектор собирает заряды, проходящие через оба перехода. Так же называют и контакты от соответствующих областей. Обозначение транзистора типа n-p-n в различных электронных схемах приведено на рисунке 1б (в обозначении транзистора n-p-n типа стрелка смотрит в другую сторону).

Схема включения транзистора n-p-n типа показана на рисунке 1в. Между базой и эмиттером подается напряжение  $U_{B\mathcal{E}}$  таким образом, чтобы **эмиттерный** p-n-переход ( $\Pi_1$  на рис 1в) был открыт. Между коллектором и эмиттером подается напряжение  $U_{K\mathcal{E}}$

( $U_{КЭ} > U_{БЭ}$ ) так, чтобы **коллекторный** р-п-переход ( $\Pi_2$  на рис. 1в) был заперт. Только такое включение обеспечивает работу транзистора в усилительном режиме.

Рассмотрим физические процессы, протекающие внутри транзистора. Через эмиттер идет поток основных носителей заряда электронов, т.к. эмиттерный переход  $\Pi_1$  открыт. Они создают ток эмиттера ( $I_Э$ ) и инжектируются (впускаются) из эмиттера в базу. Так как в базе основными носителями заряда являются дырки, то инжектированные электроны частично будут рекомбинировать (при соединении электрона и дырки восстанавливается ковалентная связь и два носителя заряда «исчезают»). Так как *толщина базы очень мала*, то количество дырок в ней мало, и лишь небольшая часть электронов рекомбинирует, в результате количество носителей заряда уменьшается незначительно. Большинство инжектированных электронов достигает коллекторного перехода.

Т.к. коллекторный переход  $\Pi_2$  закрыт, то основные носители дырки из базы пройти в коллектор не могут. В закрытом переходе база-коллектор существуют объемные заряды, которые появляются из-за объединения области коллекторного р-п-перехода  $\Pi_2$  основными носителями заряда (электронами со стороны n-области и дырками со стороны р-области). Эти заряды образуют двойной электрический слой, который имеет собственное электрическое поле  $E_2$ . Это поле препятствует прохождению дырок через коллекторный переход, но является ускоряющим для не основных носителей базы – электронов, инжектированных в базу из эмиттера. Оно способствует движению электронов через коллекторный переход (втягивает их в коллектор). Эти электроны создают коллекторный ток ( $I_К$ ). Чтобы число дырок в базе оставалось прежним (а не уменьшалось за счет рекомбинации), в базе образуются новые дырки за счет уходящих во внешнюю цепь электронов, которые и создают ток базы  $I_Б$ .

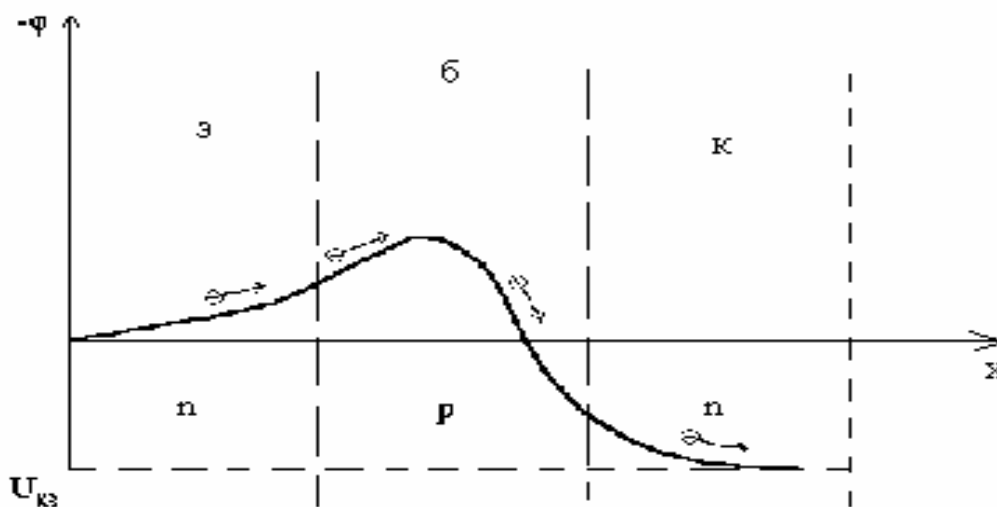


Рис. 2

**ПРИМЕЧАНИЕ 1:** на рис. 1в направления токов противоположны направлению движения электронов и совпадают с направлением движения дырок. Это связано с положительностью заряда дырки и отрицательностью - электрона. Между рассмотренными токами, согласно правилу Кирхгофа, выполняется соотношение:

$$I_Э = I_Б + I_К \quad (1)$$

Как было замечено ранее из-за малости числа дырок в базе по сравнению с числом инжектированных электронов:

$$I_К \gg I_Б \quad (2)$$

$$\text{Из формулы (1) и (2) следует } I_Э \approx I_К \quad (3)$$



Работу биполярного транзистора можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы (рис. 2).

На диаграмме приведено распределение потенциала между эмиттером и коллектором. Потенциал эмиттера принято считать равным нулю. В эмиттерном переходе для электронов имеется небольшой потенциальный барьер, высотой которого можно управлять с помощью напряжения между эмиттером и базой  $U_{БЭ}$ . При увеличении  $U_{БЭ}$  барьер уменьшается и наоборот.

На коллекторном переходе имеется значительная разность потенциалов за счет сильного электрического поля в области объемных зарядов (рис. 1в). Электроны, двигаясь из эмиттера в базу, поднимаются на горку, а затем ускоренно с нее спускаются через коллекторный переход: Чем выше горка, тем меньше количество электронов способно подниматься на нее (лишь самые быстрые) и наоборот.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2:** Мы рассмотрели физические явления в транзисторе типа п-р-п. Подобные же процессы происходят в транзисторе р-п-р-типа, но в нем меняются ролями электроны и “дырки”, а также изменяются полярности напряжений и направления токов.

## 1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Зависимость между токами и напряжениями имеет очень сложный характер. Закон Ома при этом не выполняется. Все зависимости имеют существенную нелинейность. Наиболее часто рассматриваются входные и выходные характеристики биполярного транзистора.

**ВХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА** или характеристика управляющей цепи - это зависимость тока базы  $I_B$  от напряжения между эмиттером и базой  $U_{БЭ}$  при постоянном напряжении на переходе база – коллектор (рис.3.).

$$I_B = f(U_{БЭ}) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} \quad (4)$$

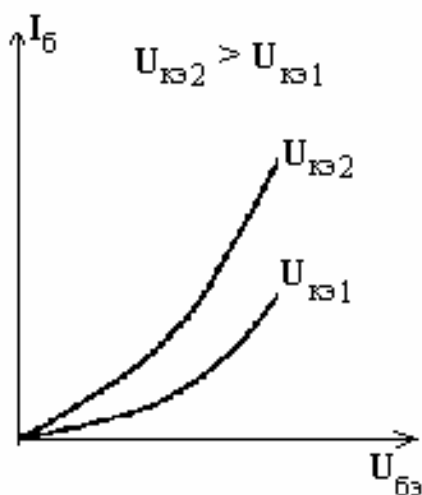


Рис.3

**ВЫХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА** или характеристика управляемой цепи - это зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ}$  при постоянном токе базы  $I_B$  (рис.4).

$$I_K = f(U_{КЭ}) \text{ при } I_B = \text{const} \quad (5)$$

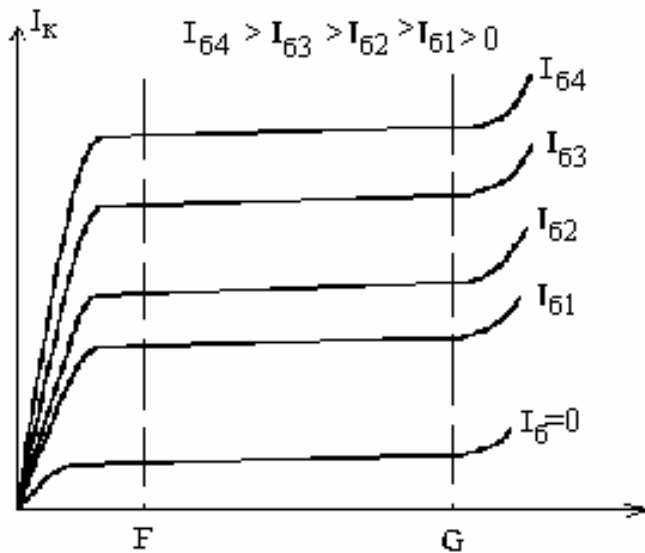


Рис.4

Входные характеристики относятся к эмиттерному переходу. Он открыт, и поэтому зависимость  $I_B = f(U_{БЭ})$  похожа на вольтамперную характеристику диода, работающего при прямом включении.

Выходные характеристики относятся к коллекторному переходу, находящемуся в закрытом состоянии, поэтому зависимость  $I_K = f(U_{КЭ})$  при  $I_B = 0$  подобна характеристике диода при обратном включении. Если  $I_B \gg 0$ , то выходная характеристика расположена выше, чем  $I_B = 0$ . Увеличение тока базы означает, что увеличилось напряжение  $U_{БЭ}$  (рис. 3). Это увеличение приводит к уменьшению высоты барьера для электронов в области базы (рис. 2). Но тогда большее количество электронов за счет своих тепловых скоростей сможет перейти через барьер. Вследствие этого увеличивается ток коллектора  $I_K$ .

$$I_{B4} > I_{B3} > I_{B2} > I_{B1} > 0$$

Благодаря линейной зависимости  $I_K$  и  $I_B$  (см. уравнение 1) пологие участки соседних выходных характеристик расположены приблизительно на одинаковых расстояниях друг от друга, если  $I_B$  пропорционально возрастает (рис 3).

Существование пологого участка на выходной характеристике (рис. 4), где ток коллектора не зависит от  $U_{КЭ}$  при  $I_K = \text{const}$ , объясняется следующим образом: при увеличении  $U_{КЭ}$  падение напряжения в области коллекторного перехода возрастает, и электроны быстрее скатываются с горки, но через базу их может пройти лишь фиксированное количество. Количество электронов определяется высотой барьера в области базы (а она остается постоянной из-за  $I_B = \text{const}$ ). Т.к.  $I_K$  определяется количеством электронов, скатившихся с горки, то  $I_K$  не изменяется при повышении  $U_{КЭ}$ .

При очень большом значении  $U_{КЭ}$  наступает пробой коллекторного перехода и транзистор утрачивает свои свойства.

Зависимость коллекторного тока  $I_K$  от тока базы  $I_B$  называется *управляющей характеристикой* транзистора.

$$I_K = f(I_B) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} \quad (6)$$

При токе базы  $I_B = 0$  ток коллектора  $I_{K0} > 0$ , но очень мал, так как это ток не основных носителей заряда, движущихся через коллекторный переход.

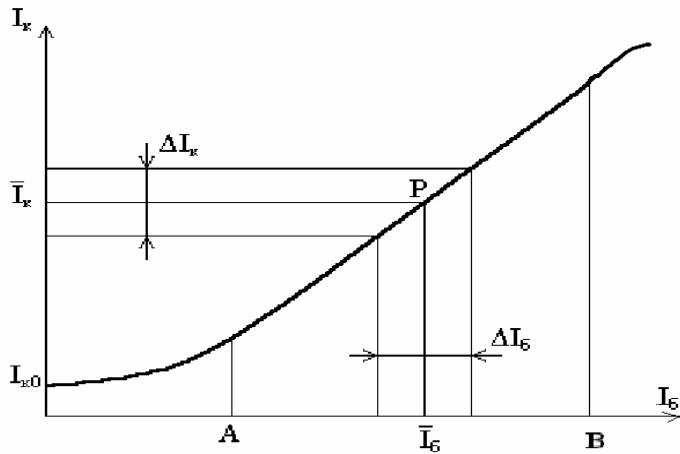


Рис. 5

Ранее уже было сказано, что ток коллектора  $I_K$  зависит от тока базы  $I_B$  (уравнение 1). Этот факт объясняет существование прямолинейного участка на кривой управления (рис.5). Кривые, снятые при других значениях  $U_{КЭ}$  совпадают с приведенной кривой, в связи с независимостью коллекторного тока  $I_K$  от  $U_{КЭ}$  в области FG.

Режим работы транзистора выбирают таким, что точка  $P(I_K, I_B)$  находится на середине прямолинейного участка. При малом изменении базового тока  $\Delta I_B$  вблизи точки P ток коллектора существенно изменяется:

$$\Delta I_K \gg \Delta I_B \quad (7)$$

Биполярный транзистор можно также использовать для усиления переменных напряжений. Для этого в цепь коллектора включают сопротивление  $R_K$  (рис. 6), которое является нагрузкой коллектора и задает режим работы транзистора, в цепь эмиттер-база включают базовый резистор  $R_B$ . Усиливаемый переменный сигнал подается на базу через конденсатор  $C_P$ , усиленное переменное напряжение снимается с коллектора транзистора  $VT_1$ , через конденсатор  $C_n$ .

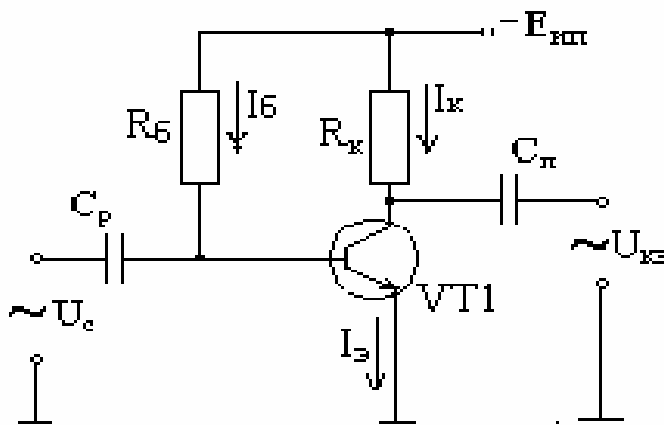


Рис.6

Величина

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} \quad (8)$$

называется **СТАТИСТИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА ПО ТОКУ**. Обычно  $\beta = 10-300$ , т.е. возможно усилить слабый переменный ток при помощи транзистора в 10-300. На базу подают дополнительное переменное напряжение, которое вызывает изменение тока базы, а на коллекторе получают во много раз усиленный ток.

## 2. ОПИСАНИЕ СМЕННОЙ ПЛАТЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ

На рисунке 7 приведена схема для изучения работы транзисторов. На транзисторе  $VT3$  и переменном сопротивлении  $R6$  собран управляемый источник напряжения. Напряжение источника может регулироваться с помощью резистора  $R6$  и подаваться в управляемые цепи изучаемых транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Напряжение можно изменять в пределах 0-15 В. Переменное сопротивление  $R2$ , подключенное последовательно с сопротивлениями  $R1$  и  $R3$  к источнику питания между зажимами +15В и -15В, представляет собой делитель напряжения, позволяющий регулировать с помощью  $R2$  напряжение, которое подается в управляющую цепь биполярного транзистора  $VT1$ , тем самым изменяя базовый ток  $I_B$ . Значения сопротивлений подобраны так, что напряжение между базой и эмиттером  $U_{БЭ}$  может быть как положительным, так и отрицательным.

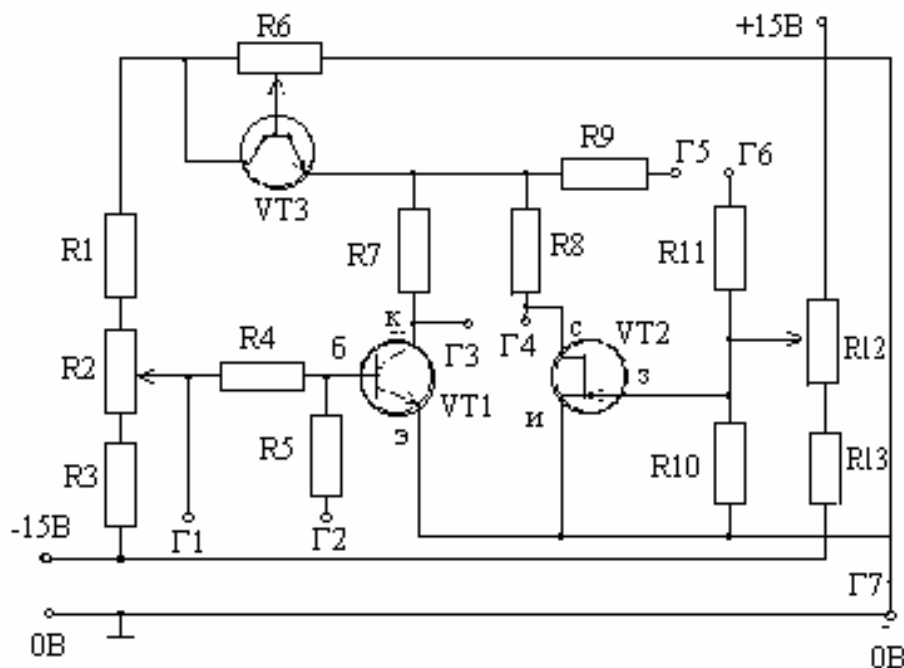


Рис.7

Аналогично переменное сопротивление  $R12$  и сопротивление  $R13$ , подключенное к тому же источнику питания, образуют делитель напряжения, который подает в цепь затвора полевого транзистора  $T2$  напряжение  $U_{ЗИ}$ . Напряжение  $U_{ЗИ}$  может регулироваться с помощью  $R12$  и меняться от отрицательных до положительных значений.

В данной работе для определения напряжения используется вольтметр, поэтому для изменения токов в управляемых цепях транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  включены сопротивления  $R7$  и  $R8$  соответственно. Измеряя разность потенциалов на концах сопротивления  $R7$  (гнезда  $\Gamma3$ ,  $\Gamma5$ ) и зная величину сопротивления  $R7$  можно по закону Ома найти коллекторный ток  $I_K$ :

$$I_K = \Delta\phi/R7. \quad (9)$$

Между гнездами Г3 и Г5 кроме сопротивления R7 включено также сопротивление R9, но через него никакие токи не текут, поэтому на нем нет падения напряжения. Роль R9 состоит в том, что оно защищает транзистор VT3 от неправильного включения вольтметра, одна из клемм которого соединена с корпусом (0).

Аналогично, измеряя разность потенциалов на концах R8 (гнезда Г4, Г5), можно найти ток стока  $I_C$  транзистора VT2.

Напряжение  $U_{БЭ}$  (на VT1) можно изменить, подключая вольтметр к гнезду Г2; а напряжение  $U_{ЗИ}$  (на VT2) - гнезду Г6. Сопротивления R5 и R11 играют роль защиты (ту же, что и R9).

Для изменения  $U_{КЭ}$  (на VT1) необходимо подключить вольтметр к Г3, а для измерения  $U_{СИ}$  (на VT2) - к Г4. И, наконец, для нахождения тока базы  $I_B$  (для VT1) необходимо измерить разность потенциалов на концах сопротивления R4, включенного в цепь базы, (гнезда Г1 и Г2). Сопротивление R5 аналогично играет роль защиты.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3. Общий провод вольтметра подключается к гнезду Г7 (0, корпус) и не отключается в процессе измерений!**

Поэтому мы измеряем потенциалы гнезд относительно корпуса. Например, чтобы найти напряжение на R2, необходимо подключить другую клемму вольтметра (с белой изоляцией) к Г1, снять значение потенциала  $\varphi_1$  гнезда Г1, а лишь подключить к гнезду Г2 и снять значение его потенциала  $\varphi_2$ . Тогда разность потенциалов на концах R4 равна  $-\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

*УПРАЖНЕНИЕ 1. Снятие входной характеристики биполярного транзистора ( $I_B = f(U_{БЭ})$  при  $U_{КЭ} = const$ ).*

1) Включите УЛС (универсальный лабораторный стенд) и вольтметр в сеть и прогрейте в течение 10 мин.

2) Подсоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.

3) Подключите вольтметр к гнезду Г3 и установите с помощью потенциометра R<sub>Б</sub> потенциал коллектора  $\varphi_3 = 5$  В) т.е. напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ} = 5$  В).

4) Подключите вольтметр к гнезду Г2 и установите с помощью потенциометра R2 потенциал базы  $\varphi_2 = 0$  В (т.е. напряжение между базой и эмиттером  $U_{БЭ} = 0$  В).

5) Проверьте снова величину  $U_{КЭ}$  (т.е. потенциал  $\varphi_3$  гнезда Г3) и, если нужно, установите расхождение с прежним значением. Затем снова проверьте величину  $U_{БЭ}$  (т.е. потенциал  $\varphi_2$  гнезда Г2) и т.д.

Всю эту процедуру назовем **МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**. Эта процедура необходима, т.к. изменение одного параметра приводит к изменению другого.

При помощи вольтметра измерьте потенциал  $\varphi_1$  (гнездо Г1) и  $\varphi_2$  (гнездо Г2) на концах сопротивления R4. По разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  определите ток базы  $I_B$ , протекающий через сопротивление R4 по формуле

$$I_B = \Delta\varphi/R4 \quad (10)$$

7) Данные запишите в таблицу 1.

Таблица 1.

$\varphi_2(U_{БЭ}), В$	$\varphi_1$	$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$	$I_B = \Delta\varphi/R4$

- 8) Измерьте напряжение  $U_{БЭ}$  (т.е. потенциал  $\varphi_2$  гнезда Г2) и, корректируя  $U_{КЭ}$  на требуемом уровне ( $\varphi_3 = 5$  В), найдите новое значение тока базы  $I_B$ .
- 9) Снимите зависимость тока базы  $I_B$  от напряжения  $U_{БЭ}$ , оставляя неизменным  $U_{КЭ}$ .
- 10) Снимите аналогичную зависимость при  $U_{КЭ} = 10$  В, записывая данные в аналогичную таблицу 2.
- 11) По результатам измерений постройте графики на миллиметровой бумаге.

**УПРАЖНЕНИЕ 2.** Снятие выходной характеристики биполярного транзистора ( $I_K = f(I_{КЭ})$  при постоянном токе базы  $I_B = const$ ).

Так как величина  $R4$  значительно превышает сопротивление эмиттерного перехода, то ток базы  $I_B$  определяется почти ею. Поэтому напряжение  $U_{КЭ}$  будет слабо влиять на ток базы  $I_B$ , в связи с этим корректировка тока базы (при не изменном  $U_{КЭ}$ ) не понадобится.

- 1) Присоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.
- 2) Подключите вольтметр к гнезду Г3 и установите с помощью потенциометра  $R6$  потенциал коллектора  $\varphi_3 = 0$  В (т.е. напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ} = 0$  В).
- 3) Подключите вольтметр к гнезду Г2 и установите с помощью потенциометра  $R2$  потенциал базы  $\varphi_2 = 0$  В (т.е. напряжение между базой и эмиттером  $U_{БЭ} = 0$  В). Следовательно, ток базы  $I_B = 0$ .
- 4) Измерьте потенциал  $\varphi_3$  (гнездо Г3) и,  $\varphi_5$  (гнездо Г5), запишите данные в таблицу 3. По разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_3$  определите ток коллектора  $I_K$  по формуле (11):

$$I_K = \Delta\varphi/R7 \quad (10)$$

	$I_6 =$	
$\varphi_3(U_{КЭ})$	$\varphi_5$	$I_K$

Повторите измерения, изменяя напряжения  $U_{КЭ}$  (гнездо Г3) от 0,5 В до 8 В и измеряя потенциал  $\varphi_5$ . Ток базы  $I_B$  должен оставаться неизменным.

- 6) Рассчитайте ток коллектора  $I_K$  по формуле (11) и данные занесите в таблицу 3.
- 7) Заготовьте аналогичные таблицы 4 и 5.
- 8) Снимите аналогичные зависимости при других токах базы, подавая сначала на гнездо Г1 потенциал  $\varphi_1 = 1,31$  В, а затем устанавливая  $\varphi_1 = 2,00 - 2,10$  В. Ток базы, определяемый по формуле (10), должен оставаться неизменным.
- 9) Постройте графики всех трех зависимостей на миллиметровой бумаге.

**УПРАЖНЕНИЕ 3.** Снятие характеристики управления биполярного транзистора ( $I_K = f(I_B)$  при постоянном напряжении на коллекторе базы  $U_{КЭ} = const$ ).

- 1) По результатам упр. 2 выберите значение  $U_{КЭ}$  на пологом участке выходной характеристики ( $U_{КЭ} = 7-6$  В). Заготовьте табл. 6 для занесения результатов измерений.

Таблица 6

$\varphi_1(U_{БЭ})$	$\varphi_2$	$I_B$	$\varphi_3$	$\varphi_5$	$I_K$

- 2) Подсоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 отсоединяйте его во время измерений.
- 3) Подключите вольтметр к гнезду Г3 и установите с помощью потенциометра  $R6$  выбранный потенциал коллектора  $\varphi_3 = 6-7$  В (т.е. напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{КЭ} = 6-7$  В).

- 4) Подключите вольтметр к гнезду  $\Gamma 2$  и установите с помощью потенциометра  $R 2$  потенциал гнезда  $\Gamma 1$   $\varphi_1 = 0,5$  В. Установку потенциалов произведите **методом последовательных приближений**.
- 5) Измерьте потенциалы  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_5$  (на гнездах  $\Gamma 1, \Gamma 2, \Gamma 3, \Gamma 5$ ), рассчитайте токи базы  $I_B$  и коллектора  $I_K$  по формулам (10) и (11). Данные занесите в таблицу 6.
- 6) Повторите измерения, изменяя потенциал  $\varphi_1$  и корректируя напряжение на коллекторе  $U_{KЭ}$  ( $\varphi_3$  на гнезде  $\Gamma 3$ ).
- 7) Данные занесите в таблицу 6 и постройте график зависимости тока коллектора  $I_K$  от тока базы  $I_B$ .
- 8) Найдите статический коэффициент усиления по току по формуле (8).

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что представляет собой транзистор р-п-р- и п-р-п-типов?
2. Какую роль играют эмиттер, база и коллектор транзистора?
3. Почему базу транзистора делают тонкой?
4. Какие носители заряда являются основными и не основными в эмиттерной, базовой и коллекторной областях транзистора?
5. Для каких носителей заряда коллекторный переход включается в обратном направлении?
6. По какой схеме и как снимаются входные характеристики транзистора?
7. По какой схеме и как снимаются выходные характеристики транзистора?
8. Объяснить сходство между входными и выходными характеристиками транзистора, с одной стороны, и вольтамперной характеристикой диода, с другой?
9. Что такое коэффициент усиления транзистора по току и как он определяется?

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1], §5.4-5.8, с. 91-118; [3], §1.2, с.53-86; [2], §6.2, с.123-129; [6], §26, с.74-78.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Снять входную характеристику транзистора: зависимость  $I_{II} = f(U_{3II})$ .

2. Снять выходную характеристику транзистора: зависимость  $I_C = f(U_{CII})$ .

**ПРИБОРЫ:** Цифровой вольтметр, универсальный лабораторный стенд, сменная плата для изучения работы транзисторов.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

##### 1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА.

Полевые или полярные транзисторы управляются напряжением. Чаще всего они используются для усиления слабых переменных напряжений.

Устройство полевого (униполярного) транзистора с каналом n-типа, его условное обозначение и схема включения приведены на рисунке 1.

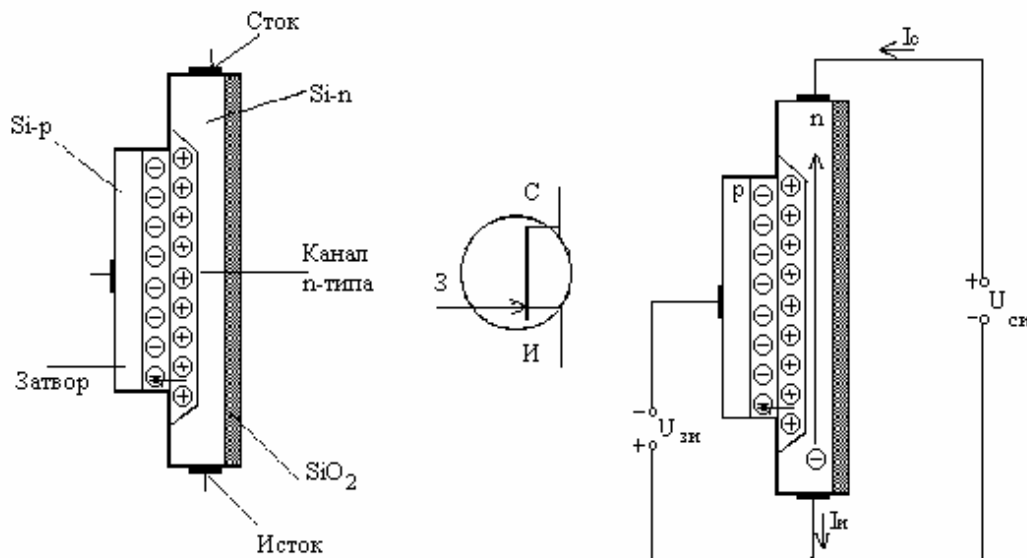


Рис.1

В отличие от биполярного транзистора полевой транзистор имеет один p-n переход. Электроды полевого транзистора включаются таким образом, чтобы ток протекал не через переход, а вдоль перехода. Для этого на противоположные концы пластинки из полупроводника n-типа наносят металлические контакты с выводами, которые называются соответственно истоком ( $I$ ) и стоком ( $C$ ) (подобны эмиттеру и коллектору). Управляющий вывод отведен от области с проводимостью p-типа, он играет роль, аналогичную базе биполярного транзистора, и называется затвором ( $З$ ).

Между затвором и истоком подается напряжение такой полярности, чтобы единственный p-n-переход оказался закрытым. Напряжение другой полярности на затвор *не подают никогда*, потому что в этом случае через переход будет течь прямой ток, который приведет к перегреву и нарушению работы транзистора и, в конечном итоге, к разрушению перехода. В этом состоит существенное отличие устройства полевого транзистора от устройства биполярного транзистора.



Между стоком и истоком подают положительное напряжение  $U_{СИ}$ .

Физические процессы в полевом транзисторе происходят следующим образом: вдоль области n-типа течет ток основных носителей заряда - электронов (рис. 1в). При этом в цепи истока течет ток истока  $I_{И}$ . При запирающем входном напряжении  $U_{ЗИ}$  в области р-n-перехода образуется обедненный основными носителями заряда слой (переход закрыт, через него невозможно прохождение основных носителей). Поэтому тока в цепи затвора практически нет.

$$I_3 = 0 \quad (1)$$

Ток затвора  $I_3$  на практике не равен 0, т.к. в цепи присутствует очень слабый ток не основных носителей заряда, и им можно пренебречь. Площадь поперечного сечения области, через которую проходит поток основных носителей, зависит от напряжения между затвором и истоком. Эта область называется каналом n-типа. Электроны, прошедшие через канал транзистора, образуют ток в цепи стока  $I_C$ , причем, учитывая соотношение (1) можно записать:

$$I_C = I_{И} \quad (2)$$

Управляя напряжением  $U_{ЗИ}$ , можно менять ширину канала и регулировать количество проходящих электронов, а, значит, и ток стока  $I_C$ . При некотором значении напряжения  $U_{ЗИ0}$  граница обедненного слоя может достигнуть правой границы канала. Канал исчезает, ток через транзистор прекращается (транзистор запирается). Напряжение  $U_{ЗИ0}$  называют напряжением запираения транзистора.

Полевой транзистор с каналом р-типа работает аналогично. При рассмотрении работы полевого транзистора с каналом р-типа необходимо поменять ролями электроны и дырки, а также сменить полярности напряжений и направления токов. Стрелка в условных обозначениях направлена в обратную сторону.

## 1.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА.

Так как полевой транзистор управляется не током, а напряжением, его входные и выходные характеристики отличаются от характеристик биполярного транзистора.

**ВХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА:** это зависимость тока стока от напряжения затвор-исток  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при постоянном напряжении сток-исток  $U_{СИ} = const$ .

Входные характеристики, снятые при различных напряжениях  $U_{СИ}$  практически совпадают. Это означает, что выходная цепь не влияет на входную (в этом заключается преимущество полевого транзистора над биполярным транзистором, у которого взаимное влияние входной и выходной цепи значительное). Общий вид зависимости показан на рис 2.

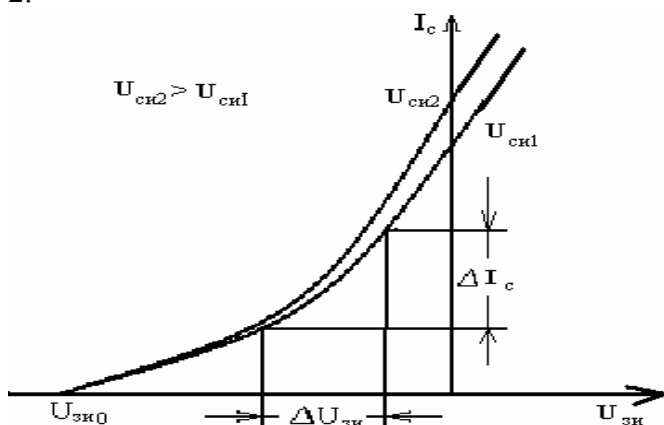


Рис. 2

**ВЫХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА:** это зависимость тока стока от напряжения сток-исток  $I_C = f(U_{СИ})$  при постоянном напряжении затвор-исток  $U_{ЗИ} = const$ . Выходная характеристика представлена на рис 4.

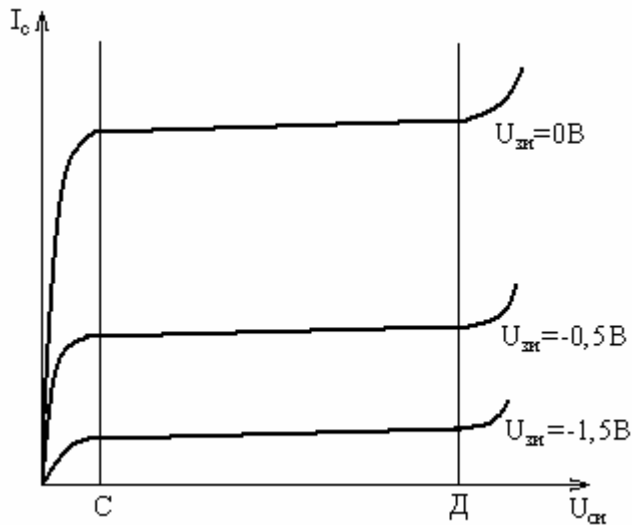


Рис.3

Выходные характеристики полевого транзистора несколько отличается от характеристик биполярного транзистора. У полевого транзистора область CD значений  $U_{СИ}$ , где ток стока  $I_C$  не зависит от напряжения сток-исток  $U_{СИ}$  при фиксированном напряжении  $U_{ЗИ}$ , имеет значительную протяженность, но область возрастания  $I_C$  достаточно крутая.

Существование пологого участка выходной характеристики можно объяснить следующим образом: при увеличении напряжения между стоком и истоком  $U_{СИ}$  (при  $U_{ЗИ} = const$ ) увеличивается напряжение на закрытом p-n-переходе со стороны стока. Это приводит к росту обедненной основными носителями области и к уменьшению толщины канала. Получается, что ток стока  $I_C$  растет за счет увеличения напряжения между стоком и истоком  $U_{СИ}$ , но одновременно ток стока  $I_C$  уменьшается за счет уменьшения толщины канала, в результате  $I_C$  не зависит от напряжения между стоком и истоком  $U_{СИ}$  на участке CD выходной характеристики (рис. 3). При еще большем увеличении напряжения между стоком и истоком между стоком и истоком  $U_{СИ}$  ток стока  $I_C$  начинает лавинообразно возрастать и наступает пробой транзистора.

Полевой транзистор может служить для усиления слабых переменных напряжений. Для этого в управляемую цепь включают резистор  $R$  (рис.4). Включение резистора приводит к изменению напряжения сток-исток между стоком и истоком  $U_{СИ}$ , которое можно определить по правилу Кирхгофа:

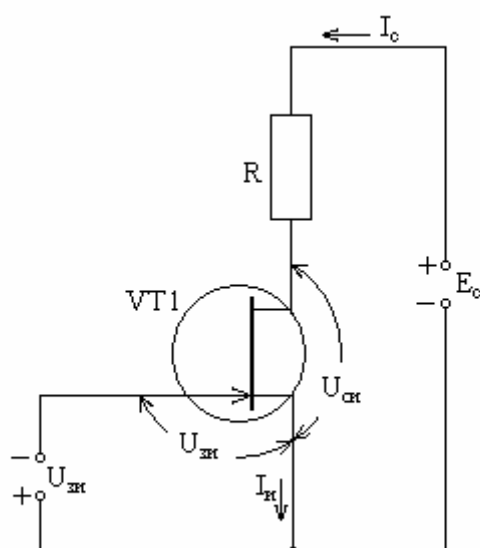


Рис. 4

$$U_{СИ} = E_C - I_C \cdot R \quad (5)$$

Режим работы полевого транзистора выбирают таким, чтобы  $I_C$  и  $U_{СИ}$  попадали в среднюю часть области  $CD$ . Малое изменение  $U_{ЗИ}$  приводит к изменению  $I_C$ , которое в свою очередь изменяет  $U_{СИ}$  согласно уравнению:

$$\Delta U_{СИ} = \Delta I_C \cdot R \quad (6)$$

Уравнение (6) является следствием (5), если взять от (5) первый дифференциал. Разделив (6) на  $\Delta U_{ЗИ}$ , получим **КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ** по напряжению:

$$k = \Delta U_{СИ} / \Delta U_{ЗИ} = SR \quad (7)$$

где  $S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ}$  в области  $CD$  (8)

Величина  $S$  называется крутизной характеристики транзистора и достигает порядка 3 мА/В. Если взять  $R = 10-100$  кОм, то коэффициент усиления достигает значения:  $k = 30-300$ .

## 2. ОПИСАНИЕ СМЕННОЙ ПЛАТЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ

На рисунке 5 представлены схемы для изучения работы транзисторов. На транзисторе  $VT3$  и переменном сопротивлении  $R6$  создан управляемый источник напряжения, который может регулироваться с помощью  $R6$  и подавать в управляемые цепи изучаемых транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  напряжение в пределах 0-15 В.

Переменное сопротивление  $R2$ , подключенное последовательно с сопротивлением  $R1$  и  $R2$  к источнику питания между зажимами +15 В и -15 В, представляет собой делитель напряжения, позволяющий регулировать с помощью  $R2$  напряжение, которое подается в управляющую цепь биполярного транзистора  $VT1$ , тем самым меняя базовый ток  $I_B$ . Значения сопротивлений подобраны так, что напряжение  $U_{БЭ}$  может быть как положительным, так и отрицательным.

Аналогично переменное сопротивление  $R12$  и сопротивление  $R13$ , подключенное к тому же источнику питания, образуют делитель напряжения, который подает в цепь затвора полевого транзистора  $VT2$  напряжение  $U_{ЗИ}$ ; оно может регулироваться с помощью  $R12$  и иметь положительный и отрицательный потенциал. В данной работе используется лишь вольтметр, поэтому для измерения тока в управляемых цепях транзисторов  $VT1$  и  $VT2$

включены сопротивления  $R7$  и  $R8$  соответственно. Измеряя разность потенциалов на концах сопротивления  $R7$  (гнезда  $\Gamma3$ ,  $\Gamma5$ ) и зная величину сопротивления  $R7$  можно по закону Ома найти коллекторный ток  $I_K$ :

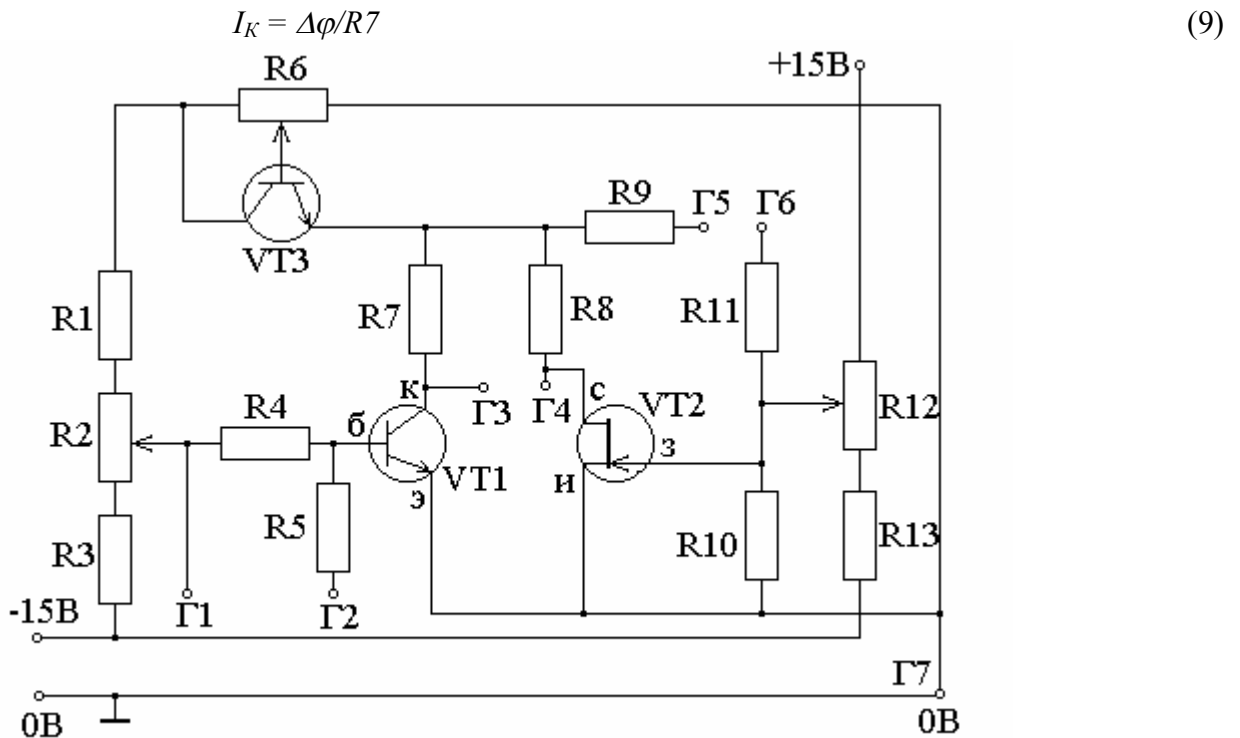


Рис. 5

Правда, между гнездами  $\Gamma3$  и  $\Gamma5$  кроме сопротивления  $R7$  включено также сопротивление  $R9$ , но через него никакие токи не текут, поэтому на нем нет падения напряжения. Роль  $R9$  состоит в том, что оно защищает транзистор  $VT3$  от неправильного включения вольтметра, одна из клемм которого соединена с корпусом (0).

Аналогично, измеряя разность потенциалов на концах  $R8$  (гнезда  $\Gamma4$ ,  $\Gamma5$ ), можно найти ток стока  $I_C$  транзистора  $VT2$ .

Напряжение  $U_{БЭ}$  (на  $VT1$ ) можно измерить, подключая вольтметр к гнезду  $\Gamma2$ ; а напряжение  $U_{3И}$  (на  $VT2$ ) - к гнезду  $\Gamma6$ . Сопротивления  $R5$  и  $R11$  играют роль защиты (ту же, что и  $R9$ ).

Для измерения  $U_{КЭ}$  (на  $VT1$ ) необходимо подключить вольтметр к  $\Gamma3$ , а для измерения  $U_{СИ}$  (на  $VT2$ ) - к  $\Gamma4$ . И, наконец, для нахождения тока базы  $I_B$  (для  $VT1$ ) необходимо измерить разность потенциалов на концах сопротивления  $R4$ , включенного в цепь базы, (гнезда  $\Gamma1$ ,  $\Gamma2$ ). Сопротивление  $R5$  аналогично играет роль защиты.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3. Общий провод вольтметра подключается к гнезду  $\Gamma7$  (0, корпус) и не отключается в процессе измерений!**

Поэтому мы измеряем потенциалы остальных гнезд относительно корпуса. Например, чтобы найти напряжение на  $R2$ , необходимо подключить другую клемму вольтметра (с белой изоляцией) к  $\Gamma1$ . Снять значение потенциала  $\varphi_1$  гнезда  $\Gamma1$ , а лишь потом подключить к гнезду  $\Gamma2$  и снять значение его потенциала  $\varphi_2$ . Тогда разность потенциалов на концах  $R4$  равна  $-\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ .

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

**УПРАЖНЕНИЕ 1.** Снятие входных характеристик полевого транзистора  $I_C = f(U_{3И})$  при  $U_{СИ} = const$ .

1) Данные запишите в таблицу 1.

Таблица 1.

$\varphi_6 (U_{зи}), В$	$\varphi_4 (U_{си}), В$	$\varphi_5$	$\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4$	$I_c = \Delta\varphi/R_8$
-2,5				
-2,2				
-2,0				
-1,7				
-1,5				
-1,3				
-1,1				
-1,0				
-0,9				
-0,5				
-0,3				

2) Включите УЛС (универсальный лабораторный стенд) и вольтметр в сеть и прогрейте в течение 10 мин.

3) Подсоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.

4) Подключите вольтметр к гнезду Г6 и установите с помощью потенциометра R12 минимальное напряжение между затвором и источником  $U_{зи} = -2-3 В$ . (т.е. потенциал затвора  $\varphi_6$ , измеряемый на гнезде Г6).

5) Подключите вольтметр к гнезду Г4 и установите с помощью потенциометра R6 потенциал стока  $\varphi_4 = 5 В$  (т.е. напряжение между стоком и истоком  $U_{си} = 5В$ ).

6) Проверьте снова величину  $U_{зи}$  (т.е. потенциал  $\varphi_6$  гнезда Г6) и, если нужно, установите расхождение с прежним значением. Затем снова проверьте величину  $U_{си}$  (т.е. потенциал  $\varphi_4$  гнезда Г4) и т.д.

Всю эту процедуру назовем **МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**. Эта процедура необходима, т.к. изменение одного параметра приводит к изменению другого.

7) При помощи вольтметра измерьте потенциал  $\varphi_4$  (гнездо Г4) и  $\varphi_5$  (гнездо Г5) на концах сопротивления R8. По разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4$  определите ток стока  $I_c$  протекающий через сопротивление R8 по формуле

$$I_c = \Delta\varphi/R_8 \quad (10)$$

где  $R_8 = 200 \text{ Ом}$ .

8) Измените напряжение  $U_{зи}$  (т.е. потенциал  $\varphi_6$  гнезда Г6) и, корректируя  $U_{си}$  на требуемом уровне ( $\varphi_4 = 5В$ ), найти новое значение тока стока  $I_c$ .

9) Снимите зависимость тока стока  $I_c$  от напряжения  $U_{зи}$ , оставляя неизменным  $U_{си}$ .

10) Снимите аналогичную зависимость при  $U_{си} = 10 В$ , записывая данные в аналогичную таблицу 2.

11) По результатам измерений постройте графики на миллиметровой бумаге.

12) Найти крутизну характеристики транзистора S по формуле

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи} \quad (11)$$

13) Найти коэффициент усиления транзистора по напряжению.

**УПРАЖНЕНИЕ 2.** Снятие выходной характеристики полевого транзистора ( $I_c = f(U_{си})$  при постоянном напряжении затвора  $U_{зи} = const$ ).

1) Данные занесите в следующую таблицу 3.

$U_{зи} = 0В,$		
$\varphi_4(U_{си})$	$\varphi_5$	$I_C$
0		
0,4		
0,8		
1,0		
1,5		
2,0		
4,0		
6,0		
8,0		

Входная цепь (напряжение  $U_{си}$ ) будет слабо влиять на выходную (напряжение  $U_{зи}$ ), в связи с этим корректировка не понадобится.

- 2) Присоедините общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединяйте его во время измерений.
- 3) Подключите вольтметр к гнезду Г6 и установите с помощью потенциометра R12 потенциал затвора  $\varphi_6 = 0В$  (т.е. напряжение между затвором и истоком  $U_{зи} = 0В$ ).
- 4) Подключите вольтметр к гнезду Г4 и установите с помощью потенциометра R6 потенциал стока  $\varphi_4 = 0В$  (т.е. напряжение между стоком и истоком  $U_{зи} = 0В$ ).
- 5) Измерьте потенциалы  $\varphi_4$  (гнездо Г4) и  $\varphi_5$  (гнездо Г5), запишите данные в таблицу 3. По разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_5 - \varphi_4$  определите ток стока  $I_C$  по формуле (10).
- 6) Повторите измерения, изменяя напряжения  $U_{си}$  (гнездо Г4) от 0,5 до 8 В и измеряя потенциал  $\varphi_5$ . Напряжение  $U_{зи}$  должно оставаться неизменным.
- 7) Рассчитайте ток силы  $I_C$  по формуле (10) и данные занесите в таблицу 3.
- 8) Постройте аналогичные таблицы 4 и 5.
- 9) Снимите аналогичные зависимости при напряжениях  $U_{зи} = 0,5 В$  и  $U_{зи} = -0,5 В$ , подавая сначала на гнездо Г6 потенциал  $\varphi_6 = 0,5 В$ , а затем устанавливая  $\varphi_6 = -0,5 В$ .
- 10) Постройте график всех трех зависимостей на миллиметровой бумаге.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой полевые транзисторы? Какие существуют типы полевых транзисторов?
2. Какую роль играют сток, исток и канал полевого транзистора?
  3. Какие носители заряда являются основными и не основными в каналах транзисторов р- и п-типа?
4. Какие физические процессы происходят при работе полевого транзистора?
5. В чем отличие полевого транзистора от биполярного транзистора?
6. По какой схеме и как снимаются входные характеристики полевого транзистора?
7. По какой схеме и как снимаются выходные характеристики полевого транзистора?
8. Что такое коэффициент усиления транзистора по напряжению и как он определяется?
9. Что такое крутизна характеристики полевого транзистора и как она определяется?

### ЛИТЕРАТУРА

[3], §1.3, с. 89-109; [6], §25, с.71-74; [2], §6.3, с.129-136 [1], §7.1-7.5, с.168-178.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ОУ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Познакомиться с принципом устройства операционных усилителей.

2. Изучить работу операционного усилителя в различных режимах.

**ОБОРУДОВАНИЕ:** Лабораторный стенд. Набор соединительных проводов, генератор напряжений (синусоидальных, прямоугольных, треугольных).

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Операционный усилитель - это специальный усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления. Результирующие характеристики ОУ зависят от глубины внешней отрицательной обратной связи. (ООС). ОУ имеет достаточно пологую частотную характеристику, что обеспечивается непосредственной связью между каскадами. Полоса пропускания занимает область от нуля до очень высоких частот. Наличие ООС ослабляет шумы и частотные искажения сигнала.

Рассмотрим основные характеристики идеального ОУ.

1. Входное сопротивление ОУ равно бесконечности, входные токи равны нулю.

$$R_{BX} = \infty, i_+ = 0, i_- = 0.$$

2. Выходное сопротивление равно нулю. Это означает, что со стороны выхода ОУ является источником напряжения.

$$R_{ВЫХ} = 0.$$

3. Коэффициент усиления по напряжению равен бесконечности.

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \infty.$$

Если выводы ОУ не замкнуты, то в режиме усиления дифференциальный сигнал равен нулю.

4. В режиме насыщения напряжение на выходе равно напряжению питания. Знак определяется полярностью входного напряжения. В режиме насыщения дифференциальный сигнал не равен нулю.

5. Сдвиг фазы сигнала не действует на ОУ.

6. Напряжение смещения нуля равно нулю.

Свойства идеального усилителя соответствуют принципу виртуального замыкания входных зажимов усилителя. Это означает, что напряжение между зажимами равно нулю, как это происходит и при обычном замыкании. Однако при обычном замыкании по цепи течет ток, этого не происходит при виртуальном замыкании. Поэтому для тока виртуальное замыкание эквивалентно разрыву цепи.

Для реального усилителя входное сопротивление составляет десятки мегаом, а выходное единицы и десятки Ом.

Рассмотрим теперь устройство ОУ, блок-схема которого приведена на рис. 1.

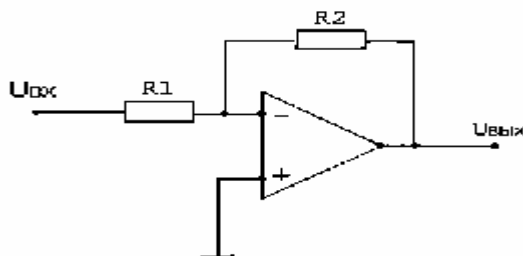


Рис.1

Как уже упоминалось выше ОУ - это многокаскадный усилитель постоянного тока. Принципиальная схема ОУ достаточно сложна. Как минимум оно включает три каскада: входной каскад представляет собой дифференциальный усилитель, обеспечивающий основные характеристики ОУ; далее следует промежуточный усилитель и затем выходной каскад.

Особенностью дифференциального усилителя является то, что сигнал подается одновременно на два входа, при этом выходной сигнал всегда пропорционален разности потенциалов на входах (дифференциальному сигналу). Поэтому синфазные сигналы взаимно ослабляются. В случае возникновения шумового сигнала в цепи он передается на выход в той же фазе, поэтому на входе усилителя этот сигнал практически полностью гасится, что оказывает влияния на полезный входной сигнал. Входное сопротивление дифференциального усилителя достаточно высокое.

Для обеспечения устойчивой работы ОУ и передачи сигнала с выхода на вход в ОУ используется ООС (отрицательная обратная связь).  $R_2$  - является сопротивлением ООС. Сигнал ОС поступает на вход ОУ, усиливается и переходит на выход в противофазе. Если коэффициент усиления усилителя без ООС  $K_0$ , то

$$U_{ВЫХ} = K_0 U_{ВХ}$$

При наличии ООС, коэффициент передачи с выхода на вход с учетом глубины ООС  $\beta$  равен:

$$K = \frac{K_0}{1 - K_0 \beta},$$

$K_0 \beta$  - называют фактором ОС.

Если  $\beta$  много больше единицы, то выходное напряжение определяется только значением токов, протекающих по сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$  и входного напряжения:

$$U_{ВЫХ} = \frac{R_2}{R_1} U_{ВХ}.$$

Свое название операционные усилители получили в связи с тем, что схемы на них основе способны выполнять преобразование входного сигнала по математическим алгоритмам (интегрирование, суммирование, дифференцирование и т.д.).

## 1. ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Схема усилителя представлена на рис. 2. Коэффициент передачи такого усилителя можно определить, используя принцип виртуального замыкания.

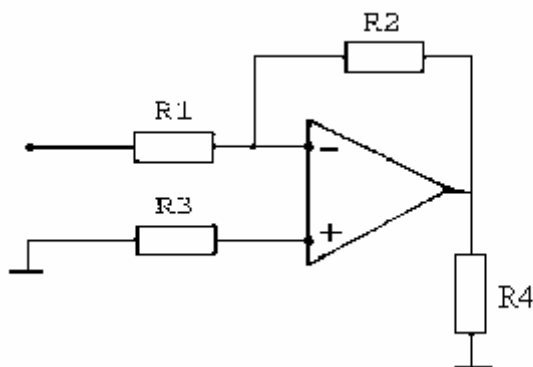


Рис.2.

Входной ток с учетом ООС

$$I'_{ВХ} = \frac{U'_{ВХ}}{R_1}$$



выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = -I'_{ВХ} Z_{oc} - U_{oc}$ . Отсюда коэффициент передачи

$$K' = \frac{U_{ВЫХ}}{U'_{ВХ}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

В реальном усилителе входной ток является суммой токов, протекающих через входное сопротивление и сопротивление в цепи обратной связи. Кроме того, ток, протекающий через входное сопротивление, определяется сопротивлением

$$I_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{R_1 + R_2 / (1 + K)},$$

$K$  - коэффициент передачи ОУ без ООС.

С учетом вышесказанного относительная погрешность определения коэффициента передачи может быть определена

$$\frac{\Delta K'}{K'} \approx -\frac{R_2}{(1 - K)} \left( \frac{1}{R_{ВХ}} + \frac{1}{R_1} \right).$$

Входное сопротивление схемы  $Z_{ВВХ} = R_1$ , выходное  $Z_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 + \beta K'}$ ,  $\beta$  - глубина ООС.

## 2. НЕ ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Не инвертирующий усилитель можно получить, если подать входное напряжение на не инвертирующий вход (+), а цепь ООС подключить к инвертирующему входу (-) (рис. 3).

Напряжение ОС снимается с делителя

$$U_{ВХ} = \frac{U_{ВЫХ} R_1}{R_1 + R_2}.$$

Входное сопротивление схемы равно сопротивлению ОС

$$K_{ВХ} = \frac{R_{ВХ} K R_1}{R_1 + R_2}.$$

## 3. ПОВТОРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ

В повторителе напряжения сопротивление ООС равно нулю.

Тогда  $R_{oc} = 0$  и коэффициент передачи

$K' \approx 1$ ,

а относительная погрешность

$$\frac{\Delta K'}{K'} = \frac{1}{K}.$$

Напряжение с входа на выход передается без изменения фазы.

## 4. ИНТЕГРАТОР

Схема интегратора представлена на рис.4.

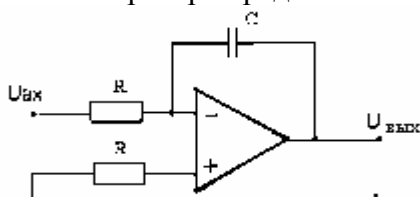


Рис.4.

В силу виртуального заземления, если напряжение на входе  $U_{BX}$ , то ток, текущий через резистор  $R$  будет равен

$$I = \frac{U'_{BX}}{R}.$$

Этот ток заряжает конденсатор, напряжение на котором является одновременно и выходным напряжением схемы.

$$U_{ВЫХ} = -\frac{1}{R} \int U'_{BX} dt.$$

## 5. ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩАЯ СХЕМА

Дифференцирующая схема представлена на рис.5.

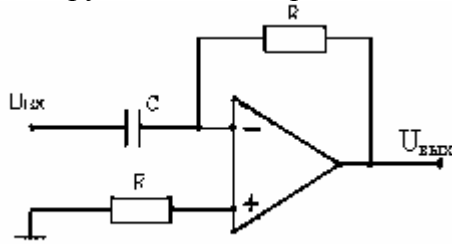


Рис.5.

Входным является напряжение на конденсаторе. Ток, заряжающий конденсатор

$$i = C \frac{dU'_{BX}}{dt}.$$

Этот ток полностью течет через сопротивление  $R$  и создает выходное напряжение.

$$U_{ВЫХ} = -RC \frac{dU'_{BX}}{dt}.$$

## 6. ЛОГАРИФМИРОВАНИЕ СИГНАЛА

Логарифмирующая и потенцирующая схемы показаны на рис.6 и рис.7 соответственно. Для получения логарифмической зависимости в схему усилителя вводят нелинейный элемент - диод или биполярный транзистор.

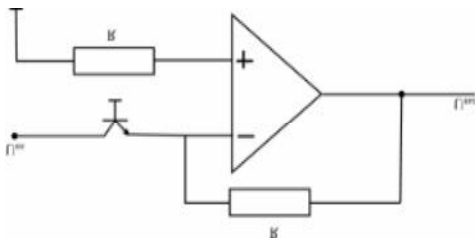


Рис.6.

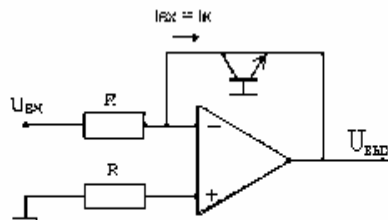


Рис.7.

Если ток в цепи ОС равен нулю, то входной ток будет определяться током коллектора транзистора.

$$I_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{R} = I_k = I_{k0} \left[ \exp\left(\frac{qU_{БЭ}}{\eta kT}\right) - 1 \right],$$

где  $I_{k0}$  - тепловой ток коллектора;

$U_{БЭ}$  - напряжение база-эмиттер;

$kT$  - энергия теплового движения;

$q$  - заряд электрона;

$\eta$  - коэффициент рекомбинации.

Выходное напряжение при этом определится:

$$U_{ВЫХ} = U_{ЭБ} = \eta \frac{kT}{q} [\ln(I_k) - \ln(I_{ko})],$$

$$\eta \frac{kT}{q} = \varphi_T - \text{температурный потенциал.}$$

Тогда окончательно имеем

$$U_{ВЫХ} = \varphi_T \left[ \ln \left( \frac{U_{ВХ}}{R} \right) - \ln(I_{ko}) \right].$$

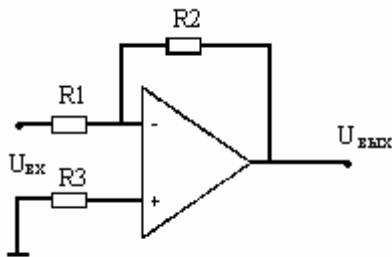
В потенцирующем усилителе расчеты аналогичны.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

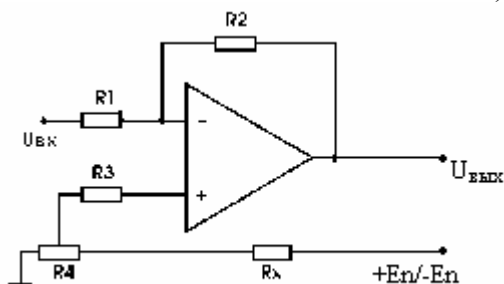
**ИЗМЕРЕНИЕ** ( $U_{СМ}$ ), ( $f_1$ ), ( $I_{ВХ}$ ), ( $\Delta I_{ВХ}$ )

а) Соберите схему по рис.8,а с биполярным ОУ (140УД7, 140УД708) при значениях резисторов  $R_1=R_3=100$  Ом,  $R_2=10$  кОм. Напряжение питания  $\pm 6 \div 12$  В.

Заземлите вход. Напряжение  $U_{СМ}$  определяется как разность напряжений на входах, при котором напряжение на выходе равно нулю. По измеренному ( $U_{ВЫХ}$ ), найдите ( $U_{СМ}$ ) и сравните его со справочными данными. По справочным данным оцените влияние входных токов смещения. Так как измеряется  $U_{СМ}$ , то напряжение сдвига, вызванное разностью входных токов, должно быть много меньше  $U_{СМ}$ .



а)



б)

Рис.8. Инвертирующий усилитель (а), балансировка ОУ по входу (б)

б) Для компенсации смещения нуля по измеренному  $U_{СМ}$  рассчитайте величину резистора  $R_x$ , а по знаку  $U_{СМ}$  - полярность напряжения питания, к которому его следует подключить (рис. 8,б). Сбалансируйте ОУ.

в) Разомкните цепь ООС, т.е. уберите  $R_2$  и попытайтесь установить на выходе напряжение, близкое к нулю. Объясните результат.

г) Не меняя положения движка  $R_4$  отсоедините его от схемы и измерьте сопротивление между средним и нижним выводами ( $R_Y$ ). Вычислите падение напряжения на  $R_Y$  (компенсирующее напряжение) и сравните с предыдущим (пункт а).

д) Для сбалансированного ОУ, когда на среднем вводе переменного резистора  $R_4$  установлено напряжение, равное  $(-U_{CM})$ ; замените резистор  $R_3$  на номинал 100 кОм. Измерив  $U_{ВЫХ}$ , вычислите ( $I_{ВХ+}$ ) и сравните результат со справочными данными.

е) Замените резистор  $R_1$  тоже на 100 кОм, а  $R_2$  - на 1 МОм. По Измеренному  $U_{ВЫХ}$  оцените разность входных токов ( $\Delta I_{ВХ}$ ).

По результатам выполнения практических заданий составьте итоговую таблицу для измеренных параметров ОУ ( $U_{CM}$ ), ( $I_{ВХ}$ ), ( $\Delta I_{ВХ}$ ), ( $f_i$ ), ( $\Delta U_{CM}/\Delta T$ ), ( $dU_{CM}/dt$ ) в сравнении со справочными данными.

#### НАБЛЮДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА.

Соберите схему по рис. 9 при значениях  $R_1=R_3=100$  Ом,  $R_2=100$ кОм,  $C=0,1$  мкф. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ. На выходе ОУ должны наблюдаться плавные уходы напряжения в ту или другую сторону (так называемый “шум 1/F”). Подержите минутную палец на корпусе ОУ, не касаясь выводов и деталей. Для уменьшения наводок (ваше тело в данном случае работает как антенна) палец другой руки удерживайте “земле”. Вы увидите систематический уход  $U_{ВЫХ}$ , если случайно вам не попался ОУ с нулевым температурным дрейфом. Оцените грубо ( $\Delta U_{CM}/\Delta T$ ).

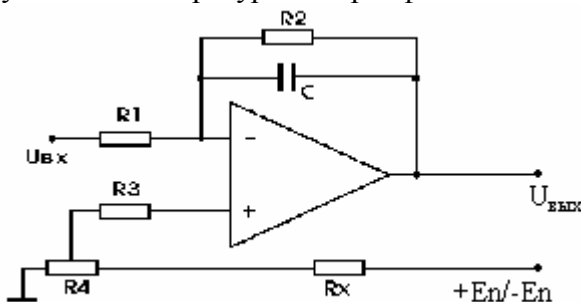


Рис.9

*Примечание.* Конденсатор  $C$  служит для уменьшения шумов и наводок.

#### ИНТЕГРАТОР.

В схему по рис. 9 установите резисторы  $R_1=R_3=10$  КОм,  $R_2=1$ МОм оставив  $C = 0,1$  мкф и цепь балансировки без изменений. Заземлите вход и тщательно сбалансируйте ОУ.

Подайте на вход прямоугольный сигнал со скважностью 2 (меандр) амплитудой 1 В, частотой 1 кГц. Сигнал на выходе должен иметь треугольную форму с хорошей линейностью. Рассчитайте по формуле (3) амплитуду треугольного сигнала на выходе и сравните с измеренным значением.

#### КОМПАРАТОР С ГИСТЕРЕЗИСОМ.

Соберите схему на рис. 10. Подайте на вход синусоидальный или треугольный сигнал амплитудой 100 мВ, частотой 100÷200 Гц. Вращая резистор  $R_4$ , получите на выходы сигналы различной скважности.

В режиме большого входного сигнала ( $U_{ВХ} \sim 1\div 3$  В) определите скорость нарастания выходного напряжения ( $dU_{C_M}/dt$ ).

Подобная схема используется в качестве устройства для подсчета импульсов с амплитудой больше заданного уровня. Положительная ОС предотвращает срабатывание схемы от шумов и наводок, уменьшает фронты импульсов на выходе.

*Вопрос.* Какова минимальная амплитуда входного сигнала при данных номиналах и  $E_{П}$ ? Как зависит длительность импульсов на выходе от глубины положительной ОС?

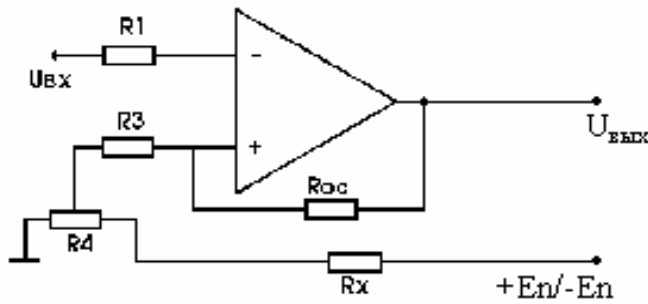


Рис. 10. Компаратор с гистерезисом

### ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.

Соберите схему по рис. 10.а, добавив в нее цепь балансировки. Величину резисторов можно выбрать в диапазоне 3÷100 кОм. Подавая на вход синусоидальный сигнал различной амплитуды и частоты, наблюдайте сигнала обоих выходах. Определите минимальную амплитуду сигнала на частоте 1 кГц и верхнюю частоту сигнала с амплитудой 1 В, при которых форма сигнала на выходе визуально не отличается от рис. 11.

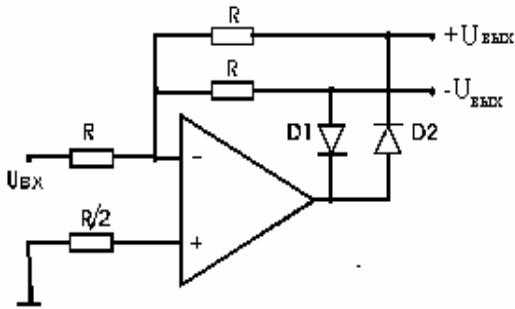


Рис.11.

### АНАЛОГОВЫЙ СУММАТОР

Схема аналогового сумматора представлена на рис.12.

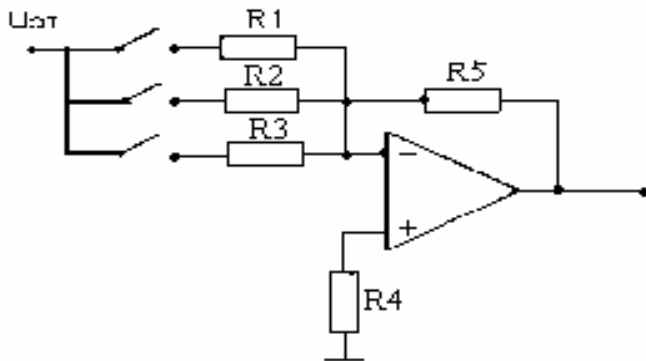


Рис.12.

Согласно закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{oc}$$

$$U_{ввх} = R_{oc} \left( \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2} + \frac{U_3}{I_3} \right)$$

Если величины сопротивлений  $R_i$  выбрать равными, то на выходе получим сумму напряжений. Если взять сопротивления кратными:  $R_i = R \cdot 2^{i-1}$ , а на входы через ключи, управляемые цифровым кодом, подать эталонное напряжение, то получим простейший цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Построить схему сумматора так, чтобы выполнялось простое суммирование сигнала и цифро-аналоговое преобразование. Для работы такой схемы необходимо подвести питание усилителя через балансную цепь, как это осуществлялось в предыдущих экспериментах. Результаты записать в отчет.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое операционный усилитель?
2. В чем состоит принцип виртуального заземления?
3. Свойства отрицательной обратной связи (ООС).
4. Основные свойства ОУ.
5. Почему усилитель получил название операционного?
6. Каким образом строятся усилители для проведения операций суммирования, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования, потенцирования?
7. Перечислить основные характеристики ОУ.

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1], §11.4-14.6; [2], §7.4; [3], §2.5; [4], §3.6; [5], §2.2.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БАЗОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Изучить принцип работы элементов одноступенчатой логики: “И”, “ИЛИ”, “НЕ”.

2. Изучить принцип работы элементов двухступенчатой логики: И-НЕ, ИЛИ-НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Любые цифровые узлы состоят из логических элементов, выполняющих логические операции: сложение, умножение, отрицание.

Операция логического сложения называется дизъюнкцией (элемент ИЛИ - схема объединения). Эта операция записывается выражением

$$Y = X1 + X2 \quad (1)$$

Схема элемента ИЛИ представлена на рис. 1а, обозначение на схеме представлено на рис. 1б.

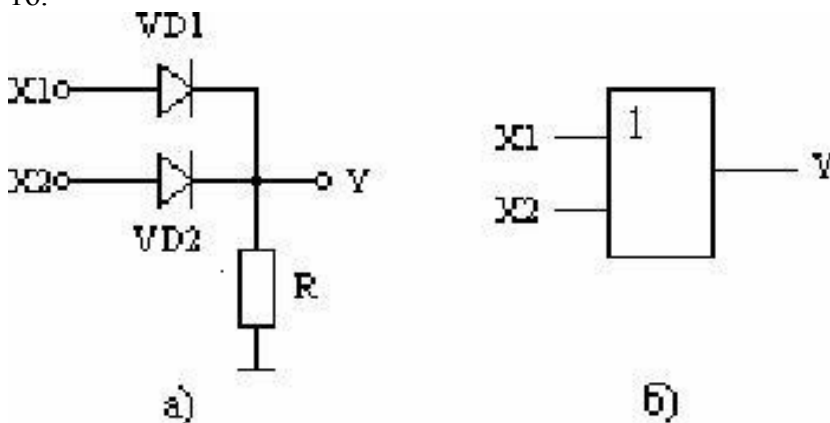


Рис. 1

Таблица истинности

$X1$	$X2$	$Y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

На выходе элемента “ИЛИ” появляется логическая единица, когда на одном из входов будет логическая единица. Рассмотрим работу схемы. Пусть на вход  $X1$  подана логическая единица, на вход  $X2$  логический ноль, тогда через диод  $VD1$  будет протекать ток, а диод  $VD2$  будет закрыт. Через резистор  $R$  течет ток, и потенциал выходной точки повышается. На выходе  $Y$  будет логическая единица.

Операция логического умножения (схема И-конъюнктор) записывается в виде выражения

$$Y = X1 \cdot X2 \quad (2)$$

Схема элемента и его условное обозначение на схемах изображена на рис. 2.

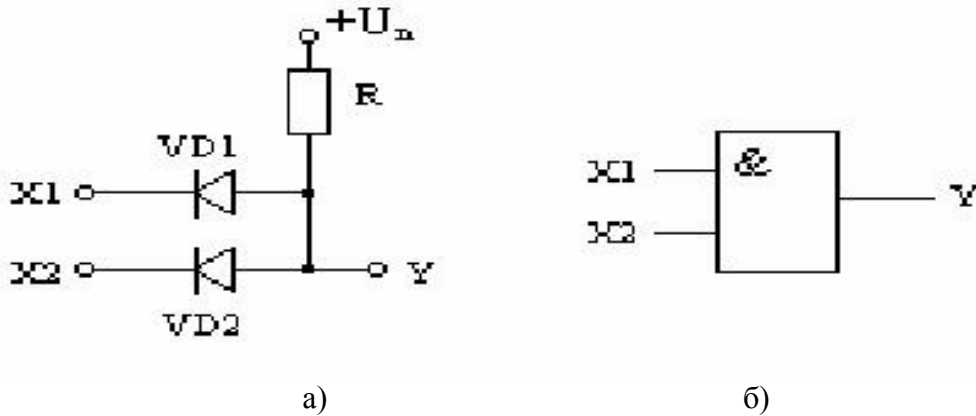


Рис.2

Таблица истинности:

$X1$	$X2$	$Y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

На выходе элемента “И” будет логическая единица, если на вход  $X1$  подать логическую единицу, а на вход  $X2$  логический ноль, то диод  $VD1$  закроется, а диод  $VD2$  откроется и в цепи резистора  $R$  потечет ток, в результате потенциал точки  $Y$  понижается и на выходе будет логический ноль. Только, если на оба входа подать логическую единицу, тока в цепи не будет и напряжение питания  $U_{II}$  полностью подается на выход схемы.

Операция логического отрицания НЕ выполняется с помощью схемы, называемой инвертором.

$$Y = \bar{X} \quad (3)$$

Простейшей схемой, реализующей эту операцию, является транзисторный ключ рис. 3а, б.

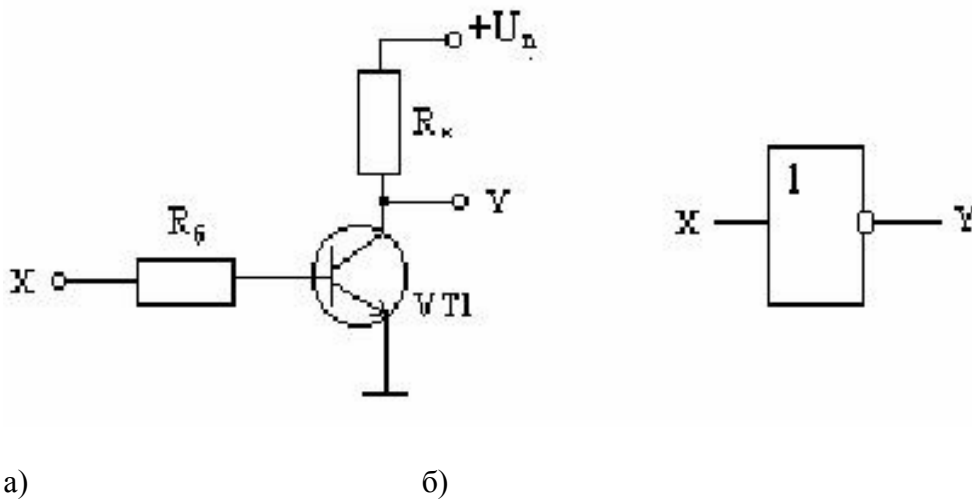


Рис.3



$X$	$Y$
0	1
1	0

Временные диаграммы элементов приведены на рис. 4.

Элементы, сочетающие в себе две или более логических операций, называются элементами двух- или многоступенчатой логики. К ним относятся элементы И-НЕ, ИЛИ-НЕ и более сложные схемы, одной из которых является схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, другое название этой схемы – схема проверки на четкость, или полусумматор по модулю два. Реализация таких операций осуществляется построением более сложных схем.

Операция ИЛИ-НЕ (элемент Шеффера) - это получение результата логического суммирования с дальнейшей инверсией результата.

$$Y = \overline{X1 + X2} \quad (4)$$

Таблица истинности:

$X1$	$X2$	$Y$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

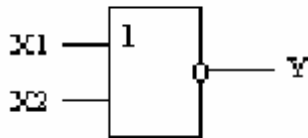


Рис. 5

Элемент И-НЕ (Элемент Пирса) выполняет операцию логического умножения с инверсией.

$$Y = \overline{X1 \cdot X2} \quad (5)$$

Таблица истинности

$X1$	$X2$	$Y$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

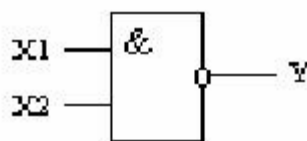


Рис. 6

Элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ является полусумматором по модулю два, т.е. выполняет операцию сложения двух логически чисел. Схема выполняется соединением простейших базовых элементов рис. 7а, условное обозначение на схемах представлено на рис. 7б.

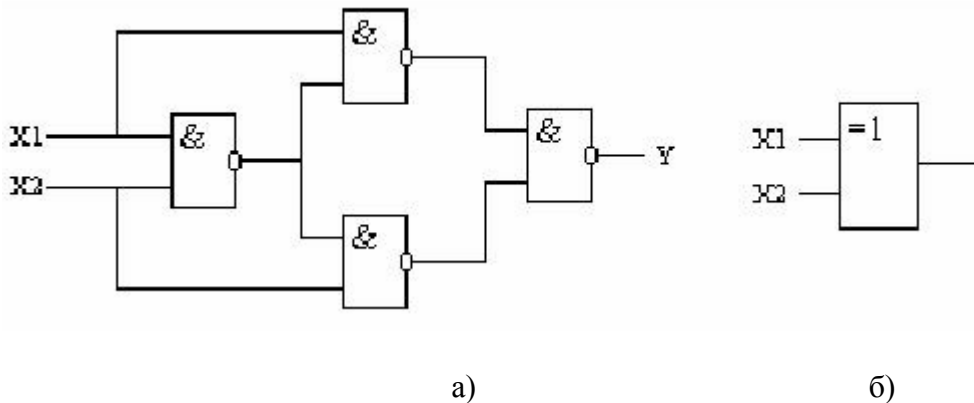


Рис. 7

Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ называется еще схемой проверки на четность, что хорошо видно из таблицы истинности.

Таблица истинности

X1	X2	S	P
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	1

Логическая единица на выходе схемы появится, только если на входах будет подана хотя бы одна единица.

Схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ является основным элементом при построении схем сумматоров.

### **ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде. Основные логические схемы имеют несколько входов и выходов для выполнения различных соединений.

На входы схем от источника напряжения через потенциометры подаются входные сигналы.

Во входные и выходные цепи включены светодиоды, чтобы регистрировать появление логической единицы. Уровень сигнала на входе и выходе можно регистрировать с помощью цифрового вольтметра. Сборка схем для изучения их работы осуществляется с помощью соединительных проводов.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

#### **УПРАЖНЕНИЕ 1.**

Изучение работы элементов И, И-НЕ

1. От источника питания на входы схемы через резисторы R и R подавать различные комбинации сигналов и проверить таблицу истинности. При подаче логической единицы, светодиод на входе загорается.

2. С помощью вольтметра измерить уровни напряжений логической единицы и логического нуля. Проводить одновременно с проверкой таблицы истинности.

3. Записать в отчет уровни логического нуля и единицы.
4. Присоединить к схеме И схему НЕ и проверить таблицу истинности полученной схемы.
5. Выполнить п.п. 2 и 3 для схемы И-НЕ.

#### УПРАЖНЕНИЕ 2.

Изучить работу схем ИЛИ и ИЛИ-НЕ.

Выполнить пункты 1-5 для предыдущего упражнения: сигналы на входы схемы ИЛИ подаются через резисторы  $R$  и  $R$ .

#### УПРАЖНЕНИЕ 3.

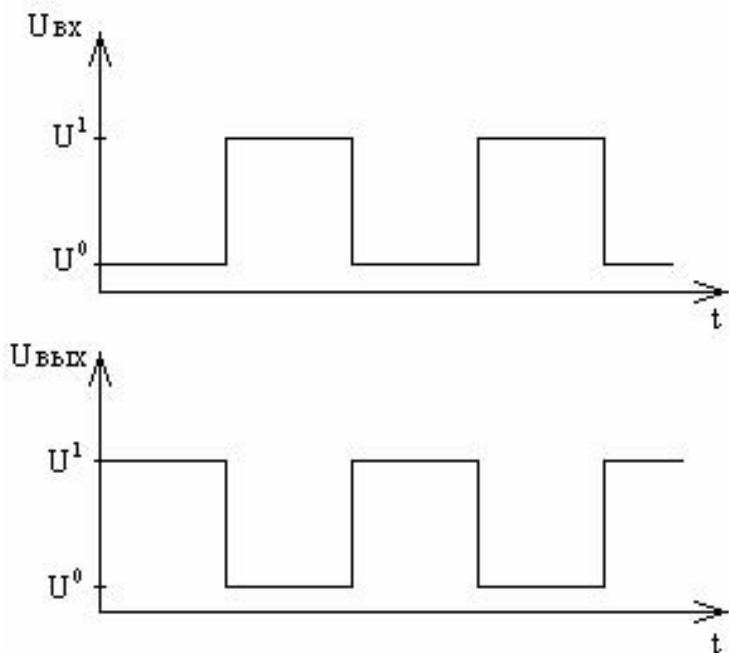
Изучение работы схемы НЕ.

1. На вход схемы через резистор  $R$  подать логический ноль, а затем логическую единицу и зафиксировать сигнал на выходе.
2. Аналогично п. 2 упражнений 1 и 2 измерить уровень логических нуля и единицы.
3. Записать результаты в отчет.

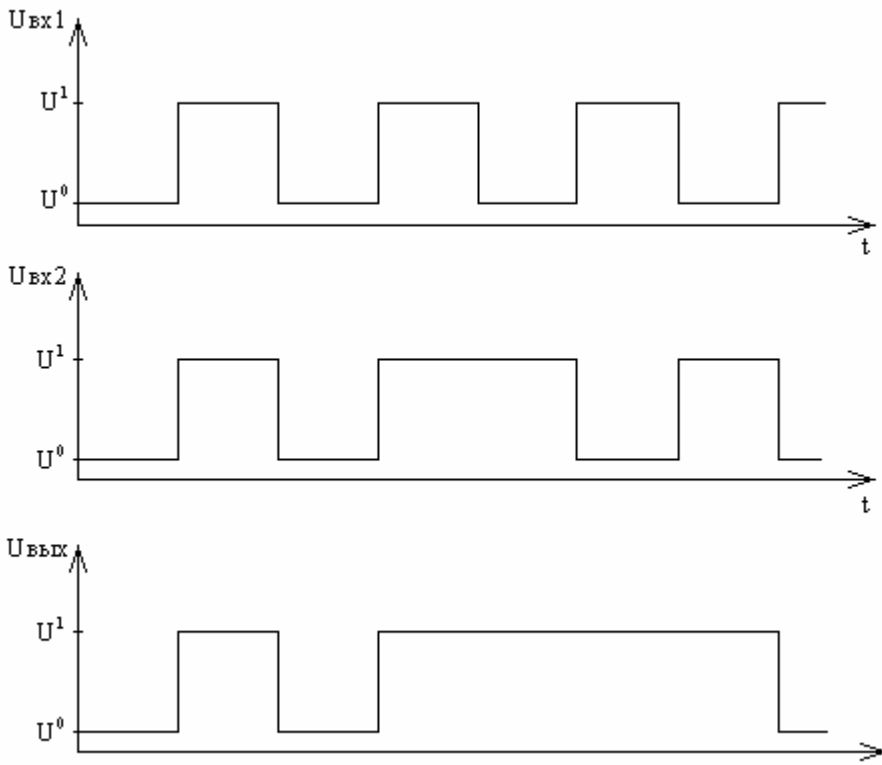
#### УПРАЖНЕНИЕ 4.

Изучение работы схемы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

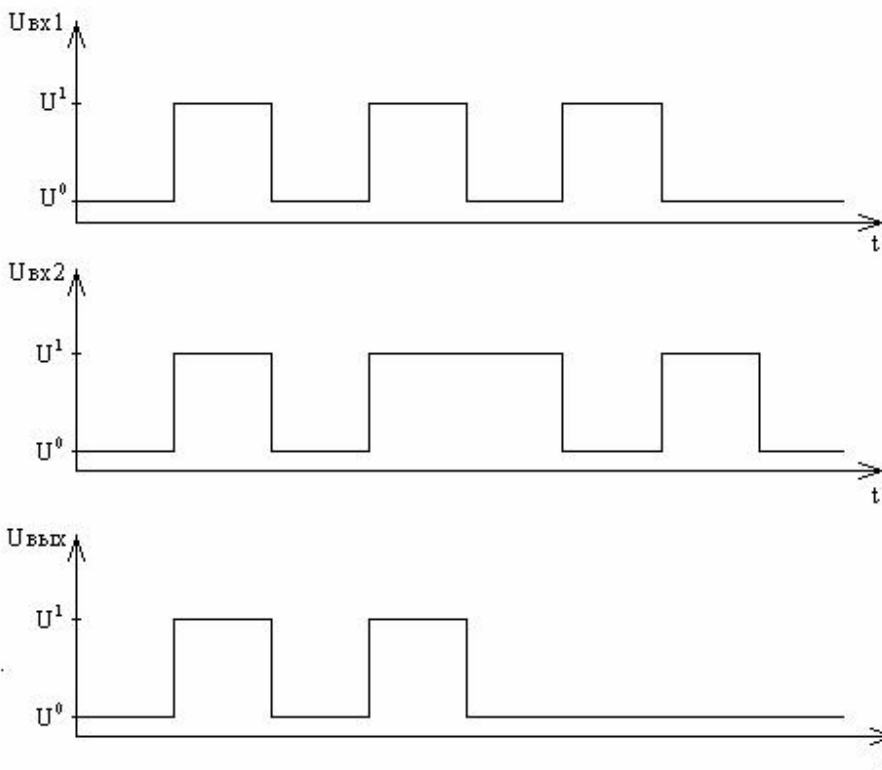
1. Из элементов И-НЕ собрать схему ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ по рис.
2. Проверить таблицу истинности. На входы схемы через резисторы  $R$  и  $R$  подавать указанные в таблице истинности комбинации сигналов. Комбинировать появление соответствующих сигналов на входе.



а) элемент НЕ



б) элемент ИЛИ



в) элемент И

Рис. 4

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Схема и принцип работы схемы И.
2. Схема и принцип работы схемы ИЛИ.
3. Схема и принцип работы схемы НЕ
4. Элементы двухступенчатой логики схемы И-НЕ, ИЛИ-НЕ.
5. Схема проверки на четность ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

### **ЛИТЕРАТУРА**

[3], §3.3, с.324-326; [4], §6.2, с.262-266; [5], §8.3, 8.4, 8.8, с.174-179, 183-186.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРИГГЕРОВ

- ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Изучить работу триггерных схем: триггера с базовыми связями, асинхронного и синхронного  $RS$  - триггера.  
2. Изучить работу  $T$ -триггера,  $D$  - триггера и  $JK$  - триггера, выполненных в виде цифровых микросхем.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Триггеры относятся к цифровым схемам последовательностного типа, т.е. к схемам с элементами памяти. Результат на выходе схемы зависит не только от состояния входов, но и от их предыдущего состояния.

Триггер является бистабильной ячейкой, имеющей несколько входов и два выхода. Состояние выходов не изменяется сколь угодно долго, пока комбинация сигналов на входах не изменит это состояние. Таким образом, триггер является простейшим элементом памяти.

Простейший триггер можно собрать на дискретных элементах, например, на основе схемы дифференциального усилителя. Такой триггер представлен на рис. 1.

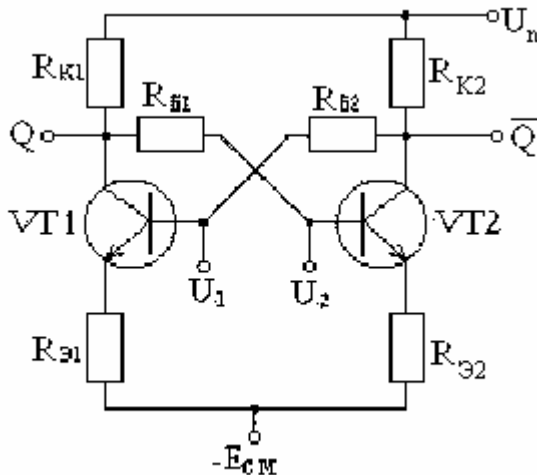


Рис. 1

Работа триггера происходит следующим образом: если на вход транзистора  $VT1$  подать сигнал логической единицы, то транзистор откроется и через резистор  $R_{К1}$  потечет ток, при этом потенциал выхода  $Q$  будет падать. Падение потенциала через резистор  $R_{Б1}$  передается на вход транзистора  $VT2$ , и транзистор  $VT2$  закрывается, потенциал точки  $\bar{Q}$  повышается до уровня напряжения питания.

Таким образом, на прямом выходе  $Q$  устанавливается логический ноль, а на выходе  $\bar{Q}$  - логическая единица.

Случайное изменение потенциала одного из выходов не может изменить общее состояние выхода, т.к. это изменение по цепи обратной связи через базовый резистор передается на второй выход и изменяет состояние другого выхода. Предположим, что триггер находится в нулевом состоянии. Если потенциал выхода  $Q$  увеличивается, то это приведет к увеличению потенциала на входе транзистора  $VT2$ , транзистор начнет открываться, в цепи коллектора потечет ток, и потенциал выхода  $\bar{Q}$  будет уменьшаться. Это уменьшение, в свою очередь, передается обратно на вход транзистора  $VT1$ , что приводит к закрытию транзистора и уменьшению тока в цепи коллектора, компенсируя случайное увеличение

потенциала выхода  $Q$ . Весь процесс протекает очень быстро и состояние триггера не успевает измениться.

В настоящее время триггеры выполняются в виде интегральных микросхем, которые широко применяются для создания различных технических устройств, например регистров, счетчиков, элементов памяти и т.д.

Рассмотрим работу простейших триггерных схем.

### RS - триггер.

RS триггер является простейшим триггером с отдельной установкой логической единицы и логического нуля (рис. 2). Триггер может быть построен с использованием схем ИЛИ-НЕ (рис. 2б) или И-НЕ (рис. 2а).

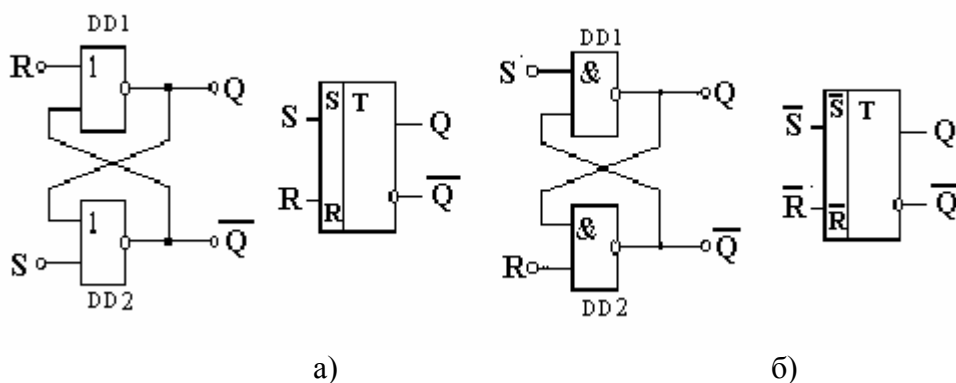


Рис. 2

Вход  $S$  является входом, устанавливающим триггер в единичное состояние. Назван буквой  $S$  от английского “Set” – устанавливать. Вход  $R$  – устанавливает триггер в нулевое состояние. Название происходит от английского “Reset” – сбрасывать. Если на вход  $S$  подать логическую единицу, то на прямом выходе  $Q$  появится логическая единица, на инверсном выходе  $\bar{Q}$  – логический ноль.

Работа триггера поясняется таблицей истинности. Таблица истинности приведена для триггера на элементах ИЛИ - НЕ. Неопределенное состояние триггера помечено крестом X. Состояние триггера не определено, если не оба входа подается логическая единица.

Таблица истинности

Время $t$		Запись информации		Время $t + 1$	
Предыдущее состояние		Входы		Результат	
Выходы		Входы		Выходы	
$Q$	$\bar{Q}$	$R$	$S$	$Q$	$\bar{Q}$
0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	x	x
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1
1	0	1	1	x	x

Таблицу истинности для триггера на элементах И-НЕ составить самостоятельно.

Если добавить еще один вход синхронизирующий, то получим схему синхронного  $RS$ -триггера рис. 3.

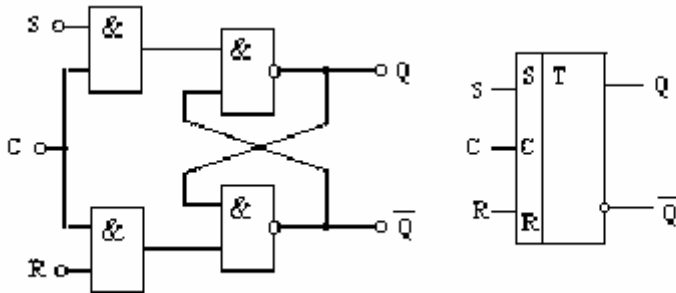


Рис. 3

Таблица истинности

$t$			$t + 1$	
$R$	$S$	$C$	$Q$	$\bar{Q}$
0	0	0	$Q(t)$	$\bar{Q}(t)$
0	1	1	1	0
1	0	1	0	1
1	1	1	x	x

В основе создания триггеров других типов лежит простейших  $RS$  триггер. Рассмотрим работу некоторых из них.

1.  $D$ -триггер. Это триггер задержки (от английского “Delay”). На рис. 4 показано условное обозначение триггера и его таблица истинности.

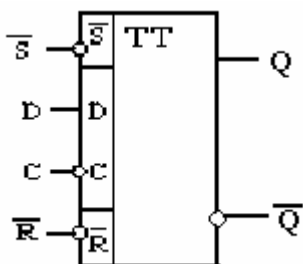
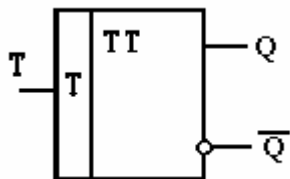


Рис. 4

$t$				$t + 2$	
$Q$	$\bar{Q}$	$D$	$C$	$Q$	$\bar{Q}$
0	1	0		0	1
0	1	1		1	0
1	0	0		0	1
1	0	1		1	0

Срабатывание триггера происходит только при появлении синхронизирующего импульса. Если триггер находится в единичном состоянии, а на входе  $D$  логический ноль, то при подаче импульса на вход синхронизации  $C$ , триггер установится в нулевое состояние. Если на входе  $D$  логическая единица, то при подаче синхроимпульса состояние триггера не изменится.

2. Триггер, состояние которого изменяется при подаче импульса на единственный вход, называется счетным или  $T$ -триггером рис.5.



$t$	$t+1$
$T$	$Q(t+1)$
$Q$	$Q(t)$

Разновидностью  $T$ -триггера является  $TV$  триггер (рис.5). Это  $T$ -триггер с дополнительным управляющим  $V$ - входом. Если на  $V$  входе логическая единица, то такой триггер работает



как счетный. Получить счетный триггер можно из  $D$ -триггера, если соединить вход  $D$  с инверсным выходом  $\bar{Q}$  рис. 6.

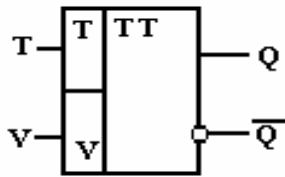


Рис. 5

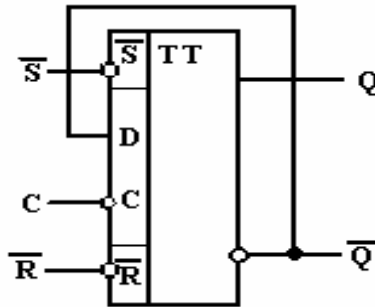
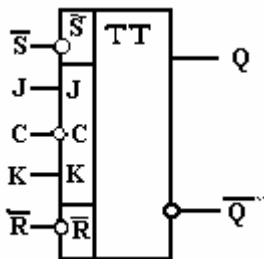


Рис.6

3. Наиболее универсальным является  $JK$ -триггер. С его помощью можно построить схему любого из триггеров.  $JK$ -триггер содержит два дополнительных входа, которые обеспечивают разнообразие режимов работы (рис.7).



$t$				$t + 1$	
Выходы		Входы		Выходы	
$Q$	$\bar{Q}$	$R$	$S$	$Q$	$\bar{Q}$
0	1	0	0		1
0	1	0	1		1
0	1	1	0		0
0	1	1	1		0
1	0	0	0		0
1	0	0	1		1
1	0	1	0		0
1	0	1	1		1

Для данного триггера возможны три режима работы:

- 1) Если на вход  $R$  подать кратковременно логический "0", то триггер принудительно установится в нулевое состояние  $Q=0$ . При подаче на вход  $S$  логического "0" триггер принудительно установится в единичное состояние ( $Q = 1$ ), независимо от состояния входов  $C, J, K$ . Одновременная подача на входы  $R$  и  $S$  логического нуля недопустима. Установка единичного или нулевого состояния обеспечивает нормальную работу -триггера.  $JK$
- 2) Если на  $J$  и  $K$  входах подана логическая 1, то при подаче перепада напряжения на вход  $C$  триггер будет работать как счетный  $T$ -триггер, т.е. в режиме деления на два. Если на входах  $J$  и  $K$  логический ноль, состояние триггера не изменится.
- 3) Если на входы  $J$  и  $K$  подан парафазный сигнал, то есть  $J = 1, K = 0$ , то триггер переключается из нулевого состояния в единичное при подаче отрицательного перепада напряжения на вход  $C$ . Если триггер в единичном состоянии, сигналы  $J = 0, K = 1$ , то при подаче отрицательного перепада напряжения на вход  $C$  он переключится в нулевое состояние.

На основе  $JK$ -триггера можно построить  $TV$ -триггер (рис.8) и  $D$ -триггер (рис.9)

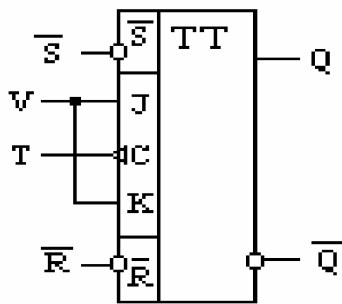


Рис. 8

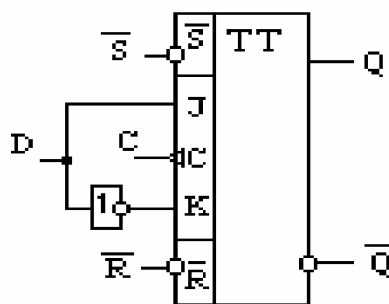


Рис. 9

### **ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

На лицевой панели лабораторной установки расположен набор элементов двухступенчатой логики И-НЕ и ИЛИ-НЕ, из которых можно построить более сложные схемы. Сигналы на выходы схем подаются через набор переменных резисторов  $R$ . На входах и выходах схем включены светодиоды  $VD-VD$ , которые загораются при подаче на них логической единицы.

Специальные триггера  $D$ ,  $T$  и  $JK$  встроены в стенд и представляют собой микросхемы.

Входы и выходы схем также выведены на панель макета. Подача сигналов на входы осуществляется через набор резисторов  $R-R$ . Контроль уровня сигналов осуществляется с помощью светодиодов  $D-D$ .

На панели расположены также выходы тактового генератора, с помощью которого на триггеры подается синхронизирующий импульс.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Собрать схему простейшего  $RS$ -триггера на стенде. От источников сигналов подавать на входы  $R$  и  $S$  различные комбинации сигналов и проверить таблицу истинности. При подаче на вход логической единицы загораются светодиоды. При появлении логической единицы на выходе также загораются светодиоды.

2. Собрать схему синхронного  $RS$ -триггера и проверить его работу аналогично п. 1.

3. Проверить таблицу истинности  $D$ -триггера. Для этого на входы  $D$  и  $C$  подавать различные комбинации сигналов. Предварительно триггер устанавливается в нулевое или единичное состояние, подавая логический 0 на вход  $\bar{R}$  или на выход  $\bar{S}$  соответственно.

4. Собрать на основе  $D$ -триггера  $T$ -триггер и проверить работу  $T$ -триггера. Подавать на вход  $T$  последовательно несколько логических единиц, после каждого сигнала контролировать состояние выходов.

5. Проверить работу  $JK$ -триггера.

Подачу на вход осуществлять в соответствии с таблицей истинности. Разделить режимы работы  $JK$ -триггера в соответствии с описанием режимов работы  $JK$ -триггера.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как работает  $RS$ -триггер. Зарисовать возможные схемы триггера и таблицы истинности.

2. Основные функции и таблицы истинности  $D$ -триггера.

3. Описать работу и пояснить таблицы истинности  $T$ -триггера.

4. Описать работу  $JK$ -триггера. В каком режиме может работать  $JK$ -триггер? Привести таблицу истинности.

5. Нарисовать схему и пояснить работу простейшего триггера, собранного на основе дифференциального усилителя с отрицательными обратными связями через базовые резисторы.

### **ЛИТЕРАТУРА**

[3], §3.5.1, с. 355-364; [4], §6.3, с.266-273; [2], §9.4, с.208-213, [5], §8.2, с.172-174.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ

#### АЦП И ЦАП

- ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** 1. Изучить работу АЦП.  
2. Изучить работу ЦАП.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Большинство цифровых схем представляют собой сложную комбинацию простейших элементов, выполняющих логические операции. Работа таких схем осуществляется при подаче сигналов в цифровом коде. Однако большинство сигналов, которые поступают для обработки с устройств первичного сбора информации, являются аналоговыми (непрерывными), поэтому перед выполнением необходимых преобразований с помощью цифровой техники такой сигнал необходимо представить в цифровом виде. Именно эту операцию выполняет аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). Обратную операцию преобразования цифрового сигнала в аналоговый осуществляют цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

В основе преобразования аналогового сигнала в цифровой лежит операция квантования (дискретизации).

Дискретизация может осуществляться двумя способами: квантованием по времени и квантованием по уровню. Квантование по времени осуществляется следующим образом: через равные промежутки времени определяется значение непрерывной функции на входе устройства дискретизации (рис. 1). Это значение затем переводится в двоичный код, с которым работает большинство цифровых устройств. Квантование по уровню: в момент достижения функцией некоторого определенного уровня фиксируется значение функции и момент времени достижения функцией данного уровня.

Таким образом, в первом случае аналоговый сигнал может быть представлен последовательностью импульсов одинаковой длительности, но разного уровня. При квантовании по уровню сигнал может быть представлен в виде импульсов различного уровня и различной длительности. Такие импульсы очень трудно представить в виде логического нуля и логической единицы. Поэтому чаще всего эти два вида квантования применяются одновременно, а полученный результат кодируется (рис. 1 а, б).

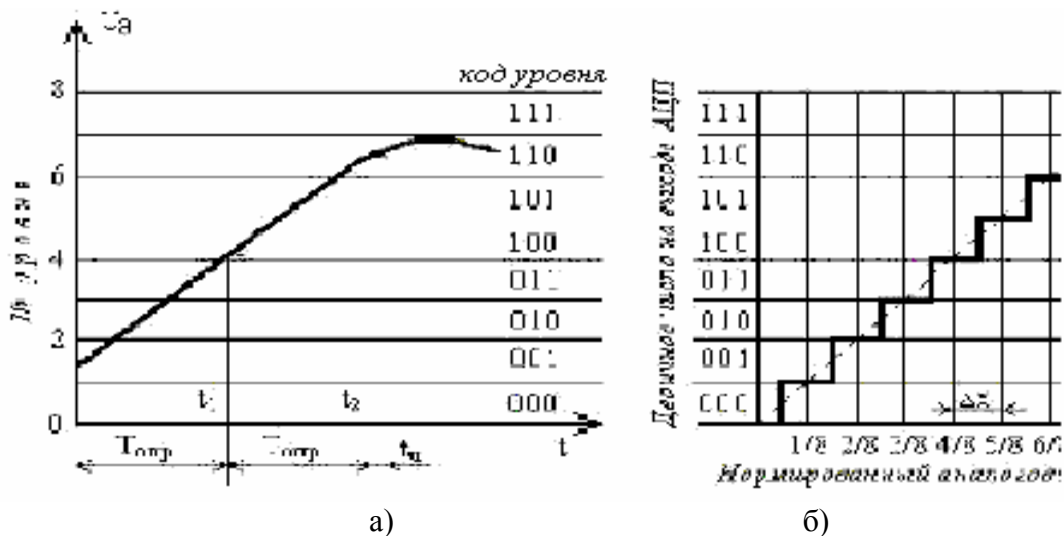


Рис.1

Диапазон значений входного сигнала разбивается на уровни, каждому из которых присваивается двоичный код. Уровни отстоят друг от друга на одинаковое расстояние (значение сигнала). С помощью специального устройства в определенный момент времени осуществляется опрос входного устройства и определяется уровень входного сигнала наиболее приближенный к ближайшему уровню. Чем больше уровней квантования и чем меньше шаг квантования, тем выше точность преобразования. Если в системе  $n$  уровней, то относительная погрешность преобразования  $\varepsilon = \frac{1}{2^n}$ .

Существует два широко распространенных способа цифро-аналогового преобразования с использованием: а) резистивной матрицы с весовым двоично-взвешенными сопротивлениями; б) матрицы с двумя номиналами сопротивлений, которую называют матрицей  $R-2R$ .

ЦАП с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями изображен на рисунке 2. Он состоит из следующих компонентов:  $n$  ключей, по одному на каждый разряд, управляемых преобразованным двоичным числом (кодом)  $N$ ; матрицы двоично-взвешенных резисторов; источника опорного напряжения  $U_{оп}$ ; входного операционного усилителя, с помощью которого суммируются токи, протекающие через двоично-взвешенные сопротивления, для получения аналогового сигнала  $U_{вых}$  пропорционально цифровому коду.

На вход  $a_0 - a_{n-1}$  ЦАП поступает двоичный сигнал с регистра, являющегося внешним устройством по отношению к ЦАП. Двоичный сигнал состоит из  $n$  двоичных разрядов:

$$T = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i,$$

где  $a_i$  - коэффициент, принимающий значение 1 или 0.

Цифро-аналоговое преобразование состоит в суммировании эталонных значений токов, соответствующих разрядам входного кода, причем в суммировании участвуют только те эталоны, для которых в соответствующих разрядах стоит единица. Для этого каждый  $i$ -ый разряд управляет ключом  $K_{li}$ , который подключается к источнику опорного напряжения  $U_{оп}$ , когда  $a_i = 1$ , или к общей шине, когда  $a_i = 0$ . Сопротивление резисторов, соединенных с ключами, таковы, что обеспечивается пропорциональность протекающего в них тока двоичному весу соответствующего разряда входного кода.

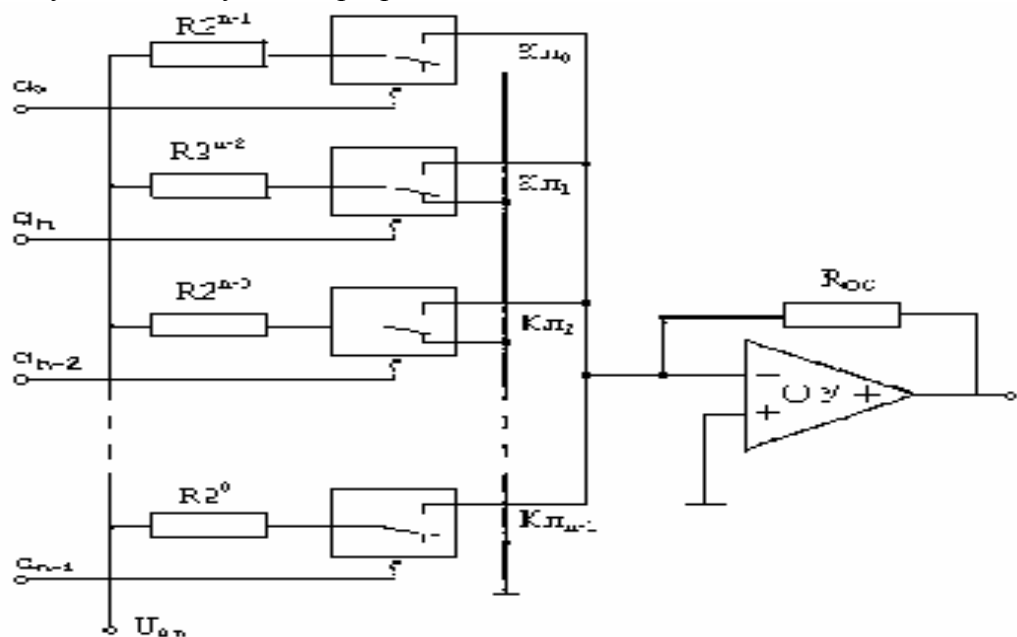


Рис. 2

Сопротивление резистора в старшем разряде имеет значение  $R$ , сопротивление следующего резистора  $2R$  и т.д. до сопротивления резистора в младшем разряде, значение которого равно  $R2^{n-1}$ . Следовательно, ток  $I$ , протекающий на входе ОУ равен

$$I = \frac{a_{n-1} \cdot U_{on}}{R} + \frac{a_{n-2} \cdot U_{on}}{2R} + \dots + \frac{a_1 \cdot U_{on}}{2^{n-2} \cdot R} + \frac{a_0 \cdot U_{on}}{2^{n-1} \cdot R} /$$

Соответственно выходное напряжение ЦАП, т.е. напряжение, снимаемое с выхода ОУ равно

$$U = -IR_{oc} = \frac{U_{on}R_{oc}}{2^{n-1} \cdot R} \sum_{l=1}^{n-1} a_l \cdot 2^l$$

и пропорционально взвешенному коду, в котором единичное значение принимают разряды, соответствующие ключам, связанным с источником  $U_{on}$ . Максимальное выходное напряжение имеет место, когда все разряды примут значение 1:

$$U_{MAX} = \left| U_{on} \frac{(2^n - 1)R_{oc}}{2^{n-1} R} \right|$$

Номиналы сопротивлений в младшем и старшем разрядах отличаются в  $2^{m-1}$  раз и должны быть выдержаны с высокой точностью. Например, для 12-разрядного ЦАП использование в старшем разряде сопротивления 10 кОм потребует включения в младший разряд преобразователя сопротивления 20 МОм. Это создает трудности при реализации ЦАП посредством интегральной технологии.

Если требуется преобразование с высокой точностью, то ЦАП с двоично-взвешенными резисторами должен содержать резисторы широкого ряда номиналов сопротивлений и подобранные для каждого разряда полупроводниковые ключи.

ЦАП с двумя номиналами сопротивлений (рис. 3) исключают эти сложности, благодаря наличию дополнительного резистора в каждом разряде.

Так как эта матрица резисторов является линейной цепью, ее работу можно проанализировать методом суперпозиции, т.е. вклад в выходное напряжение от каждого источника (разряда) рассчитать независимо друг от друга. Вклады от каждого разряда суммируются для получения напряжения на выходе ЦАП.

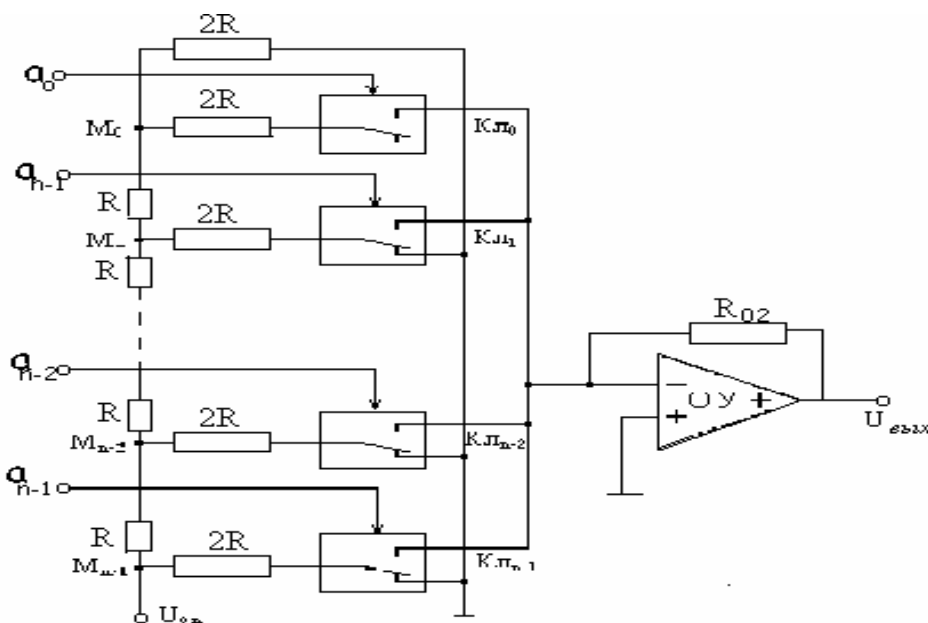


Рис. 3

Существует ЦАП, использующий режим работы суммирующего элемента, близкий к холостому ходу (суммирует напряжения) (рис. 4). По сравнению с рис. 3 здесь используется обратное включение входа и выхода матрицы  $R - 2R$ .

В таких ЦАП используют токовые ключи, потенциалы между контактами которых близки к нулю и, следовательно, переходные процессы протекают быстрее.

ЦАП с резистивными матрицами  $R - 2R$  в отличие от ЦАП с двоично-взвешенными резисторами, не требует широкого диапазона номиналов резисторов и поэтому легко реализуются полупроводниковой интегральной технологией. Матрицы  $R - 2R$  занимают меньшую площадь кристалла и позволяют снизить до минимума паразитарные и индуктивности резисторов и соединительных проводников.

Токовые ключи, предназначенные для коммутации элементов резистивной матрицы, должны иметь высокое быстродействие и не вносить заметных искажений в разрядные токи. Ключи для быстродействующих ЦАП строят обычно на биполярных транзисторах и диодах.

Большинство схем АЦП и ЦАП выполняются в виде интегральных микросхем.

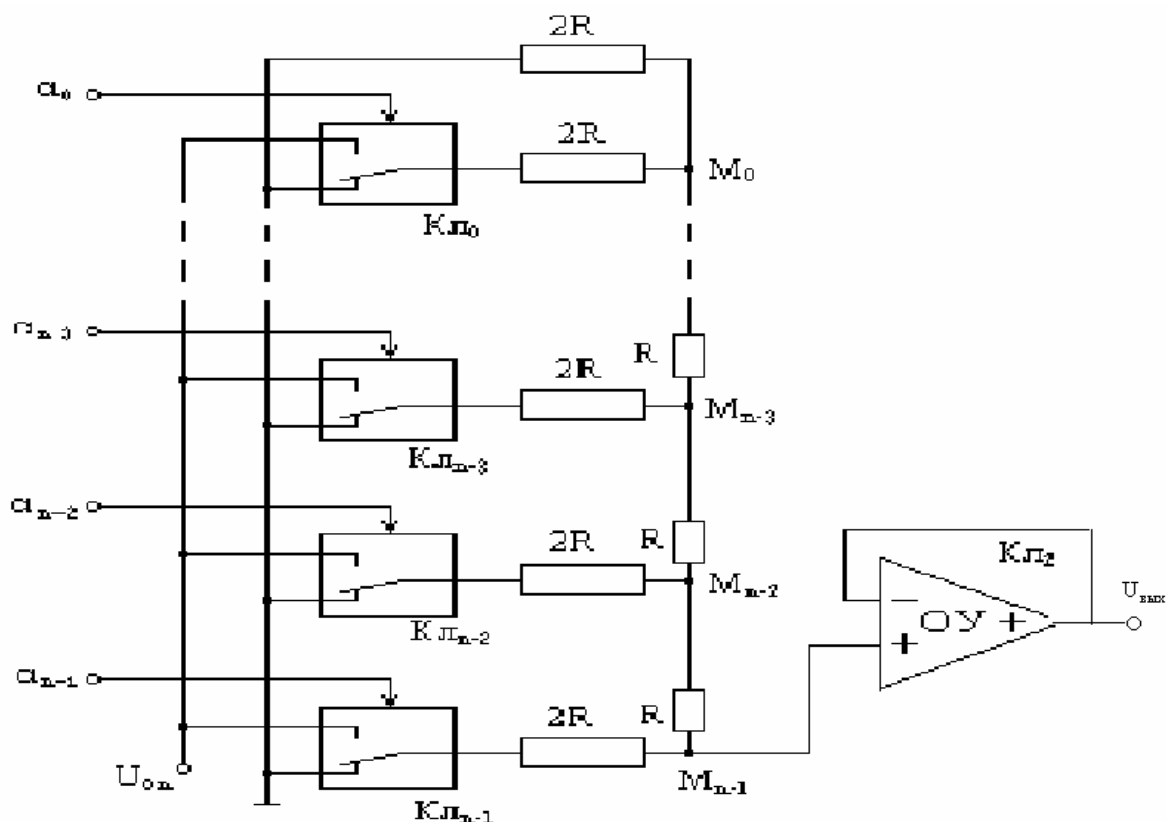


Рис. 4

Принцип действия ЦАП последовательного приближения (поразрядного кодирования) заключается в следующем. Имеется набор эталонов напряжения, пропорциональных по значениям степеням числа 2, которые сравниваются с аналоговой величиной. Сравнение начинается с эталона старшего разряда. В зависимости от результата этого сравнения формируется значение старшего разряда выходного кода. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде установится 0. Затем входная величина уравнивается следующим по значению эталоном. Если эталон равен или меньше входной величины, то в старшем разряде кода ставится 1 и в дальнейшем уравнивается между входной величиной и первым эталоном и т.д.

Схема, иллюстрирующая работу подобного преобразователя последовательного приближения, приведена на рис. 5. При подаче импульса запуска триггер старшего

разряда  $T_N$  устанавливается в состояние 1, а остальные триггеры - в 0; одновременно записывается 1 в старший разряд регистра сдвига. В каждом такте на компаратор  $K$  подаются входное  $U_{BX}$  и эталонное напряжение  $U_{ЭТ}$ , снимаемое с выхода ЦАП и соответствующее 1 старшего разряда. Если  $U_{BX} > U_{ЭТ}$ , на выходе компаратора сигнала не будет и в старшем разряде сохранится 1. Если  $U_{BX} < U_{ЭТ}$ , то компаратор выдает сигнал, который вернет триггер  $T_N$  в состояние 0. Сдвиг 1 в регистре в  $(n - 1)$  разряд позволит подать эталонное напряжение с ЦАП на компаратор. Далее процесс преобразования идет аналогично. В результате преобразование  $U_{BX}$  уравнивается суммой эталонных напряжений, снимаемых с ЦАП:

$$U_{вх} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot U_{эти}$$

где  $a_i$  - коэффициенты 1 и 0 в разрядах выходного кода, снимаемого с триггеров  $T_N - T_0$ ;  $U_{эти}$  - эталонное напряжение ЦАП, соответствующее  $i$ -разряду.

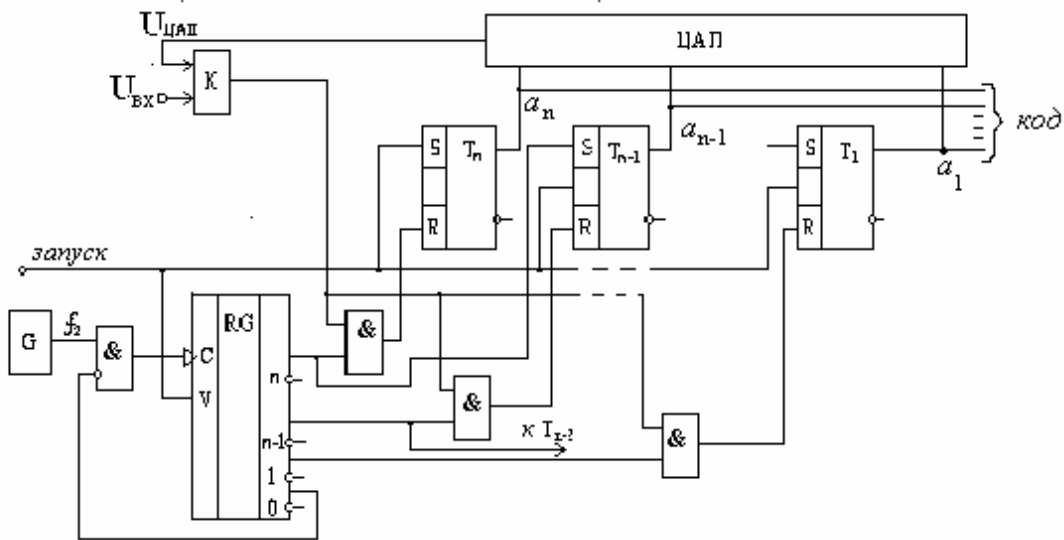


Рис. 5

В рассмотренном ЦАП время преобразования постоянно и определяется числом разрядов и тактовой частотой  $f_{пр} = f_r / n$ . Погрешность преобразования зависит от ошибок ЦАП и чувствительности компаратора.

Принцип работы ЦАП последовательного счета основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых и минимальных по величине эталонов. Момент уравнивания определяется с помощью компаратора, а количество эталонов, уравнивающих входную величину, подсчитывается счетчиком.

Принцип работы преобразователей параллельного действия основан на одновременном сравнении входного сигнала с  $2^n - 1$  эталонами, соответствующими  $n$ -разрядному двоичному коду, и кодировании результатов этого сравнения. Пример такого преобразователя показан на рис. 6. В этом преобразователе  $2^n - 1$  опорных напряжений формируются с помощью резистивного двигателя. Каждое из опорных напряжений подается вместе с  $U_{BX}$  на соответствующий компаратор. Срабатывают лишь те компараторы, у которых  $U_{BX} > U_{оп}$ . Результат сравнения через фиксирующие триггеры  $T_N - T_0$  подается на кодопреобразователь, преобразующий его в код. Подобные преобразователи являются наиболее быстродействующими. Недосток этих преобразователей в большом количестве компараторов, которое быстро возрастает с ростом числа разрядов.

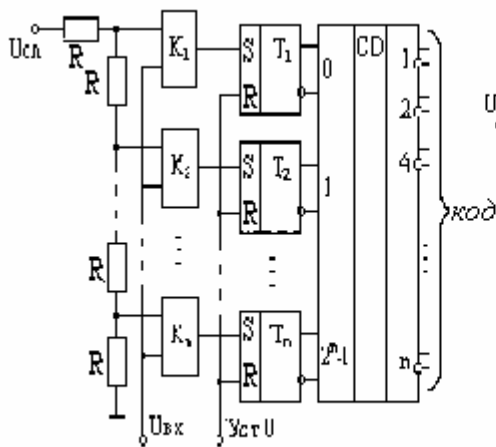


Рис. 6

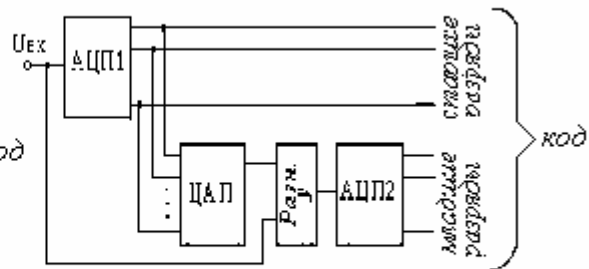


Рис. 7

Если нужно повысить разрядность, сохраняя высокое быстродействие при приемлемой сложности, применяют параллельно-последовательные (комбинированные) АЦП. В них несколько малоразрядных АЦП параллельного действия соединяют последовательно. Пример построения комбинированного АЦП показан на рис. 7. Входной аналоговый сигнал подается на первый АЦП, на выходе которого формируются старшие разряды выходного кода. Эти разряды подаются также на вход ЦАП. Выходной сигнал ЦАП сравнивается в усилителе разности  $Y$  с выходным сигналом. Разность этих сигналов подается на вход второго АЦП, который преобразует ее в выходной код младших разрядов.

В отличие от АЦП схемы ЦАП в основном выполняются с использованием операционных усилителей (ОУ).

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схемы ЦАП и АЦП выполнены на одном лабораторном стенде.

Схемы ЦАП выполнены на основе матрицы  $R-2R$  и операционного усилителя (ОУ). Сигналы на вход матрицы подаются от внутреннего источника с помощью ключей ДО-Д9. Сигнал с выхода ОУ регистрируется встроенным цифровым вольтметром.

Схема АЦП выполнена на основе микросхемы КР572ПВ1А.

Аналоговый сигнал подается на вход АЦП с помощью переменного резистора. Величина сигнала измеряется цифровым вольтметром.

Сигнал на входе АЦП записывается в виде двоичного входа в регистре. Регистрация сигнала происходит в момент подачи синхронизирующего импульса с тактового генератора, встроенного в установку. При появлении логической «1» на выходах регистра загораются соответствующие диоды Д0-Д11. Это значит, что выходной сигнал представляется в виде 10-ти разрядного двоичного числа.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### УПРАЖНЕНИЕ 1.

1. Изучить работу ЦАП матричного типа.
2. С помощью ключей ДО-Д9 на вход ОУ подать произвольный двоичный код. Определить с помощью вольтметра величину напряжения на входе ОУ в аналоговом виде. Записать результат. Проверить соответствие сигнала вольтметра с двоичным кодом на входе.
3. Повторить 5-10 раз.
4. Результаты записать в виде таблицы.



### *УПРАЖНЕНИЕ 2.*

1. Изучите работу АЦП.
2. С помощью переменного резистора на вход микросхемы подать сигнал. Затем подать синхриимпульс и снять показания с выходных диодов D0-D11 в виде двоичного кода. Записать код и значение напряжения по вольтметру. Проверить соответствие показаний.
3. Повторить опыт 5-10 раз.
4. Результат свести в таблицу.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что означает понятие квантование?
2. Как осуществляется квантование по уровню?
3. Как осуществляется квантование по времени?
4. В чем заключается основной принцип построения АЦП?
5. Каким образом строится схема ЦАП?

### **ЛИТЕРАТУРА**

[3], §3.7.2, с. 391-396; [4], §7.8, с.334-340; [2], §10.2, с.224-22

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Е.И. Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Советское радио. 1976. –480 с.
2. А.И. Кучумов. Электроника и схемотехника. М.: “Гелиос АРВ”. 2002. –304 с.
3. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. Электроника. Ростов н/Д: изд-во “Феникс”. 2000. -448 с.
4. В.И. Нефедов. Основы радиоэлектроники. М.: Высшая школа, 2000. - 399 с.
5. М.М. Мэндл. 200 избранных схем электроники. М.: 1980. -344 с.
6. Л.З. Бобровников. Радиотехника и электроника. М.: «Недра», 1974.-360с.

Министерство образования Российской Федерации  
Амурский государственный университет

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ**  
Методические указания для студентов специальности 01.04.00 – физика

Благовещенск  
2002

Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств. Копылова И.Б.  
Благовещенск: Амурский гос. Ун-т. 2002. - 21с.

Составитель:

Копылова И.Б.

Содержит описание 3 лабораторных работ по дисциплине «Основы радиоэлектроники».

Для студентов специальности 01.04.00 – физика.

Рецензент: Барышников С.В.

Амурский государственный университет, 2002

## ***СОДЕРЖАНИЕ***

1. Введение Методика моделирования	100.
2. Работа 4-1 Изучение работы биполярного транзистора	103.
3. Работа 4-2 Изучение работы усилителя на биполярном транзисторе	108.
4. Работа 4-3 Изучение работы LC-генератора	112.
5. Список литературы	112.

## **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Физическое моделирование электронных устройств часто невозможно из-за их сложности. В этом случае можно перейти к математическому моделированию не только самих устройств, но и режимов их работы, что чаще всего и делается при разработке новых устройств. Однако метод математического моделирования лишен наглядности и возможности быстрого изменения параметров схемы с целью улучшения характеристик и оптимизации схемы. Появление средств вычислительной техники и стандартных программ значительно облегчает задачу конструирования радиотехнических систем.

Данное методическое пособие включает описание трех лабораторных работ, которые выполняются с помощью математического моделирования средствами вычислительной техники.

Изучение работы электронных схем осуществляется методом моделирования с применением прикладной программы Electronics Workbench (EWB 4.1) и текстового редактора Microsoft Word.

Программа Electronics Workbench включает в себя библиотеку различных радиоэлементов, приборов и позволяет построить схему любого радиоэлектронного устройства, т.е. работа осуществляется аналогично работе любого графического редактора с тем отличием, что элементная база радиоэлектронных элементов уже присутствует в программе. Окно программы содержит меню, линейку контрольно-измерительных приборов и линейку библиотек компонентов (рис.1). Остается лишь выбрать нужные элементы и соединить их в области экрана с помощью “линии” согласно выбранной схемы. Выбор нового элемента схемы осуществляется двойным щелчком левой клавиши мыши по выбранному элементу. Установка в нужной части схемы происходит только при появлении черной точки рядом с изображением элемента. При необходимости можно поставить в схему новый прибор или развернуть его для наблюдения результатов опыта.

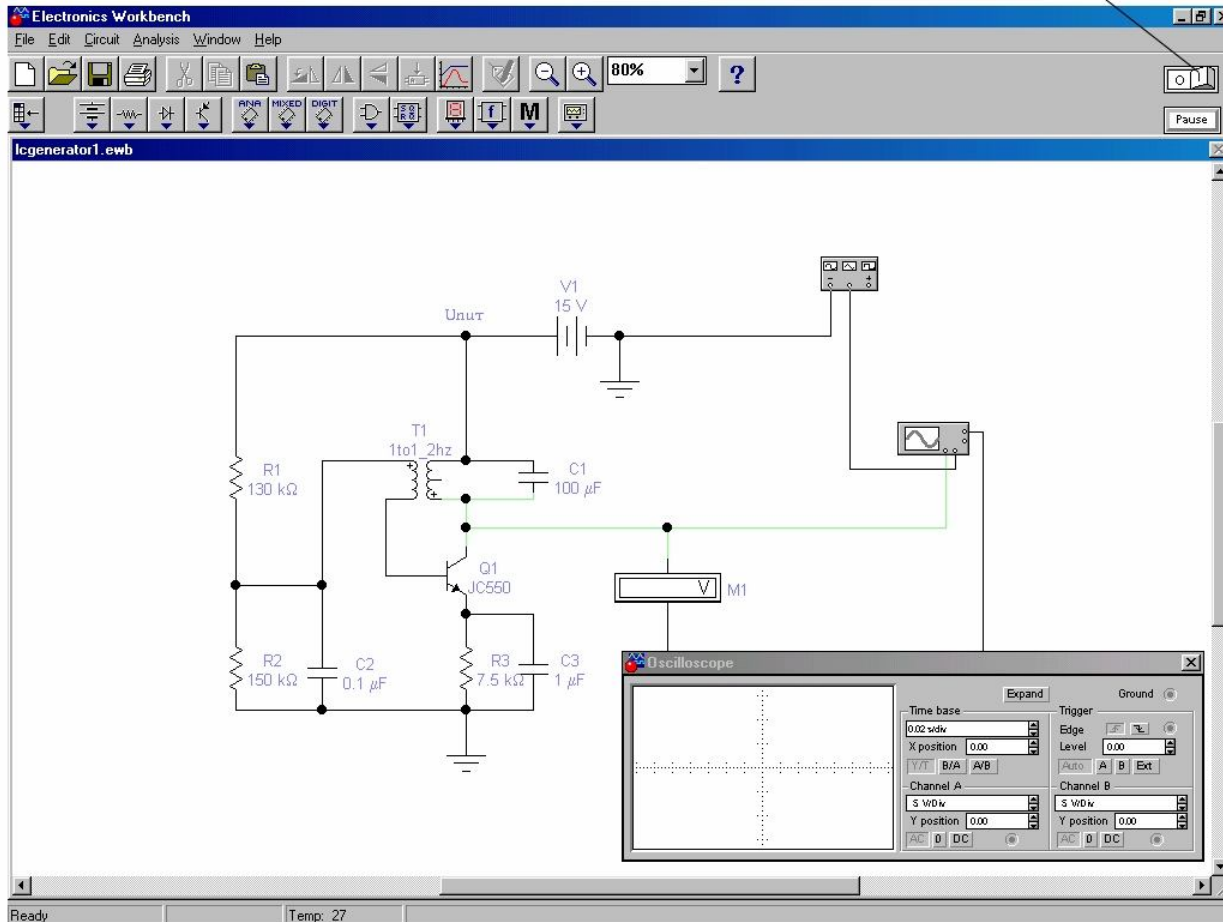


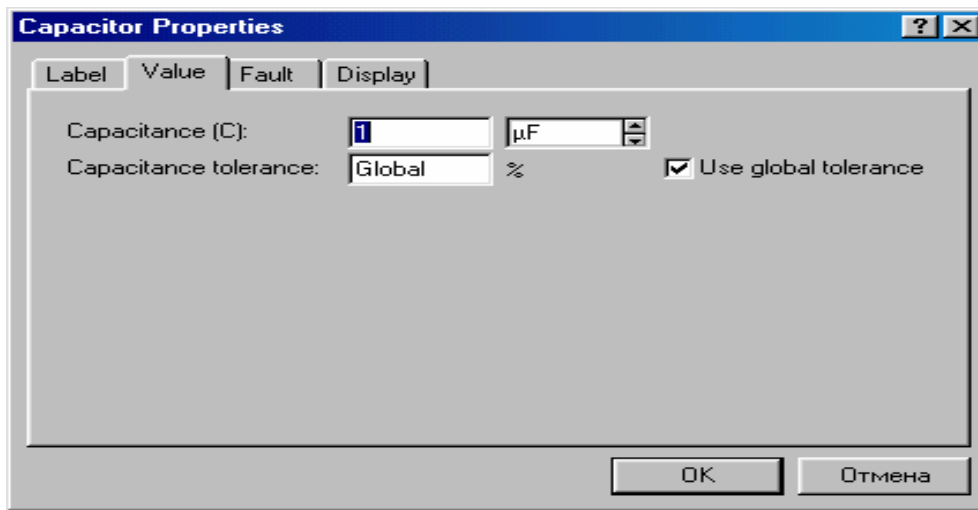
Рис. 1

Номинальные значения элементов схемы можно изменить путем двойного щелчка левой клавиши мыши по выбранному компоненту на схеме устройства. В открывшемся диалоговом окне (рис.2) на закладке Value выставить значение номинала выбранного элемента и единиц измерения. Для завершения ввода значений нажать ОК. При изменении номинала электронного элемента программа моделирования отключается, поэтому после установки нового элемента или изменении параметров схемы необходимо заново запустить программу моделирования нажатием кнопки, установленной на панели управления (кнопка находится в верхнем правом углу экрана).

Запуск файла осуществляется левой клавишей мыши. Переключение между документом и программой осуществляется сочетанием клавиш Alt+Tab.

**Внимание:** после запуска программы повторный запуск приводит к возникновению ошибки и зависанию программы. Для устранения возникшей ситуации нажать одновременно клавиши Flt+Enter+Del, в диалоговом окне выбрать задачу Wewb32, нажать кнопку “Завершить задачу”.

Рис.2



После запуска программы на экране появится схема изучаемого устройства. Перед выполнением работы необходимо задать параметры схемы (значения входных параметров, номиналы элементов схемы) и включить в ветви схемы необходимые приборы (амперметры, вольтметры, осциллограф), с помощью которых можно контролировать значение и форму входных и выходных параметров. Установка приборов осуществляется с использованием кнопки `instruments` на панели управления. Введение прибора в активный режим осуществляется нажатием левой клавиши мыши, при этом прибор окрашивается в красный цвет.

Таким образом, изменение параметров схемы, значений входящих сигналов, включение в схему измерительных приборов позволит снять основные характеристики электронных схем и смоделировать режимы их работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4-1

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить работу биполярного транзистора.
2. Снять входную характеристику транзистора в схеме с общей базой (ОБ)  
 $I_b = f(U_{эб})$ .
3. Снять выходные характеристики транзистора  $I_k = f(U_{кб})$ .

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Транзистор – это полупроводниковый электропреобразовательный прибор, который служит для преобразования (усиления) тока или напряжения.

Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и имеет два p-n перехода. Существуют транзисторы n-p-n и p-n-p типа (рис. 1).

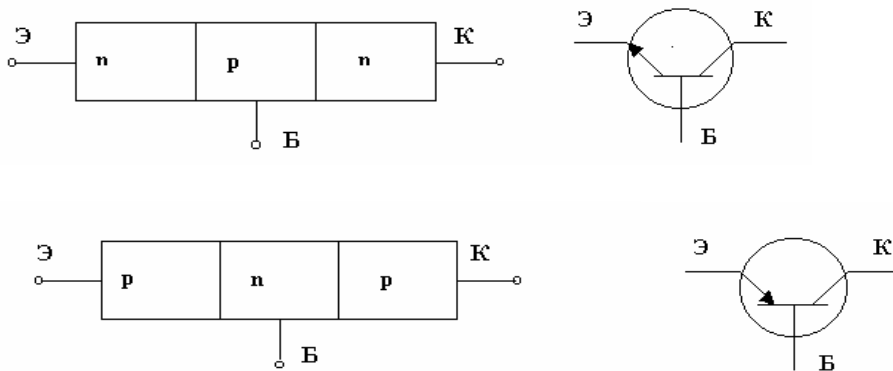


Рис. 1

От каждого слоя полупроводника выведен электрод: слева – эмиттер (Э), справа – коллектор (К), в середине – база (Б).

Название биполярного транзистор получил потому, что носителями тока являются заряды двух знаков: электроны (n-носители), дырки (p-носители). Трехслойная структура транзистора образует два p-n перехода: эмиттер - база и база – коллектор. По сравнению с толщиной эмиттера и коллектора толщина базы значительно меньше (от 20-30 мкм до 1 мкм), что обеспечивает проникновение носителей из эмиттера в коллектор.

Рассмотрим работу биполярного транзистора. Транзистор может работать в трех режимах: отсечки, насыщения, активном.

Режим отсечки: оба p-n перехода закрыты. При этом через транзистор протекает небольшой тепловой ток. Работа транзистора в таком режиме не является эффективной.

Режим насыщения: оба перехода открыты. При этом через транзистор течет большой ток, что в конечном итоге может привести к разрушению транзистора.

Активный режим: это режим усиления тока или напряжения.

Основным условием работы является включение первого (эмиттерного перехода) в прямом направлении (переход открыт), а второго (коллекторного) перехода в обратном направлении (переход закрыт).

Существует также инверсный режим работы транзистора, когда коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный в обратном. Коэффициент передачи при этом близок к единице.

Рассмотрим работу p-n-p транзистора в активном режиме (рис. 2).



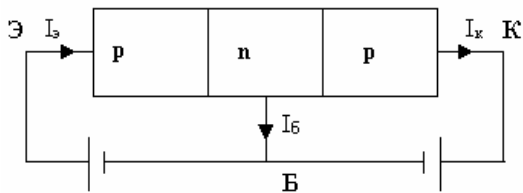


Рис.2

Переход эмиттер – база смещен в прямом направлении (открыт), переход база – коллектор смещен в обратном направлении (закрыт), что осуществляется включением в переходы источников питания соответствующей полярности.

Т.к. толщина базы очень мала, то дырки переходят через базу, и только небольшое их количество рекомбинирует с электронами базы. Поэтому  $I_э \gg I_б$ . Восполнение носителей, которые рекомбинировали в базе происходит за счет подключения базы к источнику питания. Дырки, перешедшие из эмиттера в базу, становятся не основными носителями базы, поэтому они втягиваются в коллектор полем, которое создано между базой и коллектором. В результате ток, протекающий в коллекторе, почти равен току эмиттера  $I_э \approx I_б$ . Если записать более точно, то

$$I_к = \alpha_{cm} I_э + I_{ко} \quad (1)$$

где  $\alpha_{cm}$  – статический коэффициент передачи эмиттерного тока.

$I_{ко}$  – обратный ток коллектора (течет в отсутствии эмиттерного тока).

Таким образом, ток коллектора оказывается больше, чем ток эмиттера, т.е. происходит усиление тока.

Характеристики транзистора зависят от способа включения транзистора в схему.

Существует три схемы включения транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК), с общей базой (ОБ) (рис.3). В схеме с ОЭ входными параметрами являются ток базы  $I_б$  и напряжение база-эмиттер  $U_{бэ}$ , выходными – ток коллектора  $I_к$  и напряжение коллектор-эмиттер  $U_{кэ}$ ; в схеме с ток ОК - входные параметры ток базы  $I_б$ , напряжение база-коллектор  $U_{бк}$ ; в схеме с ОБ - входные параметры ток эмиттера  $I_э$ , напряжение эмиттер-база  $U_{эб}$ , выходные - ток коллектора  $I_к$ , напряжение коллектор-база  $U_{кб}$ .

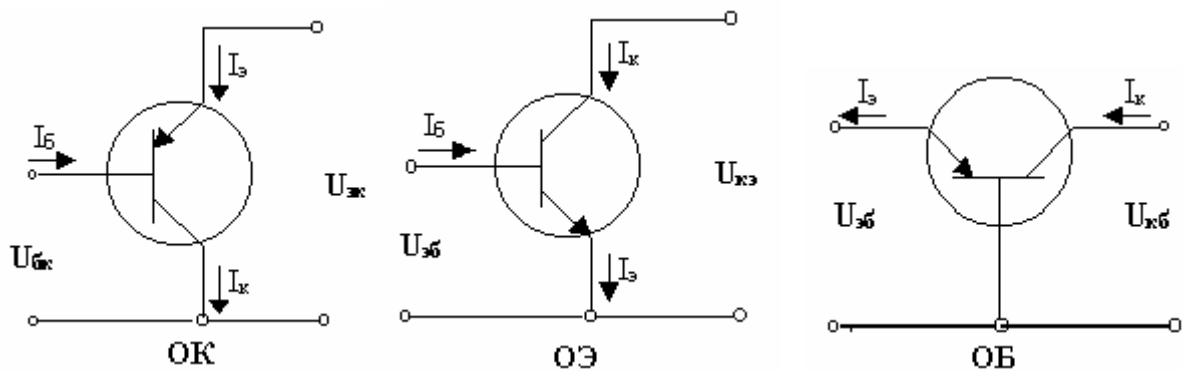
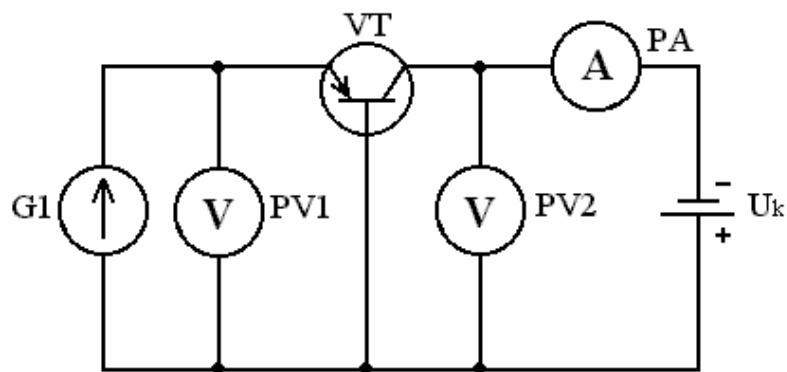


Рис.3

В данной работе необходимо построить входные и выходные характеристики транзистора с ОБ (общей базой). Рассмотрим основные свойства этой схемы (рис.4).



Эмиттерный переход включен в прямом направлении. Входное сопротивление транзистора

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{э}}{\Delta I_{э}} \quad \text{при } U_{к} = const \quad (1)$$

Входное сопротивление составляет единицы и десятки Ом. Входной характеристикой является зависимость  $I_{э} = f(U_{эб})$ .

Коллекторный переход включен в обратном направлении. При этом в переходе протекает ток  $I_{к0}$ , обусловленный не основными носителями. Если  $I_{э} = 0$ , то  $I_{к0} \neq 0$ .

Выходное сопротивление схемы:

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{к}}{\Delta I_{к}} \quad \text{при } I_{э} = const \quad (2)$$

Выходное сопротивление достигает нескольких мегаом (МОм). Выходной характеристикой является зависимость  $I_{к} = f(U_{кб})$ .

Т.к. часть носителей перешедших через переход создает ток базы  $I_{б}$ , а часть носителей рекомбинирует, то  $I_{к} < I_{э}$ .

Коэффициент усиления по току

$$\alpha = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{э}} \quad \text{при } U_{к} = const \quad (3)$$

Величина коэффициента усиления  $\alpha$  для различных транзисторов лежит в пределах  $\alpha = 0,75 - 0,99$ .

Усиление по току в этой схеме не происходит. Однако в этой схеме происходит усиление по напряжению

$$K_u = \frac{\Delta U_{к}}{\Delta U_{э}} = \frac{\Delta I_{к} R_{к}}{\Delta I_{э} R_{э}} = \frac{\Delta R_{к}}{\Delta R_{э}} \quad (4)$$

Входное и выходное напряжения находятся в одной фазе. Такое включение транзистора чаще всего используется в усилителях напряжения.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Запустите программу. В режиме диалога выберите ответ “да” и нажмите левую клавишу мыши.

2. Снять ВАХ входа транзистора с общей базой  $I_{э} = f(U_{эб})$  при  $U_{кб} = const$ . Напряжение  $U_{кб}$  выбрать 0,5 В – 10 В.  $U_{эб}$  изменять в пределах (0,1 - 10) В.

Изменение  $U_{эб}$  производится на вкладке Value в диалоговом окне, которое открывается нажатием левой клавиши мыши. Снятие значений тока  $I_{э}$  производится с помощью амперметра, включенного в эмиттерную цепь транзистора.

**! После смены номиналов произвести запуск моделирования схемы сочетанием клавиш Ctrl + G, остановка процесса моделирования осуществляется сочетанием клавиш Ctrl + T.**

Снять входные характеристики для 3- 5 значений напряжения коллектор-база  $U_{кб}$ .

3. Снять выходные характеристики транзистора. Значения  $U_{кб}$  изменять в пределах (0,1 - 10) В, значения тока эмиттера выбирать в пределах (1,5 - 10) мА

$I_{к} = f(U_{кб})$  при  $I_{э} = const$ . Изменение тока эмиттера  $I_{э}$  производится на вкладке Value в диалоговом окне, которое открывается нажатием левой клавиши мыши.

Снять выходные характеристики для 5-6 значений тока эмиттера  $I_e$ .

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Что собой представляет транзистор?
2. Перечислить и описать основные режимы работы транзистора.
3. Описать работу транзистора в активном режиме.
4. Что такое коэффициент усиления?
5. Каким образом транзистор включается в схему?
6. Что такое входная характеристика?
7. Что собой представляет выходная характеристика?
8. Особенности схемы с ОБ (общей базой).

### ***ЛИТЕРАТУРА***

[1]: §1.2.1-1.2.3; [3]: §5.4; [6]: §4.8 .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4-2

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.

#### ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить работу биполярного транзистора в режиме усиления.
2. Определить коэффициент передачи по току и по напряжению.
3. Установить зависимость коэффициента передачи от параметров схемы.
4. Изучить методы стабилизации режима работы усилителя.

#### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Режим усиления тока или напряжения является одним из основных режимов работы биполярного транзистора. Коэффициент усиления транзистора определяется отношением выходного тока (напряжения) к входному току (напряжению). Величина коэффициента усиления зависит от способа включения транзистора в электронную схему. Наиболее широко используется схема включения с общим эмиттером (рис. 1).

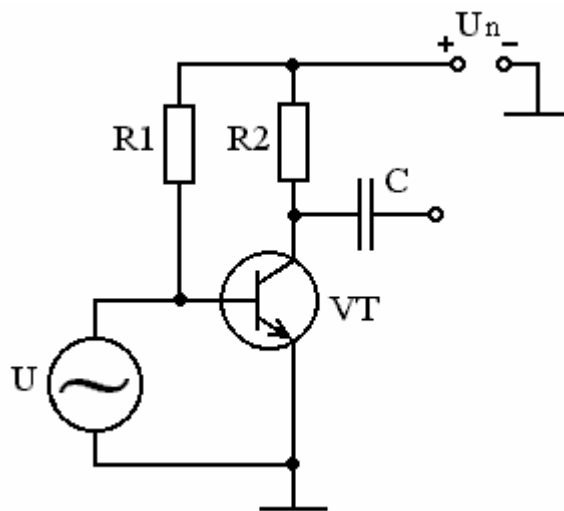


Рис.1

Рассмотрим основные характеристики такого усилителя. Входными параметрами являются ток базы  $I_{\bar{o}}$  и напряжение между базой и эмиттером  $U_{\bar{o}\bar{э}}$ . Выходными параметрами – ток коллектора  $I_{\kappa}$  и напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{\kappa\bar{э}}$ . Т.к. напряжение  $U_{\bar{o}\bar{э}}$  подается на эмиттерный переход в прямом направлении, то небольшое изменение напряжения приводит к значительному изменению тока базы и работе транзистора в активном режиме. Переход база-коллектор закрыт. Входное сопротивление схемы:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\bar{o}\bar{э}}}{\Delta I_{\bar{o}}} \quad \text{при } U_{\kappa\bar{э}} = \text{const} \quad (1)$$

Входное сопротивление достаточно высокое (сотни Ом, десятки кОм).  
Выходное сопротивление схемы:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\kappa\bar{э}}}{\Delta I_{\kappa}} \quad \text{при } I_{\bar{o}} = \text{const} \quad (2)$$

По порядку величины сопротивление составляет десятки и сотни кОм.  
Согласно законам Кирхгофа

$$I_{\varepsilon} = I_{\kappa} + I_{\bar{\delta}} \quad (3)$$

Коэффициент усиления по току:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\bar{\delta}}} \quad (4)$$

Коэффициент усиления по напряжению зависит от величины коллекторного сопротивления  $R_{\kappa}$ .

$$\alpha = \frac{\Delta U_{\kappa\varepsilon}}{\Delta U_{\bar{\delta}\varepsilon}} \quad (5)$$

Напряжение, снимаемое с коллектора, изменяется в противофазе с выходным напряжением.

На входе и выходе схемы включаются разделительные конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ . Их назначение – фильтрация постоянной составляющей входного и выходного сигнала.

Кроме того, в реальном усилителе предусмотрена стабилизация рабочей точки транзистора. Для этого на входе схемы ставится делитель  $R_1$  и  $R_2$  (рис.2). При этом токи, протекающие в цепях транзистора, будут постоянными  $I_{\bar{\delta}} = const$ ,  $I_{\varepsilon} = const$ ,  $I_{\kappa} = const$ .

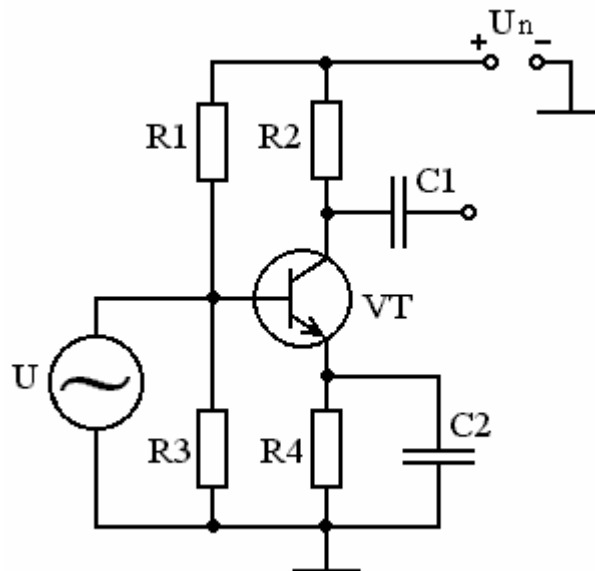


Рис.2

Для стабилизации режима работы при изменения температуры в цепь эмиттера включается резистор  $R_4$ . Вместе с резисторами  $R_1$  и  $R_3$  резистор  $R_4$  образуют цепь отрицательной обратной связи (ООС) по току. Именно наличие ООС и обеспечивает термостабилизацию. При возрастании температуры через транзистор начинает течь обратный ток коллектора, величина которого возрастает с ростом температуры. Напряжение на резисторе  $R_4$  возрастает, что приводит к перераспределению напряжения питания  $U_n$  на резисторах  $R_1$  и  $R_3$  таким образом, что напряжение на сопротивлении  $R_2$  возрастает ток через резистор увеличивается до номинального значения. Дополнительное падение напряжения на  $R_4$  в эмиттерной цепи приводит к снижению коэффициента усиления по напряжению, т.к. уменьшается входное напряжение при работе на переменном токе.

Для исключения ООС по переменному току резистор  $R_4$  шунтируют конденсатором достаточно большой емкости  $C_2$ .

При расчетах усилителей на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером (ОЭ) исходят из характеристик конкретного транзистора и получения нужного коэффициента усиления. На выходных характеристиках транзистора строят нагрузочные линии по постоянному и переменному току, а затем рассчитывают параметры схемы.

## **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Запустить программу изучения работы усилителя с помощью левой клавиши мыши. Ответить “да” в режиме запуска файла.

2. Заготовить таблицу

Таблица

$U_{BX}$	$B$	
$v_{BX}$	$Гц$	
$v_{ВЫХ}$	$Гц$	
$U_{ВЫХ}$	$B$	

3. Ввести в схему амперметр и вольтметр на входе и выходе. Для этого открыть вкладку “индикаторы” и мышью перетащить нужный элемент и установить в нужное место (перемещение элемента возможно при появлении рядом с элементом черного кружка, что достигается нажатием левой клавиши мыши).

4. На вкладке “VALUE” задать параметры входного сигнала. Параметры входного сигнала можно изменять в пределах: напряжение (1-1000)В; частота - (1-100) Гц. Затем определить сигналы на выходе схемы. Результаты записать в таблицу.

5. Рассчитать коэффициент передачи по току и напряжению.

6. Подключить к схеме делитель  $R_1 = 50$  КОм и  $R_3 = 10$  кОм и повторить п.3 для 3-5 значений входного сигнала.

7. Ввести в схему термостабилизирующую цепочку ( $R_4 = 2$  КОм,  $C_2 = 0,01$ мФ).

8. Выполнить пункт п.3 для 3-5 значений входного сигнала.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Перечислить основные характеристики усилителя с ОЭ.

2. Что такое коэффициент усиления? Как определяется коэффициент усиления по току и по напряжению?

3. Каким образом происходит усиление тока в схеме с общим эмиттером (ОЭ)?

4. Какого назначения делителя напряжения на входе усилителя?

5. Какие функции выполняют конденсаторы на входе и выходе усилителя.

6. Каким образом происходит стабилизация работы усилителя при повышении температуры.

## **ЛИТЕРАТУРА**

[1]: §1.2.5; [2]: §3.4; [3]: §§ 5.6-5.8; [4]: §1.2 [6]: §7.1.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4-3

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ LC-ГЕНЕРАТОРА

#### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

1. Изучить работу LC-генератора.
2. Построить график зависимости частоты колебаний от параметров LC-контура.
3. Построить амплитудно-частотную характеристику генератора.

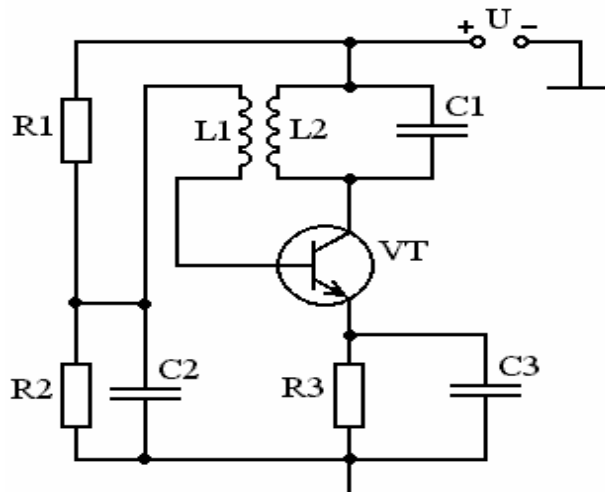
#### **КРАТКАЯ ТЕОРИЯ**

Для создания периодических незатухающих сигналов различной формы применяются генераторы. Различают генераторы с самовозбуждением, автогенераторы и генераторы с внешним возбуждением.

Генерирование незатухающих колебаний в реальных схемах невозможно без дополнительных устройств. Часть энергии рассеивается на элементах схемы. Поэтому для поддержания колебаний эти потери энергии необходимо восполнять.

Как правило, энергия рассеивается на активных элементах и резисторах. Если обозначить потери в виде сопротивления потерь  $R_n$ , то для восполнения потерь в схему нужно ввести отрицательное сопротивление  $R_{n(-)}$ , которое будет восполнять потери энергии выделившейся на сопротивлении  $R_n$ .

В реальных схемах введение отрицательного сопротивления эквивалентно работе активных элементов: транзисторов, туннельных диодов, терморезисторов, тиристоров и т.д. на ниспадающем участке вольт-амперной характеристики ВАХ (касательная в каждой



точке такой характеристики определяет производную, имеет смысл сопротивления, знак производной отрицательный). Широко применяется для этой цели введение положительной обратной связи (ПОС), а также параметрическое возбуждение колебаний. В зависимости от глубины ПОС и частоты задающего контура различают генераторы: гармонических колебаний, релаксационных колебаний (прямоугольной, пилообразной формы и т.д.).

Рассмотрим работу автогенератора синусоидальных колебаний, построенного на биполярном транзисторе (рис. 1).

Условием генерации синусоидальных колебаний является равенство энергии потерь и энергии, вводимой в контур генератора.

С помощью резисторов  $R_1$  и  $R_2$  на базу транзистора подается положительное смещение, которое обеспечивает режим по постоянному току транзистора и необходимо в момент запуска генератора. После возникновения колебаний постоянная составляющая тока базы может стать отрицательной за счет выпрямления переменной составляющей тока базы.

Для компенсации постоянной составляющей тока базы в схему вводятся конденсаторы  $C_2$  и  $C_3$ , которые шунтируют резисторы  $R_2$  и  $R_3$ .

Схема представляет собой усилитель с ПОС, в которую включен колебательный контур. Колебательный контур включен в коллекторную цепь транзистора. Колебательный контур индуктивно, через катушку  $L_2$  связан с входом усилителя (базовой цепью транзистора), в которую включается катушка индуктивности  $L_1$ .

Коэффициент ПОС  $\beta$  должен удовлетворять условию

$$\beta \gg \frac{1}{K_o} \quad (1)$$

где  $K_o$  - коэффициент усиления усилителя, обеспечивающий возникновение колебаний.

При протекании тока в катушке  $L_2$  в контуре наводится э.д.с. и происходит зарядка конденсатора и, как следствие, возникают электромагнитные колебания. При уменьшении амплитуды колебаний, возникающих в колебательном контуре, в цепи ПОС возникает компенсирующая э.д.с., что приводит к изменению тока в цепи базы. Такой процесс эквивалентен появлению отрицательного сопротивления, которое компенсирует потери в контуре. Таким образом, в генераторе возникают незатухающие электромагнитные колебания. Частота генерируемых колебаний зависит от параметров колебательного контура

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2)$$

Блок-схема генератора представлена на рис. 2.

$U_1$  и  $U_2$  - амплитуды синусоидальных напряжений. Амплитуды  $U_1$  и  $U_2$  будут стационарными, если выполняются условия:

$$\begin{aligned} U_2 &= K_{cp} U_1 \\ U_1 &= \beta U_2 \quad \text{или} \\ U_1 &= \beta K_{cp} U_1 \\ \beta K_{cp} &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

$K_{cp}$  - средний коэффициент передачи усиления;

$\beta$  - глубина ПОС (коэффициент передачи).

$$K_{cp} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} = -S_{cp} Z_{эк} \quad (4)$$

$S_{cp}$  - крутизна характеристики транзистора,

$Z_{эк}$  - эквивалентное сопротивление колебательного контура.

С учетом  $\beta = \frac{1}{K_{cp}}$  получим

$$-S_{cp} Z_{эк} \beta = 1 \quad (5)$$

Учитывая комплексный характер  $Z_{эк}$  и синусоидальный характер колебаний можно записать:



$$\beta = |\beta|e^{j\varphi_\beta}; \quad Z_{\text{эк}} = |Z_{\text{эк}}|e^{j\varphi_k}; \quad S_{\text{ср}} = |-S_{\text{ср}}|e^{j\varphi_s}$$

$$|\beta| / |Z_{\text{эк}}| / |-S_{\text{ср}}| = 1 \tag{6}$$

$$\varphi_s + \varphi_k + \varphi_\beta = 2n\pi \tag{7}$$

$$n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$$

Выражение (6) называют балансом амплитуд, (7) - балансом фаз.

В генераторе условия (6) и (7) поддерживаются автоматически.

При изменении параметров контура изменяется и сопротивление контура и частота колебаний таким образом, что баланс фаз восстанавливается.

Чем выше добротность контура, тем круче его фазовая характеристика и тем выше способность колебательного контура поддерживать стабильную частоту. Поэтому условием стабильности частоты является баланс фаз.

### **ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ**

1. Запустить программу выполнения работы.
2. Изучить содержание аннотации к выполнению данной работы, переключившись в текстовый редактор сочетанием клавиш Alt+Tab.
3. Запустить программу моделирования сочетанием клавиш Ctrl+G или при помощи кнопки (рис.2).
4. На экране осциллографа наблюдать вид генерируемых колебаний. Определить частоту и амплитуду по осциллографу. Сравнить с расчетной частотой (формула 2).
5. Изменить параметры схемы (колебательного контура) и повторить выполнение п.4.
6. Повторить выполнение п.5 5-10 раз.
7. Результаты выполнения работы внести в таблицу.

Таблица

№ n/n	L	C	f	f <sub>1</sub>	U <sub>m</sub>
	Гн	МкФ	Гц	Гц	В

8. По данным таблицы построить зависимость частоты колебаний от параметров колебательного контура  $f=F(LC)$  и  $f_1=F(LC)$  ( $f_1$  - расчетная частота колебаний генератора).

9. Построить зависимость  $U_m=F(f)$  и  $U_m=F(f_1)$ . Сравнить полученные кривые. Проанализировать ход АЧХ.

10. Сделать выводы по работе.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Основное назначение и классификация генераторов сигналов.
2. Изобразить схему LC-генератора и пояснить назначение всех элементов схемы.
3. Что такое положительная обратная связь? Зачем ПОС вводится в схему?
4. Получить условия баланса фаз и амплитуд для схемы генератора.
5. Что такое амплитудо-частотная характеристика генератора?

### **ЛИТЕРАТУРА**

[1]: §2.3.1; [2]: §5.2; [3]: §14.3,14.8; [4]: §4.1; [6]: §8.1.

## ***ЛИТЕРАТУРА***

1. В.И.Лачин. Н.С.Савелов. Электроника. Ростов н/Д.: «Феникс». 2000.С.448.
2. В.И.Нефедов. Основы радиоэлектроники. М.: Высш.шк.. 2000. С.399.
3. Е.И.Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Советское радио.1976. С.480.
4. М.Мэндл. 200 избранных схем электроники. М.: «Мир». 1980.С.344.
5. В.И.Карлащук. Электронная лаборатория на IBM PC. М.: «Солон-Р». 1999. С.506.