

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

# ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие  
к выполнению лабораторных работ для бакалавров  
по техническим направлениям

УДК 621.3.01

Рецензенты:

*Денисов Г. С.* – д-р физ.-мат. наук, проф. каф. физики и МЭ,  
*Кириллов В. В.* – канд. техн. наук, доц. каф. НВИЭ

Составители:

*И. А. Аккозиев, А. П. Балянов, Д. В. Виноградов, О. П. Новиков*

Рекомендовано к изданию Ученым советом ЕТФ,  
кафедрой «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»

Э 45 ЭЛЕКТРОНИКА: учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ для бакалавров по техническим направлениям / сост.: И. А. Аккозиев, А. П. Балянов, Д. В. Виноградов, О. П. Новиков. Бишкек: КРСУ, 2016. 74 с.

Изложены краткие теоретические положения по основным типам электронных приборов, подготовка и порядок выполнения работ, содержание отчетов и контрольные вопросы для самостоятельной работы по защите отчета и получения зачета.

Предназначено для студентов, обучающихся по программе бакалавриата высшего профессионального образования по направлению «140400 – Электроэнергетика и электротехника».

Может быть использовано студентами-бакалаврами других технических направлений, в учебных планах которых имеется указанная дисциплина.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Методические указания к выполнению лабораторных работ .....	4
Стенд универсальный .....	7
Лабораторная работа № 1 Исследование характеристик диодов	10
Лабораторная работа № 2 Исследование схем однофазных и трехфазных выпрямителей .....	14
Лабораторная работа № 3 Исследование характеристик Стабилитрона .....	26
Лабораторная работа № 4 Снятие вольт-амперной характеристики и определение параметров туннельного диода	33
Лабораторная работа № 5 Исследование характеристик тиристоров. Исследование управляемого тиристорного выпрямителя .....	37
Лабораторная работа № 6 Снятие характеристик и определение $h$ -параметров транзистора по схеме с ОЭ .....	43
Лабораторная работа № 7 Снятие характеристик и определение параметров полевого транзистора .....	54
Лабораторная работа № 8 Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером .....	58
Лабораторная работа № 9 Работа со справочной литературой по микроэлектронике .....	68
ЛИТЕРАТУРА .....	73

## ВВЕДЕНИЕ

Электроника является универсальным и эффективным средством при решении самых различных проблем в области сбора, преобразования и хранения информации, автоматического и автоматизированного управления в технических системах, выработки и преобразования энергии. Знания в области электроники для специалистов-энергетиков особенно необходимы.

Применение электроники постоянно расширяется. Практически каждая достаточно сложная техническая система по выработке и распределению электроэнергии оснащается электронными устройствами.

Роль электроники существенно возрастает в связи с применением микропроцессорной техники для обработки информационных сигналов и силовых полупроводниковых приборов для преобразования электрической энергии.

Изучение дисциплины «Электроника» будет проходить намного эффективнее, если студенты наряду с изучением основных теоретических положений полупроводниковых приборов выполняют цикл лабораторных работ по исследованию основных свойств и характеристик таких приборов.

Исследование электронных устройств на базе полупроводниковых приборов показывает широкие возможности электроники и практически неограниченные пути ее развития в силовой электронике и интегральной микроэлектронике.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 1.1. Выполнение лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом бригадами по 2–3 человека. Перечень лабораторных работ студенты получают на первом вводном занятии, что дает возможность выполнить подготовительную работу до начала проведения лабораторных работ.

Студент, пропустивший лабораторную работу, обязан ее отработать по соответствующему графику.

Каждый студент должен четко понимать цель лабораторной работы и отчетливо представлять назначение, принцип действия и основные характеристики исследуемого прибора и электронного устройства.

Перед выполнением каждой работы необходимо: предварительная подготовка, в процессе которой студент повторяет пройденный теорети-

ческий материал, готовит таблицы наблюдений, при надобности необходимые расчеты, чертит электрическую цепь исследуемого прибора и изучает последовательность необходимых операций.

Преподаватель, ведущий лабораторные занятия, проверяет степень готовности студента к выполнению лабораторной работы и после проверки студент допускается к сборке электрической цепи, указанной в задании. Студент всю подготовительную работу фиксирует в отдельной рабочей тетради для записи экспериментальных данных, используемых в дальнейшем при написании отчета по лабораторной работе.

После проверки собранной схемы преподавателем или инженером студенты приступают к выполнению лабораторной работы.

Заносят в рабочую тетрадь необходимые данные об измерительных приборах (тип измерительного механизма, диапазон измеряемой величины, цену деления), заполняют экспериментальные таблицы.

Работа считается законченной в том случае, если результаты в виде записей, таблицы, графиков и схем представлены преподавателю, им проверены и утверждены, после чего бригада разбирает схему, приводит рабочее место в исходное состояние.

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

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками с рабочим напряжением до 380 В и в некоторых случаях могут стать источником опасности поражения электрическим током. Поэтому при выполнении лабораторных работ студент должен помнить о возможности поражения электрическим током и соблюдать правила техники безопасности.

Инструктаж по технике безопасности проводится на первом занятии по инструкции, утвержденной зав. кафедрой НВИЭ и фиксируется в специальном журнале, в котором должен расписаться каждый студент.

### **1.3. Обработка результатов и оформление отчета**

Каждый студент должен самостоятельно обработать данные измерений и подготовить отчет о проделанной работе.

Отчет начинается с титульного листа:

Кыргызско-Российский Славянский университет  
Естественно-Технический факультет  
Кафедра «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»  
Лаборатория «Электротехники и электроники»

Электроника  
Лабораторная работа № ...  
Наименование лабораторной работы

Выполнил студент гр. ...

Ф.И.О. ...  
Принял преподаватель  
Ф.И.О. ...

Бишкек 201\_

#### 1.4. Отчет должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Приборы и оборудование с указанием основных технических данных.
3. Задание.
4. Электрические и принципиальные схемы измерений.
5. Данные измерений и расчетные данные (в виде таблицы). При вычислении этого раздела рассчитанные данные получают по определенным формулам. Рассчитанные данные для одной точки выполняются по схеме: Расчетная формула, в которую проставляются экспериментальные данные с учетом их единиц измерения, вычисления, результат занести в таблицу. Расчетные данные остальных точек в отчете можно не приводить, данные вычислений занести в таблицу.

#### 6. Выводы о проделанной работе.

Электрическая схема, таблицы, графики и другие построения целесообразно выполнять в карандаше (проще внести коррективы, исправить ошибки) с использованием чертежных инструментов.

При построении графиков надо выбрать масштабы по осям координат и иметь в виду, что всякие измерения имеют случайные погрешности, поэтому не следует проводить графики через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, занимающие среднее положение между экспериментальными точками.

На основании экспериментальных данных, полученных при выполнении работы, следует сделать краткие выводы, содержащие объяснения полученных результатов с точки зрения теории, исследуемого вопроса.

#### СТЕНД УНИВЕРСАЛЬНЫЙ

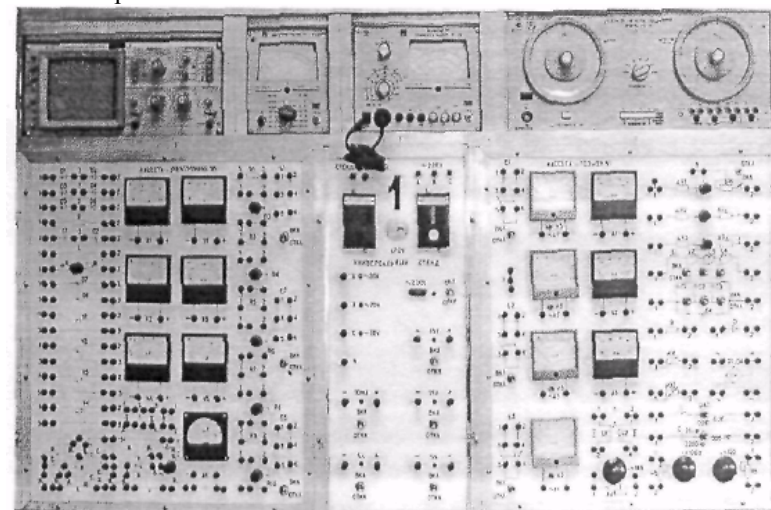
Стенд универсальный предназначен для выполнения лабораторных работ студентами инженерно-технических специальностей по следующим предметам:

- теоретические основы электротехники;
- общая электротехника;
- основы электроники.

Кассета по  
электронике

Кассета источ-  
ников питания

Кассета по ТОЭ и  
ОЭ



#### Технические данные стенда

Питание от сети переменного тока:  
напряжение 220 В  
частота 50 Гц  
потребляемая мощность не более 250 Вт

Снимаемые со стенда напряжения:  
переменное однофазное 220 В (ток до 1 А)  
переменное трехфазное 34 В (ток до 0.1 А)  
постоянное 15 В (ток до 0.1 А)  
постоянное 15 В (ток до 0.1 А)  
постоянное 9 В (ток до 2.9 А)  
постоянное 5 В (ток до 2.9 А)  
Источник постоянного тока 0.01 А  
Габаритные размеры 1380 x 1500 x 600 мм  
Масса не более 150 кг

#### Оснащенность

Стенд оснащен следующими приборами:  
• Осциллограф двухлучевой типа С-1-96

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ

#### Цель работы:

Изучение принципа действия диодов и их характеристик.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полупроводниковый диод представляет собой монокристалл, в котором созданы области различной проводимости: дырочной ( $p$ -типа) и электронной ( $n$ -типа). Граница между этими областями называется  $p$ - $n$ -переходом (рис.1, а). Если к кристаллу приложить напряжение так, чтобы к  $p$ -области был приложен отрицательный потенциал, а к  $n$ -области – положительный, то носители, притягиваясь к разноименным полюсам, создадут около  $p$ - $n$ -перехода область, лишенную носителей.

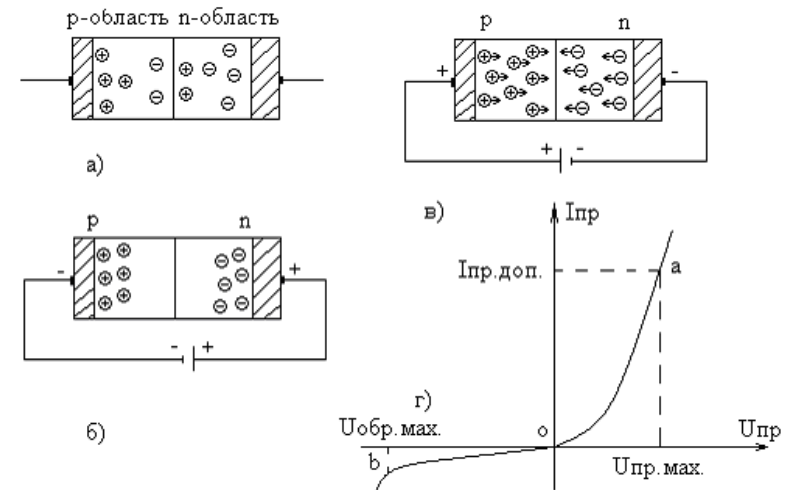


Рис. 1. Полупроводниковые диоды и их характеристики

Эта область как бы разрывает цепь, и ток в этой цепи отсутствует. Такая полярность напряжения называется запирающей или обратной и соответствует закрытому состоянию диода (рис. 1, б).

- Универсальный вольтметр типа ВЗ-38
- Универсальный вольтметр типа В7-26
- Универсальный генератор сигналов специальной формы типа Г6-26

Г6-26

- Малогабаритные магнитоэлектрические щитовые приборы типа М4200;

на токи от 50 мкА до 100 тА 9 шт.

на напряжение 30 В 1 шт.

с детекторной системой на токи

от 30 до 90 мА 4 шт.

- Кассета, оснащенная необходимой элементной базой, предназначена для выполнения лабораторных работ по теоретической и общей электротехнике

- Кассета, оснащенная необходимой элементной базой, предназначена для выполнения лабораторных работ по электронике

- Универсальный блок питания

#### Назначение

Стенд предназначен для выполнения лабораторных работ студентами инженерно-технических специальностей I, II, III курсов по следующим предметам:

- теоретические основы электротехники;
- общая электротехника;
- основы электроники;
- метрологии.

Противоположная полярность напряжения, приложенного к  $p-n$ -переходу, перемещает носители навстречу друг другу, и происходит переход (инжекция) носителей в «чужую» область. В результате по внешней цепи появляется ток. Такая полярность напряжения называется прямой или опирающей и соответствует открытому диоду (рис. 1, в). Типичная вольтамперная характеристика полупроводникового диода изображена на рис. 1, г. Здесь ветвь  $oa$  соответствует проводящему (прямому) направлению, а ветвь  $ob$  – непроводящему (обратному). В прямом направлении диод характеризуют допустимым током  $I_{np,доп}$  и соответствующим ему падением напряжения на диоде  $U_{np,макс}$ .

В обратном направлении диод характеризуют допустимым значением напряжения  $U_{обр,макс}$ , которое может быть приложено к диоду.

#### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Повторить по конспектам и учебникам теоретический материал по диодам.
2. Вычертить исследуемые схемы.
3. Подготовить таблицы.

#### РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

##### Диоды:

1. Собрать схему рис. 2 для снятия прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода на касете по электронике.

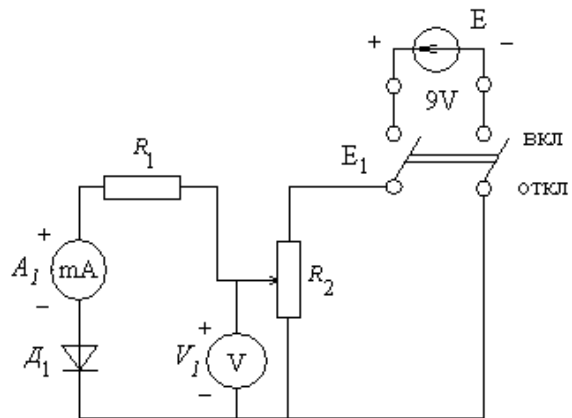


Рис. 2. Схема исследования прямой ветви ВАХ полупроводникового диода

В качестве измерителя напряжений используется универсальный вольтметр В7-26 (или аналогичный ему), предел устанавливается на 1 В.

Перед началом измерений ручка реостата R2 должна быть повернута до отказа против часовой стрелки.

После проверки схемы преподавателем включить питание стенда автоматическим выключателем E-1 на переменное напряжение 220 В. Включить источник постоянного напряжения 9 В на блоке питания стенда. Подать питание на схему, включив выключателем источника ЭДС E1 на касете по электронике. Плавно вращая ручку реостата R2 по часовой стрелке снять показания миллиамперметра при подаче напряжения на диод от 0 (с шагом 0,1 В) до значения, при котором прямой ток достигает значения порядка 100 мА. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

Прямая ветвь ВАХ полупроводникового диода									
$U_{np}$	$B$								
$I_{np}$	$mA$								

Повернуть ручку реостата R2 до отказа против часовой стрелки. Отключить питание касеты выключателем источника ЭДС E1. Разобрать схему.

2. Собрать схему рис. 3 для снятия обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода на касете по электронике.

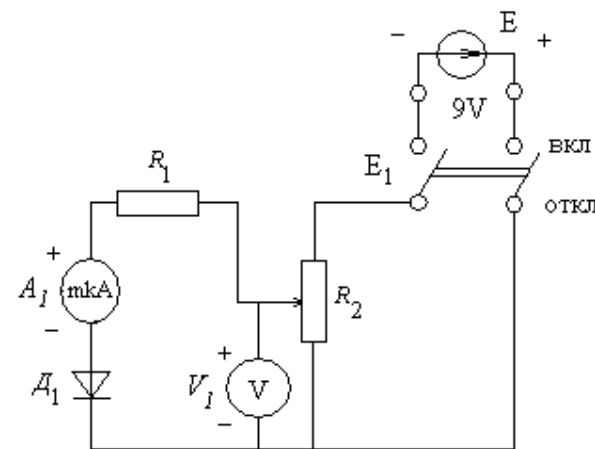


Рис. 3. Схема исследования обратной ветви ВАХ полупроводникового диода

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ  
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

## Цель работы:

Изучение принципа действия и основных характеристик неуправляемых и управляемых выпрямителей. Ознакомление с принципом действия и основными характеристиками сглаживающих фильтров.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для преобразования переменного напряжения в постоянное применяются выпрямительные устройства. В выпрямительное устройство обычно входят трансформатор, один или несколько вентилях, сглаживающий фильтр, электронный стабилизатор постоянного напряжения. В зависимости от условий работы отдельные элементы выпрямительного устройства могут отсутствовать. В настоящей работе исследуются однополупериодный и мостовой двухполупериодный выпрямители. Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис.1, а.

Для упрощения анализа будем считать диод идеальным, т. е. будем полагать, что его сопротивление в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечности. Тогда в течение первого полупериода входного напряжения, когда на аноде диода Д будет положительный относительно катода потенциал, диод будет открыт. Напряжение  $u_2$  на вторичной обмотке трансформатора будет непосредственно приложено к нагрузке  $R_H$  и в ней возникнет ток  $i_H$  (рис. 1, б), который будет повторять форму напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В течение второго полупериода входного напряжения на аноде диода Д будет отрицательный относительно катода потенциал, диод будет закрыт, а ток в нагрузке окажется равным нулю.

Постоянная составляющая выходного напряжения однополупериодной схемы выпрямителя

$$U_{н.ср.} = U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{\pi}, \quad (1)$$

где  $U_2$  – действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Предел вольтметра В7-26 устанавливается на 10 В.

После проверки схемы преподавателем включить источник ЭДС Е1 на касете по электронике. Плавно вращая ручку реостата R2 по часовой стрелке снять показания микроамперметра при подаче напряжения на диод от 0 (с шагом 1 В) до 9 В. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

Обратная ветвь ВАХ полупроводникового диода

$U_{обр}$	$B$									
$I_{обр}$	$мкА$									

3. По данным таблиц 1 и 2 построить на одном графике прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода. Подсчитать дифференциальное и статическое сопротивление диода для трех участков прямой ветви и одного участка обратной ветви.

Указание:

- дифференциальное сопротивление для обратной ветви рекомендуется определять на участке, где  $U_{обр}$  стремится к максимуму;
- статическое сопротивление определяется в середине каждого участка.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы для исследования характеристик полупроводникового диода.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

## Диоды:

1. Объяснить механизм возникновения запирающего слоя в  $p-n$ -переходе полупроводникового диода.
2. Почему при прямом включении диода ток через  $p-n$ -переход больше, чем при обратном включении диода.
3. Объяснить, как изменяется вольтамперная характеристика полупроводникового диода при изменении температуры?
4. Из каких материалов преимущественно изготавливаются полупроводниковые диоды?
5. Как маркируются и обозначаются полупроводниковые диоды?
6. В каких устройствах используются полупроводниковые диоды?
7. Как изменяется дифференциальное и статическое сопротивление при переходе от одной точек ВАХ к соседней?

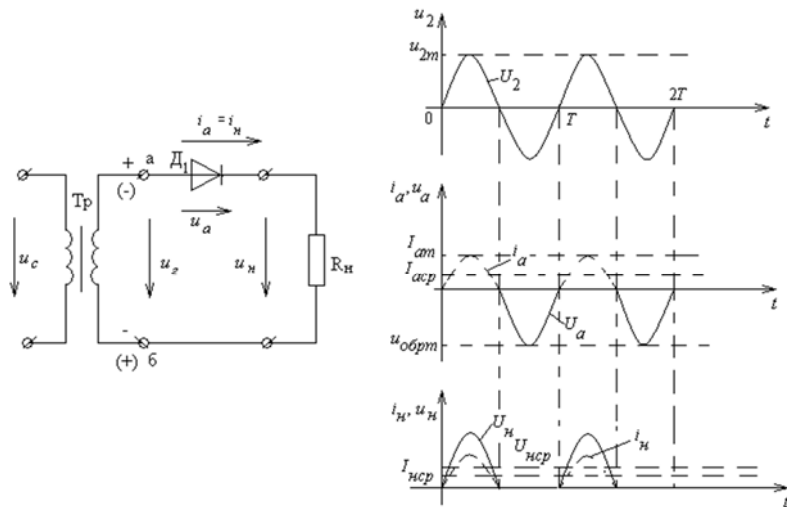


Рис. 1. Схема (а) и временные диаграммы (б) однополупериодного выпрямителя

Из переменных составляющих максимальную амплитуду  $U_{1m}$  имеет составляющая с частотой  $\omega$ , которая может быть легко найдена из разложения выходного напряжения в ряд Фурье. В однополупериодной схеме выпрямителя  $U_{1m} = 1,57U_0$ , т. е. пульсации выходного напряжения велики, что является ее существенным недостатком.

При проектировании однополупериодных выпрямителей важно правильно выбрать тип диода, который удовлетворительно работал бы в такой схеме. Этот выбор проводят на основе двух соображений. Во-первых, допустимый ток диода должен превышать величину  $I_n$ . Во-вторых, диод должен обладать определенной электрической прочностью. Последняя связана с тем, что в течение тех полупериодов, когда диод закрыт, к нему приложено напряжение, равное напряжению на вторичной обмотке трансформатора, причем это напряжение имеет обратную для диода полярность («минус» на аноде). Максимальная величина этого напряжения, называемая обратным напряжением  $U_{обр}$ , в нашем случае равна амплитуде напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_{2m}$ , т. е. в однополупериодной схеме выпрямителя:

$$U_{обр} = U_{2m} \quad (2)$$

а допустимое обратное значение диода должно быть больше  $U_{2m}$ .

Один из вариантов двухполупериодного выпрямителя, собранного по мостовой схеме, приведен на рис. 2, а. Здесь переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а выпрямленное напряжение снимается с другой.

Рассмотрим работу схемы. Пусть в некоторый момент времени переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора таково, что потенциал точки  $a$  выше потенциала точки  $b$ . Тогда от точки  $a$  («+» источника напряжения) ток будет проходить через диод  $D_1$  к точке  $z$ , далее через нагрузку к точке  $b$  и через диод  $D_3$  к точке  $в$  («-» источника напряжения). В течение следующего полупериода, когда потенциал точки  $в$  выше потенциала точки  $a$ , ток будет проходить через диод, нагрузку и диод к точке  $a$ . Для первого полупериода направление тока показано сплошными стрелками, для второго полупериода – пунктирными стрелками. В любой полупериод ток через нагрузку проходит в одном направлении.

Временные диаграммы напряжений и токов для мостовой схемы выпрямителя приведены на рис. 2, б.

Соотношения между токами и напряжениями для мостовой схемы выпрямителя очень легко определяются.

Отношение действующего значения напряжения вторичной обмотки к среднему значению выпрямленного напряжения равно коэффициенту формы синусоидального напряжения, поэтому:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_n \approx 1,11 U_n \quad (3)$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно амплитудному значению приложенного напряжения, так как в один из полупериодов, когда ток проходит через вентили 1 и 3, вентили 2 и 4 оказываются включенными параллельно и к ним приложено напряжение  $U_2$ , а в другой полупериод напряжение  $U_2$  приложено к параллельно включенным вентилям 1 и 3. Таким образом

$$U_{обр.макс.} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \frac{\pi}{2} U \approx 1,57 U_n \quad (4)$$

Среднее значение тока вентилей

$$I_{a.c.p.} = 0,5 I_n \quad (5)$$



А максимальное значение тока вентилей:

$$I_{a.\max} = \frac{U_{2m}}{R_H} = \frac{\pi U_H}{2R_H} \approx 1,57 I_H \quad (6)$$

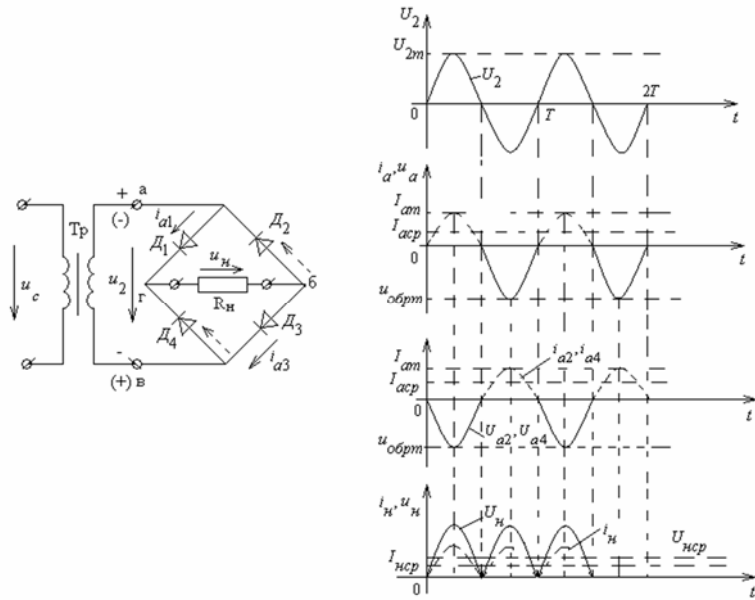


Рис. 2. Схема (а) и временные диаграммы (б) двухполупериодного выпрямителя

Емкостной фильтр  $C_\phi$  включают параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  (рис. 3, а). При таком включении конденсатор  $C_\phi$  заряжается через вентиль до амплитудного значения напряжения  $U_{2m}$  в момент времени, когда напряжение  $U_2$  на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение  $U_c$  на конденсаторе (рис. 3, б). Этому режиму соответствует интервал времени  $t_1 - t_2$ . В течение интервала времени  $t_2 - t_3$  напряжение  $U_c > U_2$ , вентиль закрыт, а конденсатор разряжается через нагрузочный резистор  $R_H$  с постоянной времени  $\tau = C_\phi R_H$ . При этом напряжение  $U_c$  на конденсаторе становится меньше напряжения  $U_2$ . Вентиль открывается. Конденсатор

$C_\phi$  начинает заряжаться, и процессы повторяются. Как показывают временные диаграммы (рис. 3, б), при включении емкостного фильтра напряжение  $U_H$  не уменьшается до нуля, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения.

Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным фильтром (рис. 3, а) приведены на рис. 3, г. Емкость конденсатора  $C_\phi$  выбирают такой величины, чтобы для основной гармоники выпрямленного напряжения сопротивление конденсатора было много меньше  $R_H$ , т. е.

$$\frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн.гарм.}} C_\phi} \ll R_H \quad \text{или} \quad C_\phi \gg \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн.гарм.}} R_H} \quad (7)$$

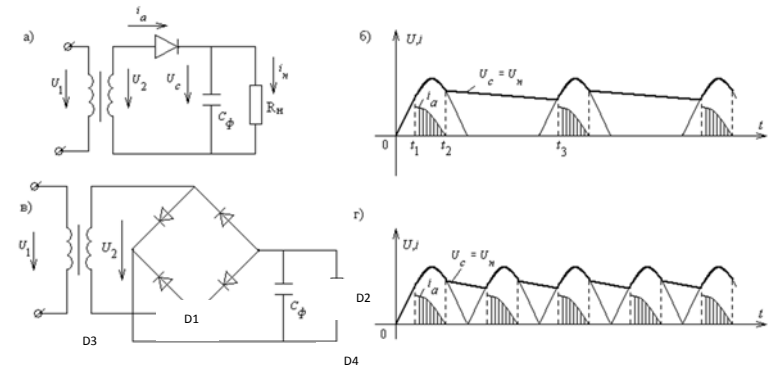


Рис. 3. Схемы емкостных фильтров с однополупериодным (а) и мостовым (в) выпрямителями; временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного (б) и мостового (г) выпрямителей с емкостным фильтром

При таком выборе величины емкости конденсатора постоянная времени разряда  $\tau_{\text{раз}}$  значительно больше периода изменения выпрямленного напряжения:

$$\tau_{\text{раз}} = C_\phi R_H \gg \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн.гарм.}}} = T \quad (8)$$

И конденсатор  $C_{\phi}$  разряжается сравнительно медленно, т. е. напряжение на нем уменьшается незначительно. Это приводит к увеличению среднего напряжения на нагрузочном резисторе  $U_{н.ср}$  по сравнению с величиной  $U_{н.ср}$  при отсутствии фильтра и уменьшению переменной составляющей, а следовательно, к снижению коэффициента пульсаций  $\mathcal{E}$ .

При использовании емкостных фильтров следует иметь в виду, что импульсы тока при открытом вентиле определяются сопротивлениями вентиля и вторичной обмотки трансформатора и могут достигать значительной величины.

Такие скачки тока могут привести в выходу вентиля из строя. Это особенно опасно для полупроводниковых диодов, так как их сопротивления при прямом включении имеют небольшую величину. Для ограничения величины тока через вентиль последовательно с ним следует включить добавочный резистор.

Применение емкостного фильтра более эффективно при высокоомном нагрузочном резисторе, так как выпрямленное напряжение и коэффициент сглаживания имеют большие величины, чем при низкоомном нагрузочном резисторе.

Оценка сглаживающего действия фильтра производится по коэффициенту фильтрации  $P$ , под которым понимают отношение коэффициента пульсации по основной гармонике на входе фильтра  $\mathcal{E}_1$  к коэффициенту пульсации на его выходе  $\mathcal{E}$ :

$$P = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_1} \quad (9)$$

Для практических расчетов обычно под коэффициентом пульсации понимают отношение:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta U_{m \sim}}{U_{ср.}} \quad (10)$$

где  $\Delta U_{m \sim}$  – амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения;

$U_{ср.}$  – среднее значение выпрямленного напряжения, равное постоянной составляющей ряда Фурье.

Пример определения коэффициента пульсации напряжения на входе выпрямителя с фильтром приведен на рис. 4, где  $\mathcal{E} = \frac{\Delta U_{m \sim}}{U_{ср.}}$

Масштаб по оси ординат можно определить, зная среднее значение напряжения по осциллограмме и показания вольтметра магнитоэлектрической системы.

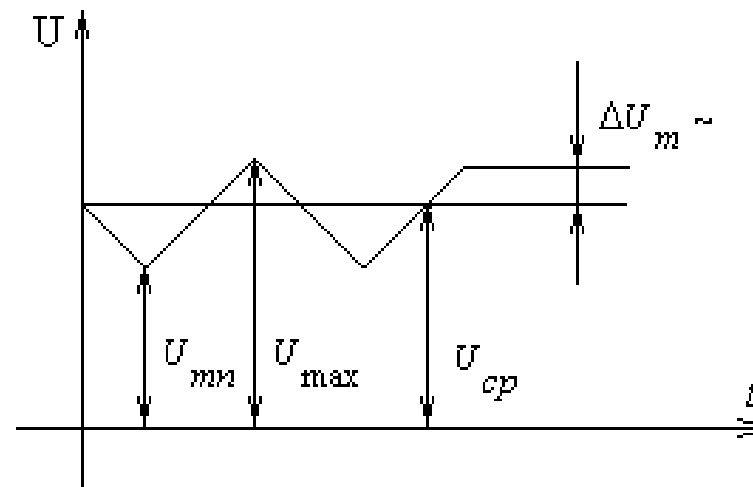


Рис. 4. Определение пульсаций выпрямителя

При работе выпрямительного устройства часть выпрямленного напряжения падает на активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и на прямом сопротивлении открытого диода. Следовательно, с ростом величины выпрямленного тока  $I_{н.ср}$  увеличивается падение напряжения на этих сопротивлениях и напряжение на нагрузочном устройстве  $U_n$  уменьшается. Зависимость  $U_n = f(I_n)$  – называется внешней характеристикой. Эта характеристика является одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства. Сопротивление открытого диода зависит от величины тока, поэтому и зависимость  $U_n = f(I_n)$  нелинейная (рис. 5, кривая 1). Если в выпрямительное

устройство включен фильтр, то зависимость  $U_H = f(I_H)$  изменится. Емкостному фильтру соответствует кривая 2.

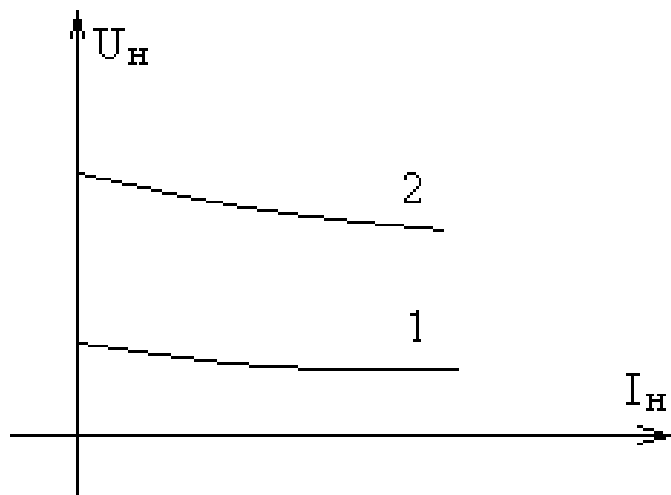


Рис. 5. Внешние характеристики выпрямителей

#### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

4. Повторить по конспектам и учебникам теоретический материал по однофазным выпрямительным устройствам.
5. Вычертить исследуемые схемы выпрямления и фильтров.
6. Подготовить таблицы.

#### РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

##### Однофазные выпрямители:

1. Собрать схему (рис. 6, а) однополупериодного выпрямителя без фильтра, а затем, схему с подключенным к нагрузке конденсатором (фильтром) рис. 6, б.

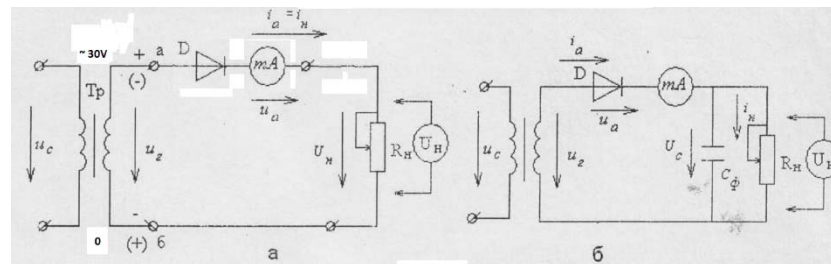


Рис. 6

2. Подключить вольтметр к нагрузочному сопротивлению (предел измерения 30 В) и миллиамперметр 100 мА последовательно с нагрузочным сопротивлением к схеме исследования неуправляемых выпрямителей.

3. Снять внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя без фильтра (рис. 6, а) и с фильтром (рис. 6, б), изменяя ток нагрузки от минимального до максимального значения и занося результаты измерений в табл. 1. Регулировка нагрузочного тока осуществляется изменением сопротивления резистора  $R$ .

Подключить осциллограф на вход цепи для снятия на кальку осциллограммы входного напряжения, затем подключить осциллограф к нагрузочному сопротивлению для снятия на кальку осциллограммы и выходного напряжения однополупериодного выпрямителя. Осциллограммы вычерчиваются для схем с фильтром и без него при максимальном токе нагрузки. При этом необходимо на экране осциллографа установить неподвижное изображение кривой исследуемого напряжения.

Таблица 1

Внешняя характеристика однополупериодного выпрямителя

Параметр	Без фильтра				С фильтром			
$U_H, В$								
$I_H, mA$								

4. Собрать схему рис. 7, а и рис. 7, б.

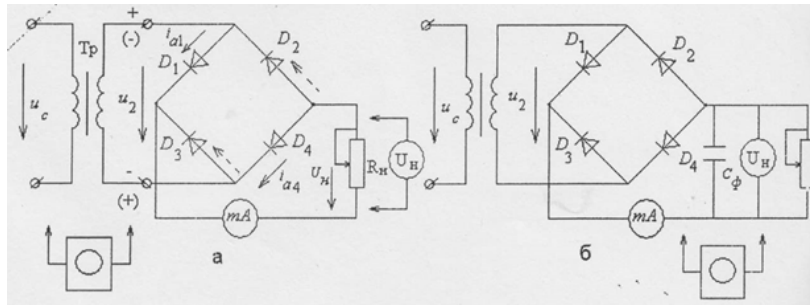


Рис. 7

(рис. 7, а) и с фильтром (рис. 7, б) занося результаты измерений в табл. 2

5. Снять внешнюю характеристику двухполупериодного выпрямителя без фильтра.

Таблица 2

Внешняя характеристика двухполупериодного выпрямителя

Параметр	Без фильтра				С фильтром			
	$U_n, B$							
$I_n, mA$								

Снять на кальку осциллограммы выходного напряжения двухполупериодного выпрямителя с фильтром и без него при максимальном токе нагрузки.

6. Построить график внешней характеристики для одно- или двухполупериодных выпрямителей с фильтрами и без них, пользуясь данными таблиц 1 и 2.

### Трехфазные выпрямители:

7. Собрать схему трехфазного однотактного выпрямителя (рис. 8).

8. Подключить вольтметр к нагрузочному сопротивлению (предел измерения 30 В) и миллиамперметр 100 мА последовательно с нагрузочным сопротивлением к схеме исследования трехфазного однотактного выпрямителя.

9. Снять внешнюю характеристику трехфазного однотактного выпрямителя (рис. 8), изменяя ток нагрузки от минимального до максимального значения и занося результаты измерений в табл. 3. Регулировка нагрузочного тока осуществляется изменением сопротивления резистора  $R_n$ .

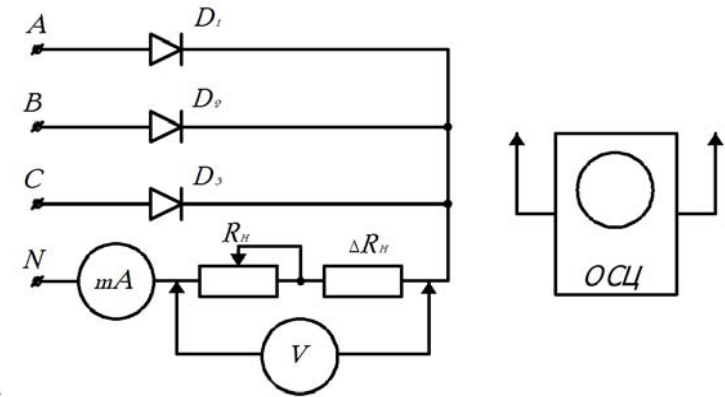


Рис. 8. Трехфазная однотактная схема выпрямителя

10. Подключить осциллограф к нагрузочному сопротивлению для снятия на кальку осциллограммы выходного напряжения трехфазного однотактного выпрямителя. Осциллограммы вычерчиваются при максимальном токе нагрузки. При этом необходимо на экране осциллографа установить неподвижное изображение кривой исследуемого напряжения.

Таблица 3

Внешняя характеристика трехфазного однотактного выпрямителя

Параметр								
$U_n, B$								
$I_n, mA$								

11. Собрать трехфазную мостовую схему выпрямителя (рис. 9).

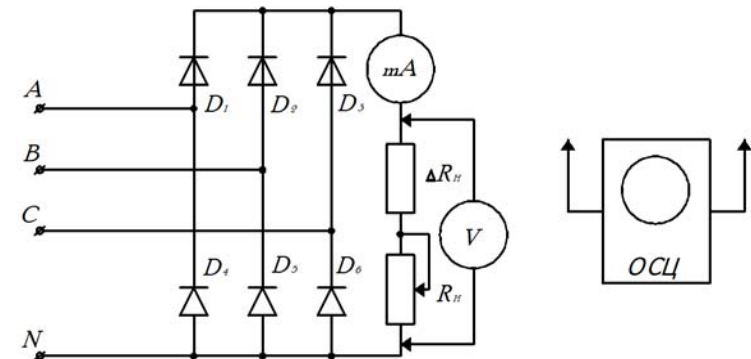


Рис. 9. Трехфазная мостовая схема выпрямителя

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНА

**Цель работы:**

Исследование и построение ВАХ стабилитрона.

**КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

**Разновидности и типы полупроводниковых диодов.** К специальным полупроводниковых диодам относятся приборы, в которых используются особые свойства  $p-n$ -переходов: управляемая полупроводниковая емкость – *варикапы* и *варакторы*; зенеровской и лавинный пробой – стабилитроны; туннельный эффект – *туннельные* и *обращенные диоды*; фотоэффект – *фотодиоды*; фотонная рекомбинация носителей заряда – *светодиоды*; многослойные диоды – *динисторы*.

*Стабилитроны* – это полупроводниковые диоды, работающие в режиме лавинного пробоя. При обратном смещении полупроводникового диода возникает электрический лавинный пробой  $p-n$ -перехода. При этом в широком диапазоне изменение тока через диод напряжение на нем меняется очень незначительно. Для ограничения тока через стабилитрон последовательно с ним включается сопротивление. Если в режиме пробоя мощность, расходуемая в нем, не превышает предельно допустимую, то в таком режиме стабилитрон может работать неограниченно долго. На рис. 1, а показано схематическое изображение стабилитронов, а на рис. 1, б приведены их вольт-амперные характеристики.

Напряжение стабилизации стабилитронов зависит от температуры. На рис. 1, б штриховой линией показано перемещение вольт-амперных характеристик при увеличении температуры. Очевидно, что повышение температуры увеличивает напряжение лавинного пробоя при  $U_{CT} > 5$  В и уменьшает его при  $U_{CT} < 5$  В. Иначе говоря, стабилитроны с напряжением стабилизации больше 5 В имеют положительный температурный коэффициент напряжения (ТКН), а при  $U_{CT} < 5$  В – отрицательный. При  $U_{CT} = 6...5$  В ТКН близок к нулю.

12. Снять внешнюю характеристику трехфазного мостового выпрямителя, изменяя ток нагрузки от минимального до максимального значения. Регулировка нагрузочного тока осуществляется изменением сопротивления  $R_n$ .

13. Результаты измерений занести в таблицу 4.

Таблица 4

Внешняя характеристика трехфазного мостового выпрямителя

Параметр										
$U_n, В$										
$I_n, МА$										

14. Снять на кальку осциллограммы выходного напряжения трехфазного мостового выпрямителя при максимальном токе нагрузки.

15. Построить график внешней характеристики для трехфазного однофазного и трехфазного мостового выпрямителя, пользуясь данными таблиц 3 и 4.

**СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Наименование и цель работы.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследования неуправляемых выпрямителей с подключенными измерительными приборами.
4. Таблицы с данными измерений.
5. Осциллограммы входных напряжений выпрямителей.
6. Выводы о проделанной работе.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ****Однофазный выпрямитель:**

Что происходит с выходным напряжением выпрямителя при росте тока нагрузки: напряжение растет, падает или остается неизменным?

В каком случае среднее напряжение выпрямителя при изменении тока нагрузки изменяется значительно: без фильтра или с фильтром?

В какой схеме выпрямителя при одном и том же среднем токе нагрузки течет больший ток через проводящий диод: в двухполупериодной мостовой, в однополупериодной?

Как зависит напряжение пульсаций выпрямителя с фильтром от тока нагрузки: напряжение пульсаций падает, растет, остается неизменным?

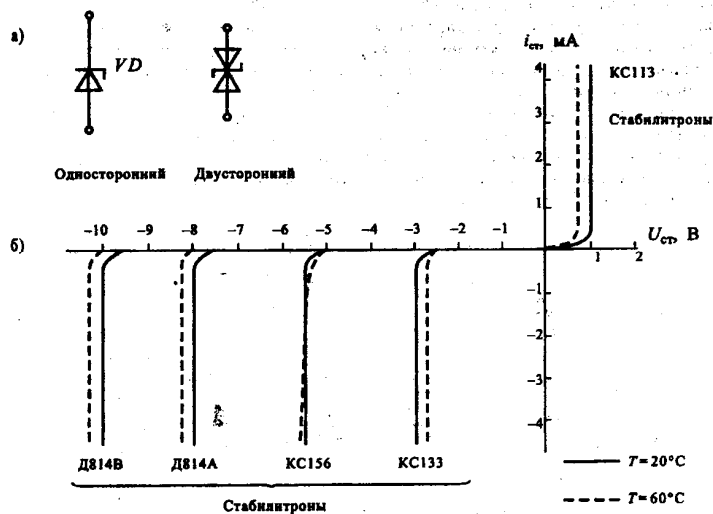


Рис. 1. Схематическое изображение стабилизаторов и их вольт-амперные характеристики

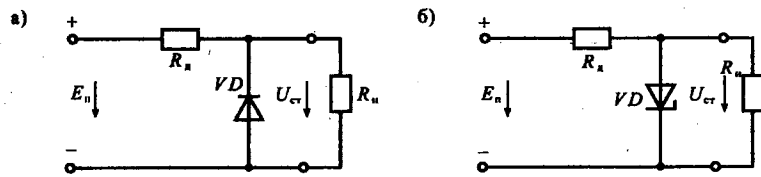


Рис. 2. Схема включения стабилизатора и стабилистра

Иногда для стабилизации напряжения используют прямое падение напряжения на диоде. Такие приборы в отличие от стабилизаторов называют *стабилистрами*. В области прямого смещения p-n-перехода напряжение на нем имеет значение 0,7...2 В и мало зависит от тока. В связи с этим стабилстры позволяют стабилизировать только малые напряжения (не более 2 В). Для ограничения тока через стабилстор последовательно с ним также включают сопротивление. В отличие от стабилизаторов, при увеличении температуры напряжение на стабилстроре уменьшается, так как прямое напряжение на диоде имеет отрицательный *ТКН*. Схема включения стабилизатора приведена на рис. 2, а, а стабилистра – на рис. 2, б.

Приведенный выше характер температурной зависимости напряжения стабилизаторов обусловлен различным видом пробоя в них. В ши-

роких переходах при напряженности поля в них до  $5 \cdot 10^4$  В/см имеет место лавинный пробой. Такой пробой при напряжении на переходе  $>6$  В имеет положительный температурный коэффициент.

В узких переходах при большой напряженности электрического поля (более  $1,4 \cdot 10^6$  В/см) наблюдается пробой, который называется *зенеровским*. Такой пробой имеет место при низком напряжении на переходе (менее 5 В) и характеризуется отрицательным температурным коэффициентом. При напряжении на переходе от 5 до 6 В одновременно существуют оба вида – 0,04 пробоя, поэтому температурный коэффициент близок к нулю. График зависимости температурного коэффициента *ТКН* от напряжения стабилизации  $U_{ст}$  приведен на рис. 3.

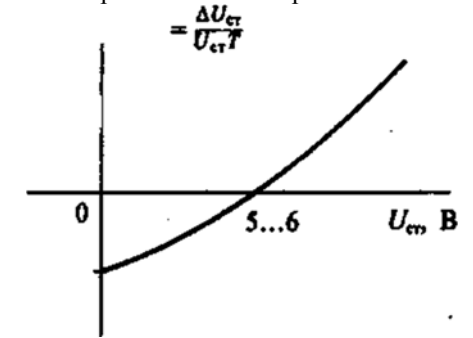


Рис. 3. График зависимости температурного коэффициента от напряжений

Основными параметрами стабилизаторов являются:

- напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации  $ТКН_{ст}$ ;
- допустимый ток через стабилизатор  $I_{стдоп}$ ;
- дифференциальное сопротивление стабилизатора  $r_{ст}$ .

Кроме того, для импульсных стабилизаторов нормируется время включения стабилизатора  $t_{вкл}$ , а для двухсторонних стабилизаторов нормируется несимметричность напряжений стабилизации

$$\Delta U_{ст} = U_{ст1} - U_{ст2} \quad (1)$$

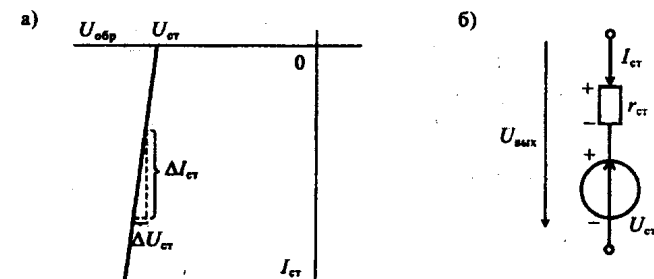


Рис. 4. Линеаризованная характеристика стабилизатора и его схема замещения

*Дифференциальное сопротивление стабилитрона* – это параметр, который характеризует наклон вольт-амперной характеристики в области пробоя. На рис. 4, а приведена линеаризованная характеристика стабилитрона, с помощью которой можно определить его дифференциальное сопротивление и построить схему замещения, приведенную на рис. 4, б.

Кроме стабилизации напряжения стабилитроны также используются для ограничения импульсов напряжения и в схемах защиты различных элементов от повышения напряжения на них.

Условное обозначение стабилитрона включает: материал полупроводника (К – кремний); обозначение подкласса стабилитронов (букву С); цифру, указывающую на мощность стабилитрона; две цифры, соответствующие напряжению стабилизации, и букву, указывающую особенность конструкции или корпуса. Например, стабилитрон КС168А соответствует маломощному стабилитрону (ток менее 0,3 А) с напряжением стабилизации 6,8 В, в металлическом корпусе.

*Варикапы* – это полупроводниковые диоды, в которых используются барьерные емкость *p-n*-перехода. Эта емкость зависит от приложенного к диоду обратного напряжения и с увеличением его уменьшается. *Добротность* барьерной емкости варикапа может быть достаточно высокой, так как она шунтируется достаточно высоким сопротивлением диода при обратном смещении.

*Туннельные диоды.* Туннельный эффект заключается в туннельном прохождении тока через *p-n*-переход. При этом ток начинает проходить через переход при напряжении, значительно меньшем контактной разности потенциалов. Достигается туннельный эффект созданием очень тонкого обедненного слоя, который в туннельном диоде достигает 0,01 мкм. При таком тонком обедненном слое в нем даже при напряжении 0,6...0,7 В напряженность поля достигает  $(5...7) \cdot 10^6$  В/см. При этом через такой узкий *p-n*-переход протекает значительный ток.

*Обращенный диод* является выраженным туннельным диодом. Подбором концентрации примесей таким образом, чтобы границы зон не перекрывались, а совпадали при отсутствии внешнего смещения на переходе, можно получить обычную диодную характеристику в области положительных напряжений. При этом участок отрицательного сопротивления будет отсутствовать.

*Фотодиод* (ФД) представляет собой диод с открытым *p-n*-переходом. Световой поток, падающий на открытый *p-n*-переход, приводит к появлению в одной из областей дополнительных неосновных носителей зарядов, в результате чего увеличивается обратный ток. В общем случае ток фотодиода определяется формулой

$$I = I_s(e^{U/\varphi T} - 1) - I_\Phi = I_{\text{диф}} - (I_s - I_\Phi), \quad (2)$$

где  $I_\Phi = S_i \Phi$  – фототок,  $S_i$  – интегральная чувствительность,  $\Phi$  – световой поток.

*Светоизлучающие диоды* (СИД) преобразуют электрическую энергию в световое излучение за счет рекомбинации электронов и дырок. В обычных диодах рекомбинация (объединение) электронов и дырок происходит с выделением тепла, т. е. без светового излучения. Такая рекомбинация вызывается фононной. В СИД преобладает рекомбинация с излучением света, которая называется фотонной. Обычно такое излучение бывает резонансным и лежит в узкой полосе частот. Для изменения длины волны излучения можно менять материал, из которого изготовлен светодиод, или изменять ток.

#### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Повторить по конспектам и учебникам теоретический материал по стабилитрону.
2. Вычертить исследуемые схемы.
3. Подготовить таблицы.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

При подключении стабилитрона к источнику постоянного напряжения через резистор получается простейшая схема параметрического стабилизатора (рис. 5).

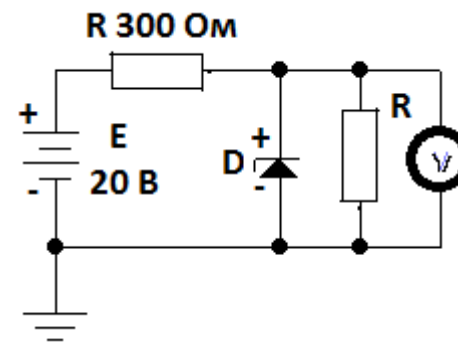


Рис. 5

Ток  $I_{CT}$  стабилитрона может быть определен падением напряжения на резисторе R:

$$I_{CT} = (E - U_{CT})/R. \quad (3)$$

Напряжение стабилизации  $U_{\text{СТАБ}}$  стабилитрона определяется точкой на вольт-амперной характеристике, в которой ток стабилитрона резко увеличивается.

Мощность рассеивания стабилитрона  $P_{\text{СТ}}$  вычисляется как произведение тока  $I_{\text{СТ}}$  на напряжение  $U_{\text{СТ}}$ :

$$P_{\text{СТ}} = I_{\text{СТ}} U_{\text{СТ}}. \quad (4)$$

Дифференциальное сопротивление стабилитрона вычисляется также, как для диода, по наклону вольт-амперной характеристики.

#### РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

##### Снятие прямой ВАХ стабилитрона

1. Собрать схему, рис. 6, обратить внимание, что стабилитрон VD к источнику надо включить: + источника на аноде, а "-" источника на катоде. Использовать в схеме миллиамперметр с пределами измерений 0–5 мА.

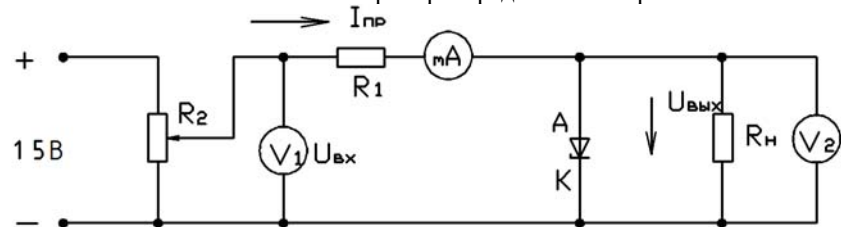


Рис. 6. Схема для снятия прямой вольт-амперной характеристики стабилитрона

2. Включить схему и снять прямую ветвь ВАХ стабилитрона  $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$ , плавно изменяя ручку регулировки входного напряжения  $R_2$  вправо, изменять прямое напряжение стабилитрона  $U_{\text{пр}}$  (показания вольтметра  $V_2$ ) от 0 с шагом 0,1 В до значения, при котором прямой ток стабилитрона  $I_{\text{пр}}$  достигает значения 5 мА.

3. Показания приборов  $V_1$ ;  $V_2$ ; mA (7 ÷ 9 точек измерений) записать в табл. 1

Таблица 1

$U_{\text{вх}}$ , В									
$I_{\text{пр}}$ , mA									
$U_{\text{пр}}$ , В									

4. По данным табл.1 построить прямую ветвь ВАХ стабилитрона  $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$ .

##### Снятие обратной ветви ВАХ стабилитрона

Обратная ветвь ВАХ стабилитрона есть рабочая характеристика. Схема для снятия этой характеристики представлена на рис. 7. Схема подключения – обратная, т. е. «+» источника на катоде, а «-» источника на аноде. Изменились величины напряжений  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{обр}}$ , изменятся и диапазоны измерений вольтметров.

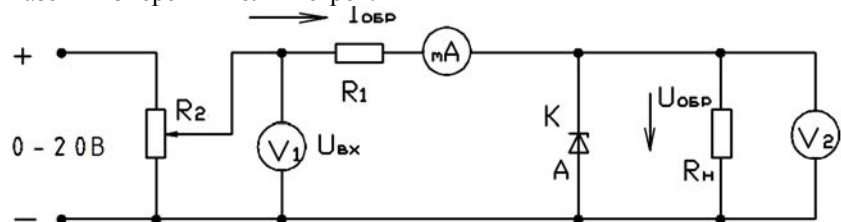


Рис. 7. Схема для снятия обратной вольт-амперной характеристики стабилитрона

1. Собрать схему на рис. 7. Использовать миллиамперметр с пределами измерений 0–30 мА.

2. С разрешения преподавателя включить стенд и снять обратную ветвь вольт-амперной характеристики  $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$  стабилитрона.

3. Вращением ручки регулировки входного напряжения  $R_2$  вправо, изменять обратный ток  $I_{\text{обр}}$  от 0 до 30 мА через каждые 2,5 мА.

4. Показания приборов  $V_1, V_2$ , mA (7–9 измерений) записать в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{\text{вх}}$ , В									
$I_{\text{обр}}$ , mA									
$U_{\text{обр}}$ , В									

5. Отключить стенд. Опытные данные показать руководителю лабораторных работ и с его разрешения отключить стенд, разобрать схему.

6. По данным таблицы 2 построить обратную ветвь вольт-амперной характеристики  $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$  на одном рисунке с прямой вольт-амперной характеристикой.

7. Определить основные параметры стабилитрона; напряжение стабилизации  $U_{\text{СТ}}$ , дифференциальное сопротивление  $R_{\text{диф}}$

8. По данным табл. 2 построить характеристику стабилитрона напряжения  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ .



## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель лабораторной работы.
2. Электрическая схема для исследования характеристик кремниевого стабилитрона.
3. Таблицы с данными измерений.
4. Графики вольт-амперных характеристик кремниевого стабилитрона.
5. Параметры кремниевого стабилитрона, определенные по вольт-амперным характеристикам.
6. Выводы о проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить механизм возникновения запирающего слоя в р-п-переходе полупроводникового прибора.
2. Указать отличительные особенности кремниевого стабилитрона от полупроводникового диода.
3. Что показывает вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона?
4. Перечислить основные параметры стабилитрона.
5. Объяснить принцип действия простейшего стабилизатора постоянного напряжения.
6. Привести условное изображение полупроводникового диода и кремниевого стабилитрона.

## Лабораторная работа № 4

### СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

#### Цель работы:

Приобретение практических навыков в снятии вольт-амперных характеристик туннельного диода.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Туннельный диод – это полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на использовании туннельного эффекта. Туннельный эффект заключается в том, что электроны проходят потенциальный барьер р-п-перехода без изменения своей энергии. Для получения туннельного эффекта применяется полупроводниковый материал (германий, арсенид галлия) с повышенной концентрацией примесей

(до  $10^{21}$  примесных атомов в  $1 \text{ см}^3$ ) в то время, как обычно концентрация примесей в полупроводниках не превышает  $10^{15}$  в  $1 \text{ см}^3$ .

Полупроводники с повышенным содержанием примесей называют вырожденными. Ввиду большой концентрации примесей в обеих областях полупроводникового кристалла ширина р-п-перехода оказывается очень малой, что приводит к значительному повышению напряженности электрического поля в переходе, которая может достигать  $10^8 \text{ В/м}$ .

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика туннельного диода. Как видно из характеристики (рис. 1) с ростом напряжения растет прямой ток диода, обусловленный прямым туннельным током (участок 0а). В дальнейшем уменьшение тока (участок а-б) обусловлено постепенным прекращением туннельных переходов. В интервале напряжений от  $U_n$  до  $U_b$  с ростом напряжения ток диода падает, т. е. на этом участке р-п-переход оказывает переменному току некоторое отрицательное сопротивление  $R_d = \frac{+\Delta U}{-\Delta I}$ .

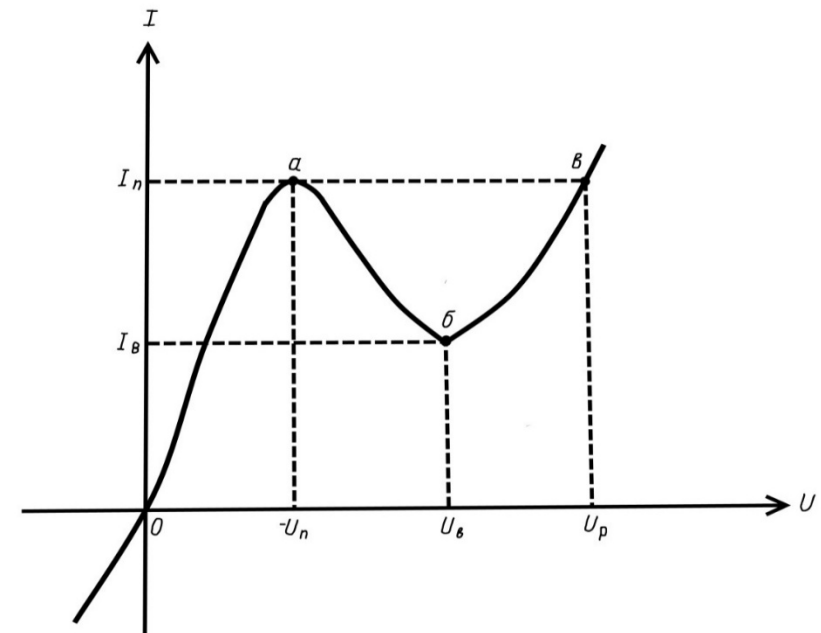


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

На участке б-в прямой ток диода начинает возрастать в результате роста тока, обусловленного обычными переходами носителей.

Основными параметрами туннельных диодов являются:  
 пиковый ток  $I_n$  – прямой ток в точке максимума вольт-амперной характеристики;  
 ток впадины  $I_b$  – прямой ток в точке минимума вольт-амперной характеристики;  
 напряжение пика  $U_n$  – прямое напряжение, соответствующее пиковому току;  
 напряжение впадины  $U_b$  – прямое напряжение, соответствующее току впадины;  
 напряжение раствора  $U_p$  – прямое напряжение, большее чем напряжение впадины, при котором ток равен пиковому.  
 дифференциальное сопротивление  $R_d = \frac{\Delta U}{-\Delta I}$ , определяемое на падающем участке характеристики и имеющее отрицательную величину;  
 отношение токов  $\frac{I_n}{I_b}$ .

Туннельные диоды нашли широкое применение для усиления и генерирования колебаний, в быстродействующих переключающих схемах и т. д.

#### РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Снять прямую ветвь вольт-амперной характеристики туннельного диода.
2. Определить основные параметры туннельного диода.
3. Составить отчет о проделанной работе.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему (рис. 2) для снятия вольт-амперной характеристики. Установить переключатель SA в положение «1» и, изменяя напряжение с помощью потенциометра от 0 до 400 мВ.

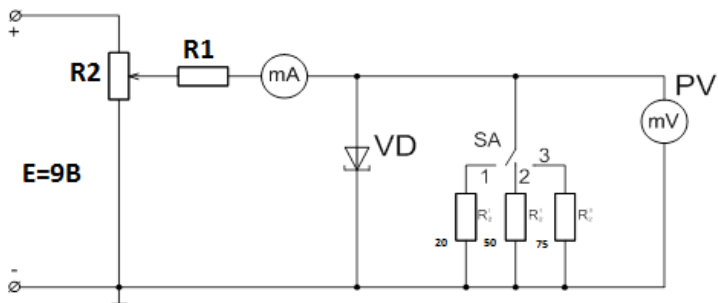


Рис. 2. Схема для исследования туннельного диода

Через 40 мВ, записать в табл. 1 показания милливольтметра и миллиамперметра для каждого значения напряжения.

2. Повторить пункт 1, устанавливая переключатель SA в положение «2», а затем в положение «3».

$I=f(U)$  Таблица 1

	I мА		
$U_{мВ}$	$R'_2=20 \text{ Ом}$	$R''_2=50 \text{ Ом}$	$R'''_2=75 \text{ Ом}$
0			
80			
...			
400			

3. По данным таблицы. 1 построить графики вольт-амперных характеристик и определить параметры туннельного диода  $R_d, I_b, U_n, U_b, U_p$  и отношение  $\frac{I_n}{I_b}$ .

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Технические данные измерительных приборов и источника питания.
2. Схема для снятия вольт-амперной характеристики туннельного диода.
3. Таблица наблюдений.
4. Вольт-амперные характеристики.
5. Основные параметры исследуемого диода.
6. Выводы о проделанной работе.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление туннельного эффекта?
2. Чем отличается туннельный диод от обычного полупроводникового диода?
3. Как объяснить смысл понятия «отрицательное сопротивление»?
4. Как можно объяснить ход вольт-амперной характеристики туннельного диода?
5. Каковы конструктивные особенности, маркировка и условные обозначения туннельных диодов?
6. Где находят применение туннельные диоды?

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ. ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ТИРИСТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

#### Цель работы:

Изучение принципа действия неуправляемых и управляемых выпрямителей. Приобрести практические навыки для снятия характеристик тиристорov.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Тиристор – полупроводниковый прибор, состоящий из трех последовательно соединенных p–n–переходов.

Тиристоры бывают триодные и диодные; первые имеют три вывода (электрода), вторые – два. Триодные тиристоры называют также тринисторами, а диодные динисторами.

Структура триодного тиристора показана на рис. 1. Прибор имеет три вывода: анод – вывод от внешней p<sub>1</sub>-области; катод – вывод от внешней n<sub>2</sub>-области; управляющий электрод – вывод от внутренней p<sub>2</sub>-области.

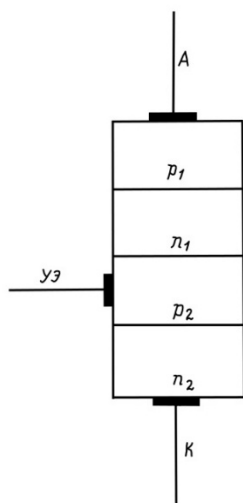


Рис. 1. Структура тиристора

Вольт-амперная характеристика динистора показана на рис. 2, а. На характеристике можно выделить несколько участков. Участок О–А характеризуется небольшим током, протекающим через прибор, и большим падением напряжения. Напряжение и ток, соответствующие точке А, называются напряжением и током включения ( $U_{вкл}$  и  $I_{вкл}$ ). Участок А–Б соответствует неустойчивому, нерабочему состоянию прибора, динамическое сопротивление которого становится отрицательным. Участок Б–В характеризуется большим током, проходящим через прибор, и небольшим падением напряжения на нем. Участки О–А и Б–В характеризуют два устойчивых состояния прибора, что позволяет использовать его в качестве переключателя в различных схемах автоматики и вычислительной техники.

Значительно расширяется область использования тиристорov снабженных управляющим электродом–тринисторов. Меняя напряжение, подаваемое на управляющий электрод, а значит, и ток управления, можно изменять напряжение включения тринистора. Вольт-амперные характеристики тринистора, представляемые на рис. 2 б, показывают, что с ростом тока управления уменьшается напряжение включения тиристора.

К числу основных параметров тиристора, значения которых необходимо определить при выполнении данной работы, относятся: ток включения -  $I_{вкл}$  и напряжение включения  $U_{вкл}$ .

Указанные параметры определяются на вольт-амперной характеристике тиристора (рис. 2, б).

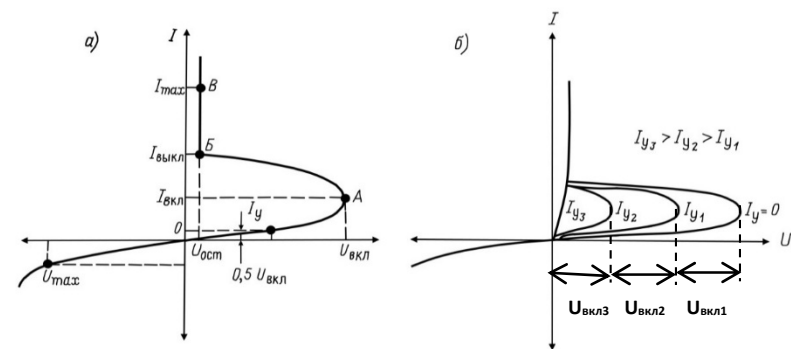


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика диодного (а) и триодного (б) тиристора

Довольно часто в различных устройствах требуется регулировать величину выпрямленного напряжения. Такие выпрямители получили название управляемых выпрямителей. В них в качестве управляемых вентилях

в настоящее время применяются тиристоры. Тиристор – полупроводниковых переключатель – изготавливается из кремния и имеет три  $p-n$ -перехода (рис. 3, а). Напряжение питания  $E_a$  подается на тиристор так, что переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  открыты, а переход  $\Pi_2$  закрыт. Ток  $I_a$ , проходящий через тиристор, при этом будет определяться высоким сопротивлением закрытого перехода. На рис. 3, б приведены вольт-амперные характеристики тиристора для положительных значений напряжений. С увеличением напряжения  $U_a$  ток тиристора возрастает незначительно. Но при достижении напряжения  $U_{вкл}$  (рис. 3, б) наступает электрический пробой в переходе  $\Pi_2$ . При этом происходит лавинообразное увеличение числа носителей зарядов за счет лавинного умножения носителей в переходе  $\Pi_2$  движущимися дырками и электронами. В результате этого ток  $I_a$  увеличивается скачком, и напряжение на тиристоре уменьшается.

В анодную цепь тиристора для ограничения тока включают резистор  $R_a$ . При скачкообразном росте анодного тока увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_a$ , а напряжение на тиристоре уменьшается. Изменение анодного тока после наступления электрического пробоя производится изменением величины  $R_a$  или  $E_a$ . Если снять питающее напряжение, то свойства  $p-n$ -перехода  $\Pi_2$  восстанавливаются.

Напряжение  $U_{вкл}$  можно снизить введением дополнительных носителей в любой из слоев, образующих переход  $\Pi_2$ . Появление дополнительных носителей увеличивает число актов ионизации атомов в переходе, и поэтому напряжение  $U_{вкл}$  уменьшается. Дополнительные носители зарядов, образующие ток  $I_y$ , вводятся в тиристор вспомогательной цепью от источника питания  $E_y$ . Влияние величины тока  $I_y$  на работу тиристора видно из рис. 3, б.

При включении тиристора в обратном направлении переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  будут закрыты и в нем появится весьма небольшой ток. Во избежание пробоя тиристора в обратном направлении необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше  $U_{обр.макс}$ .

Управление в выпрямителе сводится к управлению моментом отпирания тиристорov. Наиболее распространенный способ управления тиристорами – импульсно-фазовый; при этом на управляющий электрод тиристора периодически подаются импульсы напряжения  $U_y$ , которые могут сдвигаться по времени по отношению к моменту появления положительной полуволны коллекторного напряжения тиристора  $U_k$ .

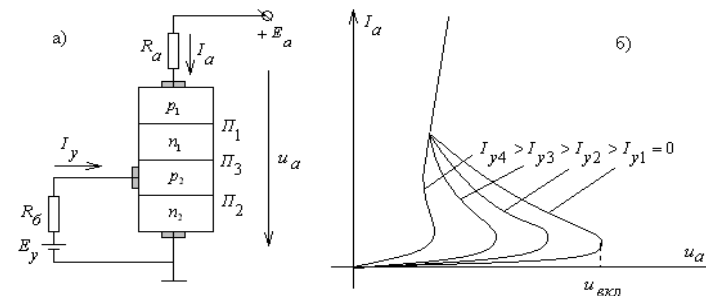


Рис. 3. Структурная схема (а) и вольт-амперные характеристики (б) тиристорov

В тех случаях, когда по условиям эксплуатации выпрямителя допускается некоторый разброс моментов отпирания тиристорov, вместо импульсного управления может быть применено фазовое управление синусоидальным током. Если, например, тиристор включить последовательно с сопротивлением нагрузки (рис. 4, а) и управлять моментом включения тиристора сигналами переменного тока, то через нагрузку будут протекать импульсы тока (рис. 4, б).

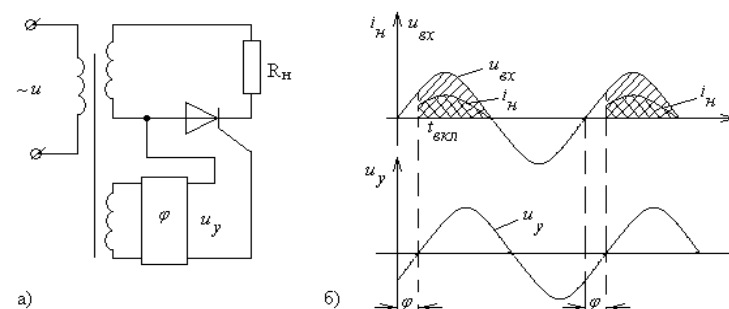


Рис. 4. Схема (а) и временные диаграммы (б) управляемого тиристорного выпрямителя

В приведенной схеме момент включения определяет фазовый сдвиг  $\varphi$  напряжения управления. Фазовый сдвиг создает регулируемый фазовращатель, включенный в цепь управляющего электрода.

### ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Повторить по конспектам и учебникам теоретический материал по тиристорам.
2. Вычертить исследуемые схемы выпрямления.
3. Подготовить таблицы.

### РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Снять вольт-амперную характеристику динистора  $I = f(U)$  при  $I_y = 0$ .
2. Снять вольт-амперную характеристику тринистора  $I = f(U)$  при  $I_y > 0$ .
3. Определить основные параметры исследуемого тиристора.
4. Сделать выводы о проделанной работе.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую схему исследования тиристора (рис. 5).
2. Разомкнуть электрическую цепь управляющего электрода и при токе управления  $I_y = 0$  снять прямую ветвь вольт-амперной характеристики динистора. Изменяя величину напряжения с помощью потенциометра  $R_2$  через 1-2 В снять показания миллиамперметра и вольтметра. Обратить особое внимание на момент включения динистора. Результаты измерений записать в табл. 1.

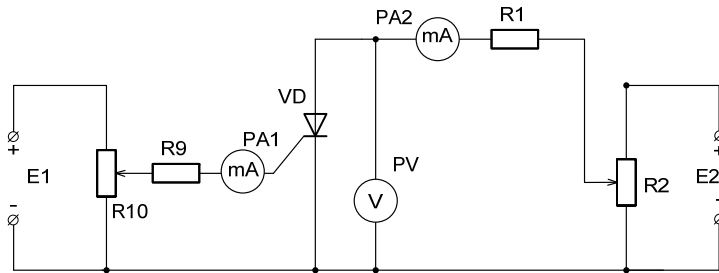


Рис. 5. Электрическая схема исследования тиристора

$I_{np} = f(U_{np})$  при  $I_y = 0$  Таблица 1

$U_{np}, \text{В}$	$I_{np}, \text{мА}$

3. Замкнуть электрическую цепь управляющего электрода. Установить с помощью потенциометра  $R_{10}$  ток в цепи управляющего электрода  $I_y = 5 \text{ мА}$  и снять прямую ветвь вольт-амперной характеристики тринистора.

4. Изменяя с помощью потенциометра  $R_2$  подаваемое напряжение, измерить для каждого напряжения ток, протекающий через тринистор. Обратить особое внимание на момент включения тринистора.

Таблица 2 –  $I_{np} = f(U_{np})$  при  $I_y = 0$

$I_y = 0,5 \text{ мА}$		$I_y = 1,0 \text{ мА}$		$I_y = 2,0 \text{ мА}$	
$U_{np}, \text{В}$	$I_{np}, \text{мА}$	$U_{np}, \text{В}$	$I_{np}, \text{мА}$	$U_{np}, \text{В}$	$I_{np}, \text{мА}$

5. Установить ток управления  $I_y = 1,0 \text{ мА}$  и повторить операции п. 4.
6. Установить ток управления  $I_y = 2,0 \text{ мА}$  и проделать операции п. 4. Результаты измерений записать в табл. 2.
7. По данным измерений табл. 1 и 2 построить вольт-амперные характеристики динистора и тринистора и определить параметры  $I_{вкл}$  и  $U_{вкл}$ .

### Управляемый тиристорный выпрямитель

1. Собрать электрическую схему (рис. 6).
2. Подключить измерительные приборы к схеме исследования управляемого тиристорного выпрямителя.

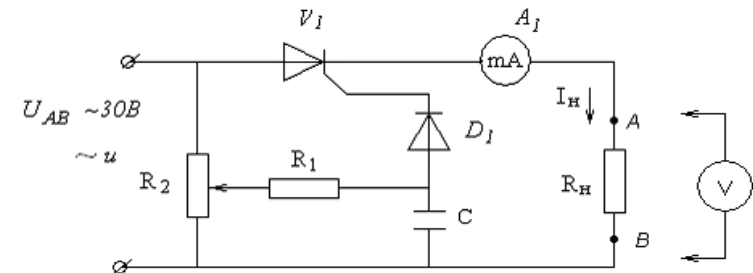


Рис. 6. Схема исследования управляемого тиристорного выпрямителя

3. Снять на кальку осциллограммы напряжения управляемого тиристорного выпрямителя, подключив осциллограф к точкам А и В, изменяя с помощью потенциометра  $R_2$  фазу управления от 0 до 90° через интервал 15–20 градусов.
4. Для различных углов измерить значения тока миллиамперметром и напряжения вольтметром и записать их в таблицу 3.

Таблица 3

Угол						
$U_n, В$						
$I_n, мА$						

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Название и технические данные использованных измерительных приборов.
3. Схемы исследования неуправляемых и управляемых выпрямителей с подключенными измерительными приборами.
4. Таблицы с данными измерений.
5. Графики внешних характеристик выпрямителей.
6. Осциллограммы входных напряжений выпрямителей.
7. Выводы о проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что происходит с выходным напряжением выпрямителя при росте тока нагрузки: напряжение растет, падает или остается неизменным.
2. Как называются  $p-n$ -переходы тиристора?
3. Чем отличается динистор от тринистора?
4. Каково назначение управляющего электрода в тринисторе? Чем характеризуются эти состояния?
5. Где применяются динисторы и тринисторы?

## Лабораторная работа № 6

СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ  $h$ -ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА ПО СХЕМЕ С ОЭ

## Цель работы:

Приобрести практические навыки в снятии характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## А. Устройство и принцип действия транзистора

Транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя электрическими взаимодействующими  $p-n$ -переходами, имеющий не менее трех выводов и пригодный для усиления мощности.

Основой для изготовления транзистора является пластинка германия или кремния с проводимостью  $n$  или  $p$ -типа. Толщина пластинки составляет десятки микрон. Эта пластинка называется *базой* Б. К базе с двух сторон примыкают области с дырочной проводимостью, противоположной проводимости базы.

Таким образом, транзистор состоит из трех слоев полупроводника, причем слои имеют одинаковую проводимость, а разделяющий их средний слой – проводимость, противоположную им (рис. 1, а). Так, если средний слой имеет электронную проводимость, то крайние – дырочную. Такой транзистор называется транзистором типа  $p-n-p$  (рис. 1, б). Между слоями с различными видами проводимости образуются  $p-n$ -переходы. Их у транзистора два. Один  $p-n$ -переход работает в прямом направлении и называется *эмиттерным*, а соответствующий ему крайний слой называется *эмиттером* Э. Другой  $p-n$ -переход работает в обратном направлении и называется *коллекторным*, а соответствующий ему крайний слой называется *коллектором* К. Площадь эмиттерного перехода меньше площади коллекторного перехода.

Концентрация основных носителей заряда в эмиттере во много раз больше концентрации основных носителей заряда в базе. Концентрация основных носителей заряда в коллекторе несколько меньше концентрации их в эмиттере. Поэтому проводимость эмиттера на несколько порядков выше проводимости базы, а проводимость коллектора меньше проводимости эмиттера.

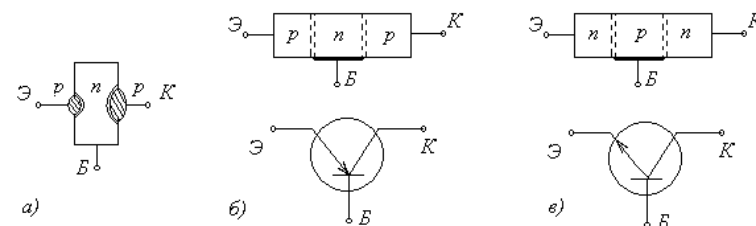


Рис. 1. Транзистор: а – схематическое устройство; б, в – структура и условное изображение

Если средний слой имеет дырочную проводимость, а крайние слои – электронную, то транзистор называется  $n-p-n$  типа (рис. 1, в). От эмиттера, базы и коллектора имеются выводы – электроды для включения транзистора в схему. Пластинка германия помещается в герметизированном корпусе, в котором через изолированные втулки выведены электроды.

Физические процессы в транзисторах обоих типов одинаковы. Различие состоит только в полярности включения источников питания и соответственно в направлениях протекания токов.

Транзистор имеет три внешних вывода. В зависимости от того, какой из выводов является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включений:

- с общей базой (рис. 2, а);
- с общим эмиттером (рис. 2, б);
- с общим коллектором (рис. 2, в).

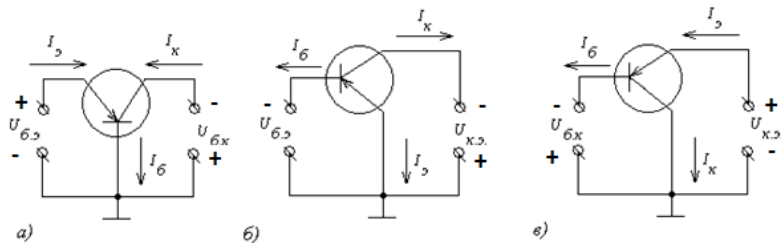


Рис. 2. Схемы включения транзисторов

Наиболее часто применяются схемы с общим эмиттером и общей базой. При любой схеме включения транзистора полярность включения источников питания должна быть выбрана так, чтобы эмиттерный переход был включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. В каждой схеме имеются две электрические цепи: входная и выходная. Так, например, в схеме, приведенной на рис. 2, а, входной цепью является эмиттерная цепь, состоящая из источника входного напряжения смещения  $E_э = 0,1 \div 1 \text{ В}$ , источника входного напряжения  $U_{вх}$ , эмиттерного  $p-n$ -перехода, включенного в прямом направлении.

Коллекторная – выходная цепь состоит из источника питания коллектора  $E_к = 10 \div 30 \text{ В}$ , резистора нагрузки  $R_н$  и коллекторного перехода, включенного в обратном направлении.

В зависимости от полярности постоянных напряжений, приложенных к эмиттерному и коллекторному переходам, различают четыре режима работы транзистора: активный, отсечки, насыщения и инверсный.

Активный режим работы транзистора используется для усиления малых напряжений. В этом режиме на эмиттерный переход подается прямое напряжение, а на коллекторный – обратное.

Режим отсечки и насыщения используют при работе транзистора в качестве переключателя. В режиме отсечки к обоим переходам подводится обратное напряжение, и транзистор оказывается запертым. В режиме насыщения оба перехода работают в прямом направлении, и транзистор оказывается полностью открытым. Сопротивление транзистора в режиме насыщения очень мало.

В инверсном режиме коллекторный переход находится под прямым напряжением, а эмиттерный – под обратным.

Стрелка на эмиттере в условном изображении транзистора в схемах указывает направление прямого тока в цепи эмиттера. Принцип действия транзистора рассмотрим кратко на примере транзистора типа  $p-n-p$ , включенного по схеме с общей базой, как показано на рис. 3.

Если к коллекторному переходу приложено обратное напряжение а цепь эмиттера разомкнута, то в цепи коллектора протекает небольшой обратный ток  $I_{к0}$  – единицы микроампер. Этот ток возникает под действием обратного напряжения и создается направленным перемещением неосновных носителей заряда через коллекторный переход – дырок базы и электронов коллектора. Обратный ток протекает по цепи:  $+E_к$ , база-коллектор транзистора,  $-E_к$ . Обратный ток коллектора  $I_{к0}$  не зависит от напряжения на коллекторе, но зависит от температуры полупроводника.

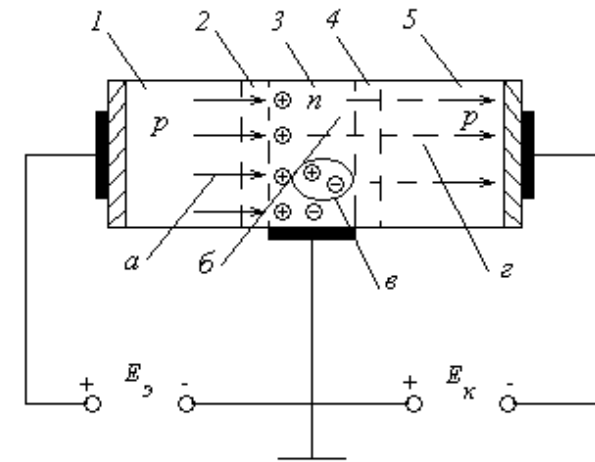


Рис. 3. Принцип действия транзистора: а – инжекция; б – диффузия; в – рекомбинация; г – втягивание; 1 – эмиттер; 2 – эмиттерный переход; 3 – база; 4 – коллекторный переход; 5 – коллектор

При включении в цепь эмиттера постоянного напряжения  $E_э$  в прямом направлении потенциальный барьер эмиттерного перехода понижается. Начинается инжектирование (впрыскивание) дырок из эмиттера в базу. Так как электрического поля в базе нет, то инжектированные в базу дырки перемещаются в ней посредством диффузии. При этом дырки рекомбинируют с электронами базы. А так как концентрация носителей в базе значительно меньше, чем в эмиттере, то рекомбинируют очень немногие дырки. При малой толщине базы почти все дырки будут доходить до коллекторного перехода. На место рекомбинированных электронов в базу поступают электроны от источника питания  $E_к$ . Дырки, рекомбинировавшие с электронами в базе, создают ток базы.

Под действием обратного напряжения  $E_к$  потенциальный барьер коллекторного перехода повышается, толщина перехода увеличивается. Но потенциальный барьер коллекторного перехода не создает препятствия для прохождения через него дырок. Вошедшие в область коллекторного перехода дырки попадают в сильное ускоряющее поле, созданное на переходе коллекторным напряжением, и втягиваются коллектором, образуя коллекторный ток  $I_к$ .

Коллекторный ток протекает по цепи:  $+E_к$ , база-коллектор,  $-E_к$ . Таким образом, в транзисторе типа  $p-n-p$  протекают три тока: эмиттера, коллектора и базы (пути и направления токов эмиттера и коллектора показаны на рис. 3). В проводе, являющемся выводом базы, токи эмиттера и коллектора направлены встречно. Следовательно, ток базы равен разности токов эмиттера и коллектора  $I_б = I_э - I_к$ .

Физические процессы в транзисторе типа  $n-p-n$  протекают аналогично процессам в транзисторе типа  $p-n-p$ .

Полный ток эмиттера транзистора  $I_э$  определяется количеством инжектированных эмиттером дырок. Основная часть этих дырок, достигая коллектора за счет диффузии, создает коллекторный ток  $I_к$ . Незначительная часть инжектированных в базу дырок рекомбинирует в базе, создавая ток базы  $I_б$ . Следовательно, ток эмиттера разделяется на ток базы и ток коллектора, т. е.  $I_э = I_б + I_к$ . Ток эмиттера является входным током, ток коллектора – выходным. Выходной ток составляет часть входного, т. е.

$$\Delta I_к = \alpha \cdot \Delta I_э, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока для схемы с общей базой. Этот коэффициент называют коэффициентом усиления по току:

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \quad (2)$$

Так как выходной ток меньше входного, то коэффициент  $\alpha$  меньше единицы. Он показывает, какая часть инжектированных в базу дырок достигает коллектора. Чем тоньше база, тем больше  $\alpha$ . Обычно  $\alpha$  составляет  $0,92-0,99$ .

В схеме с общим эмиттером выходным током является ток коллектора, а входным – ток базы. Коэффициент усиления по току для схемы с общим эмиттером:

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}, \text{ но } \Delta I_б = \Delta I_э - \Delta I_к = \Delta I_э - \alpha \cdot \Delta I_э = \Delta I_э (1 - \alpha), \text{ тогда}$$

$$\beta = \frac{\alpha \cdot \Delta I_э}{\Delta I_э (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3)$$

Следовательно, коэффициент усиления по току для схемы с общим эмиттером составляет десятки единиц.

В схеме с общим коллектором выходным током является ток эмиттера, а входным – ток базы. Поэтому коэффициент усиления по току для схемы с общим коллектором определяется по формуле:

$$\frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э (1 - \alpha)} = \frac{1}{1 - \alpha} \approx \beta \quad (4)$$

Выходной ток транзистора зависит от входного тока. Поэтому транзистор является прибором, управляемым током.

## Б. Характеристики и параметры транзистора

Для расчета транзисторных схем достаточно иметь две характеристики: входную и выходную. Входной характеристикой транзистора называется зависимость входного от входного напряжения при постоянном выходном токе или постоянном выходном напряжении.

Выходной характеристикой транзистора называется зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе или постоянном входном напряжении.

Входное и выходное напряжения отсчитываются относительно общего электрода. Поэтому для различных схем включения транзистора выходные и входные характеристики отображают различные зависимости.



Схема для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, приведена на рис. 4.

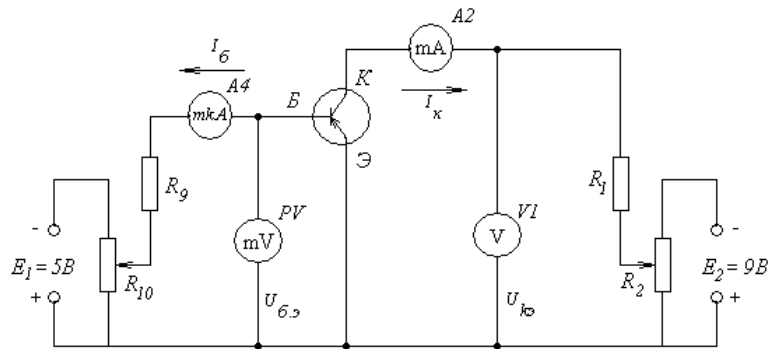


Рис. 4. Схема для снятия характеристик транзистора с общим эмиттером

Входным током в схеме с общим эмиттером, как видно на рис. 4, является ток базы, а входным напряжением – напряжение между базой и эмиттером. Выходным током является ток коллектора, а выходным напряжением – напряжение между коллектором и эмиттером.

Входной характеристикой транзистора в схеме с общим эмиттером называется зависимость тока базы от напряжения между базой и эмиттером при постоянном напряжении на коллекторе, т. е.

$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{б.э}}) \text{ при } U_{\text{к.э.}} = \text{const.}$$

Сначала снимается входная характеристика при короткозамкнутом коллекторном переходе. При этом к коллектору и эмиттеру приложены положительные относительно базы напряжения. Оба  $p-n$ -перехода транзистора оказываются включенными параллельно в прямом направлении. Ток базы равен сумме токов эмиттера и коллектора:

$$I_{\text{б}} = I_{\text{э}} + I_{\text{к}} \quad (5)$$

Снимается характеристика при небольшом отрицательном напряжении на коллектора, например при  $E_{\text{к}} = -5B$ , затем при большем и т. д. В результате получается семейство входных характеристик, как показано на рис. 5, а.

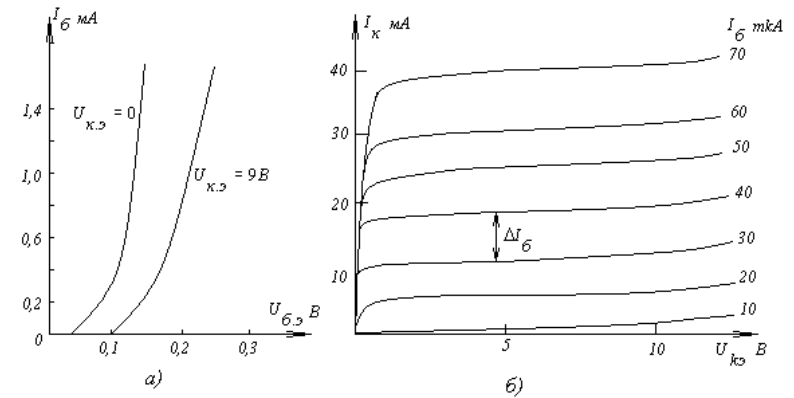


Рис. 5. Статические характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером: а) входные характеристики, б) выходные характеристики.

При отрицательных напряжениях на коллекторе ток базы является разностью токов эмиттера и коллектора:

$$I_{\text{б}} = I_{\text{э}} - I_{\text{к}}$$

С увеличением отрицательного напряжения на базе ток базы увеличивается, так как при этом увеличивается прямое напряжение на эмиттерном переходе.

Выходной характеристикой транзистора в схеме с общим эмиттером называется зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при постоянном токе базы, т. е.

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к.э}}) \text{ при } I_{\text{б}} = \text{const.}$$

Для расчета и анализа схем на транзисторах часто используют так называемые  $h$ -параметры:

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \text{ при } u_2 = 0 \text{ (входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе);}$$

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \text{ при } i_1 = 0 \text{ (коэффициент обратной связи, показывающий,}$$

какая часть переменного напряжения передается на вход транзистора при разомкнутой входной цепи);}

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \text{ при } i_1 = 0 \text{ (коэффициент усиления транзистора при коротком замыкании на выходе);}$$

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \text{ при } i_1 = 0 \text{ (выходная проводимость транзистора при разо-}$$

мкнутой входной цепи).

Однотипные  $h$ -параметры получаются различными для разных схем включения транзистора, поэтому их снабжают дополнительным индексом: для схемы ОБ (общей базой), например,  $h_{1\bar{b}}$ ,  $h_{12\bar{b}}$  и т. д., а для схемы ОЭ (общим эмиттером) –  $h_{11\varepsilon}$ ,  $h_{11\varepsilon}$  и т. д.

Указанные  $h$ -параметры можно определить по статическим характеристикам транзистора. Выражая значения токов и напряжений через соответствующие приращения для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, получим:

$$h_{11\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\bar{b}\varepsilon}}{\Delta I_{\bar{b}}} \text{ при } U_{\text{к.э}} = \text{const} (\Delta U_{\text{к.э}} = 0)$$

$$h_{12\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\text{кэ}}}{\Delta U_{\bar{b}}} \text{ при } I_{\bar{b}} = \text{const} (\Delta I_{\bar{b}} = 0)$$

$$h_{21\varepsilon} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\bar{b}}} \text{ при } U_{\text{к.э}} = \text{const} (\Delta U_{\text{к.э}} = 0)$$

$$h_{22\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\text{кэ}}}{\Delta I_{\text{к}}} \text{ при } I_{\bar{b}} = \text{const} (\Delta I_{\bar{b}} = 0)$$

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

##### **Снятие входных характеристик транзистора**

1. Собрать схему, представленную на рис. 4 Потенциометром  $R_2$  установить напряжение между эмиттером и коллектором  $0 \text{ В}$ .
2. Изменяя напряжение между эмиттером и базой транзистора потенциометром  $R_{10}$  от  $0$  до  $500 \text{ мВ}$ , измерить ток базы  $I_{\bar{b}}$  для каждого значения напряжения и записать в табл. 1.

Таблица 1

$$I_{\bar{b}} = f(U_{\bar{b}\varepsilon}) \text{ при } U_{\text{к.э.}} = \text{const} = 0$$

$I_{\bar{b}}, \mu A$							
$U_{\bar{b}\varepsilon}, B$							

3. Потенциометром  $R_2$  установить напряжение между эмиттером и коллектором  $9 \text{ В}$ . Изменяя напряжение между эмиттером и базой транзистора потенциометром  $R_{10}$  от  $0$  до  $500 \text{ мВ}$ , измерить ток базы  $I_{\bar{b}}$  для каждого значения напряжения и записать в табл. 2.

Таблица 2

$$I_{\bar{b}} = f(U_{\bar{b}\varepsilon}) \text{ при } U_{\text{к.э.}} = \text{const} = 9B$$

$I_{\bar{b}}, \mu A$							
$U_{\bar{b}\varepsilon}, B$							

4. По данным таблиц 1 и 2 построить входные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

##### **Снятие выходных статических характеристик транзистора**

1. С помощью потенциометра  $R_{10}$  установить ток базы  $20 \text{ мкА}$  (для транзистора типа МП40).
2. Изменяя потенциометром  $R_2$  напряжение между эмиттером и коллектором от  $0$  до  $9 \text{ В}$  через  $1 \text{ В}$ , измерить ток, протекающий в цепи коллектора. Показания приборов записать в табл. 3.

Таблица 3

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к.э}}) \text{ при } I_{\bar{b}} = \text{const} = 20 \mu A$$

$I_{\text{к}}, \mu A$							
$U_{\text{кэ}}, B$							

3. Повторить п. 2, установив ток базы  $40 \text{ мкА}$ . Показания приборов записать в таблицу 4.

Таблица 4

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к.э}}) \text{ при } I_{\bar{b}} = \text{const} = 40 \mu A$$

$I_{\text{к}}, \mu A$							
$U_{\text{кэ}}, B$							

4. Повторить п. 2, установив ток базы  $60 \text{ мкА}$ . Показания приборов записать в таблицу 5.

Таблица 5

$$I_K = f(U_{KЭ}) \text{ при } I_0 = \text{const} = 60 \mu A$$

$I_K, \text{мА}$							
$U_{KЭ}, \text{В}$							

5. Повторить п. 2, установив ток базы 80 мкА. Показания приборов записать в таблицу 6.

Таблица 6

$$I_K = f(U_{KЭ}) \text{ при } I_0 = \text{const} = 80 \mu A$$

$I_K, \text{мА}$							
$U_{KЭ}, \text{В}$							

6. По данным табл. 3, 4, 5 и 6 построить выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

7. Используя характеристики транзистора, определить параметры  $h_{11Э}, h_{12Э}, h_{21Э}, h_{22Э}$ .

8. Сделать выводы о проделанной работе.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Название и технические данные измерительных приборов, источников питания и транзистора.
3. Схема для снятия характеристик транзистора.
4. Таблицы наблюдений.
5. Графики выходных характеристик транзистора.
6. Графики входных характеристик транзистора.
7. Значения  $h$ -параметров, определенные по характеристикам транзистора.
8. Выводы о проделанной работе.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные особенности схемы включения транзистора с общим эмиттером?
2. Какую зависимость выражает входная характеристика транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?
3. Какую зависимость выражает выходная характеристика транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?
4. Какие виды транзисторов Вы знаете?
5. Каков физический смысл параметров  $h_{11}, h_{12}, h_{21}$  и  $h_{22}$ ?

## Лабораторная работа № 7

### СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

#### Цель работы:

Приобрести практические навыки в снятии характеристик полевого транзистора.

#### ЗАДАНИЕ

1. Снять стоковую (выходную) характеристику полевого транзистора  $I_c = f(U_c)$  при  $U_{зи} = \text{const}$ .
2. Снять стоко-затворную (проходную) характеристику транзистора  $I_c = f(U_{зи})$  при  $U_c = \text{const}$ .
3. Определить параметры  $I_{c,нас}, U_{c,нас}, S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}$  по характеристикам полученным опытным путем.
4. Составить отчет о проделанной работе.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом представляет собой стержень кремния п-типа с двумя невыпрямляющими контактами на торцах и кольцевым электродом из индия в центральной части стержня (рис. 1). Принцип действия этого прибора основан на зависимости ширины р-п-перехода от приложенной к нему разности потенциалов. Поскольку запирающий слой почти лишен подвижных носителей заряда, его проводимость мала как у собственного полупроводника. Ограничивая со всех сторон токопроводящий канал, запирающий слой тем самым определяет сечение этого канала. Если включить источник питания  $U_2$ , как показано на рис. 1, то в приборе между невыпрямляющими контактами пойдет ток. Омический контакт, от которого начинают движение основные носители заряда, называется **истоком**, а контакт, к которому они двигаются через канал – **стоком**. Электрод, с помощью которого осуществляется управление поперечным сечением канала, называется **затвором**.

Управление сечением канала, а следовательно, и током, протекающим через канал, производится с помощью обратно включенного р-п-перехода. При подаче отрицательного напряжения на затвор увеличивается толщина запирающего слоя и уменьшается сечение канала. Это приводит к увеличению сопротивления между истоком и стоком и уменьшению

тока. Уменьшение напряжения на **затворе** вызывает уменьшение сопротивления канала и увеличение тока, протекающего между **истоком** и **стоком**.

На рис. 2 представлены статические выходные (или стоковые) и стоко-затворные (проходные) характеристики полевого транзистора.

Полевой транзистор с N-каналом (с управляющим p-n-переходом).

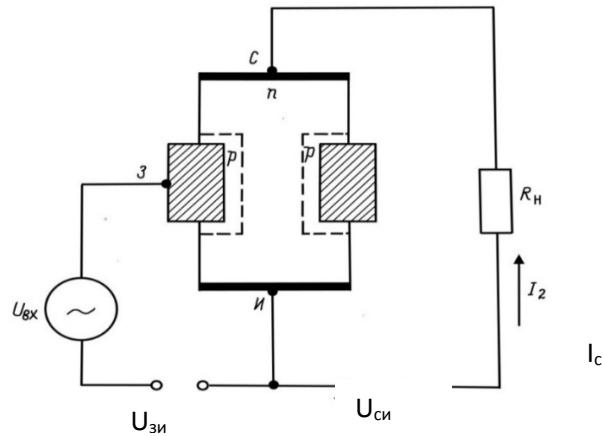


Рис. 1. Устройство и схема включения полевого транзистора

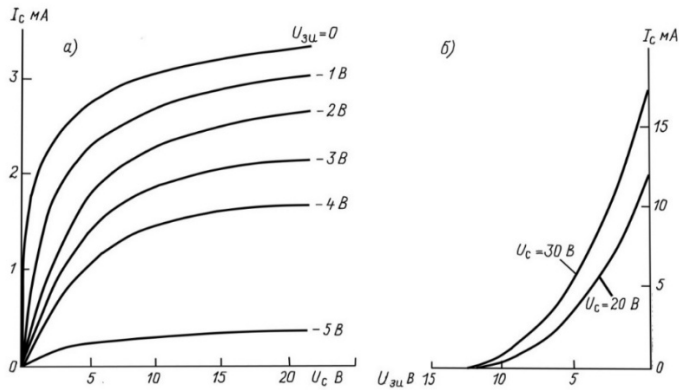


Рис. 2. Статистические характеристики полевого транзистора с управляющим p-n-переходом:  
а) стоковые (выходные), б) стоко-затворные (проходные).

Статические характеристики полевого транзистора (рис. 2) можно снять с помощью схемы, представленной на рис. 3.

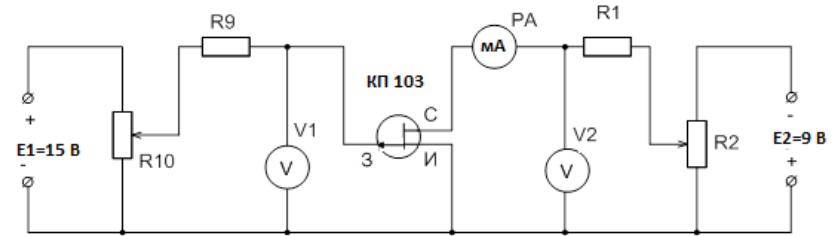


Рис. 3. Электрическая схема исследования полевого транзистора

К основным параметрам полевого транзистора относятся:

крутизна проходной характеристики  $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}$   $U_c = \text{const}$ ;

входное сопротивление  $R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_{зи \max}}$  при  $U_c = \text{const}$ .

выходное (внутреннее) сопротивление  $R_{вых} = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c}$  при  $U_{зи} = \text{const}$ .

Напряжение между стоком и истоком при нулевом смещении на затворе, при котором наступает насыщение тока стока –  $U_{с.нас}$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ

#### Снятие стоковых (выходных) характеристик полевого транзистора

1. Собрать схему, представленную на рис. 3, установить потенциометром напряжение на затворе 0 В.
2. Изменяя потенциометром  $R_2$  напряжение на стоке от 0 до 10 В через 1 В, измерить ток стока для каждого значения напряжения. Показания приборов записать в табл. 1.
3. Повторить пункт 2, установив напряжение на затворе 0,3 В.
4. Повторить пункт 2, установив напряжение на затворе 0,5 В.
5. По данным таблицы 1 построить стоковые характеристики полевого транзистора.

Таблица 1

$$I_c = f(U_c) \text{ при } U_{зи} = \text{const}$$

U <sub>c</sub> В	U <sub>c</sub> мА		
	U <sub>зи</sub> = 0	U <sub>зи</sub> = 0,3 В	U <sub>зи</sub> = 0,5 В
0			
1			
2			
...			
10			

### Снятие стоко-затворных (проходных) характеристик полевого транзистора

1. Установить на стоке напряжение – 5 В с помощью потенциометра R2 и, изменяя напряжения на затворе потенциометром R10, добиться, чтобы ток стока стал равным нулю. Напряжение на затворе, при котором ток стока становится равным нулю, называется напряжением отсечки.

Таблица 2

$$I_c = f(U_{зи}) \text{ при } U_c = \text{const}$$

U <sub>c</sub> = - 5 В	
U <sub>зи</sub> В	I <sub>c</sub> мКА

- Плавно изменяя напряжение на затворе от напряжения отсечки до нуля через 0,2 В, измерить для каждого значения напряжения ток стока. Показания приборов записать в табл. 2,
- По данным табл. 2 построить стоко-затворную характеристику.

### Определение параметров полевого транзистора

1. По стоковой характеристике для U<sub>зи</sub> = 0 определить U<sub>нас</sub>, I<sub>нас</sub> транзистора.

2. По стоко-затворной характеристике определить ее крутизну

$$S = \frac{\Delta I_c}{U_{зи}}$$

3. Сделать выводы о проделанной работе.

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Технические данные измерительных приборов, источников питания и полевого транзистора.

- Схема для снятия характеристик полевого транзистора.
- Таблицы наблюдений.
- Графики стоковых характеристик полевого транзистора.
- График стоко-затворной характеристики полевого транзистора.
- Значение параметров U<sub>нас</sub>, I<sub>нас</sub>, S, определенные по полученным характеристикам полевого транзистора.
- Выводы о проделанной работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Как обозначаются полевые транзисторы на схемах?
- Как называются электроды полевого транзистора?
- Какими преимуществами обладают полевые транзисторы по сравнению с биполярными?
- Почему полевой транзистор имеет второе название – канальный?
- Какие полупроводниковые материалы используют для изготовления полевых транзисторов?

## Лабораторная работа № 8

### УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

#### Цель работы:

Исследование характеристик однокаскадных транзисторных усилителей.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

##### А. Принцип построения усилительных каскадов

Принцип построения и работы различных каскадов удобно показать на примере структурной схемы (рис. 1, а) действительной для усилительных каскадов на одном транзисторе.

Основными элементами каскада является управляемый элемент УЭ, функцию которого выполняет биполярный или полевой транзистор, и резистор R. Совместно с напряжением питания E эти элементы образуют **выходную цепь каскада**. Усиливаемый сигнал U<sub>вх</sub> принятый на рис. 1, а для простоты синусоидальным, подается на вход УЭ. Выходной сигнал U<sub>вых</sub> снимается с выхода УЭ или с резистора R. Он создается в результате изменения сопротивления УЭ и, следовательно, тока i в выходной цепи под воздействием входного напряжения. Процесс усиления

основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения  $E$  в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом.

Для усилительных каскадов, питающихся постоянным напряжением, важно выявить сущность получения переменного выходного напряжения (или приращений напряжения обоих знаков на выходе) при переменном напряжении на входе.

Ввиду использования для питания источника постоянного напряжения  $E$  ток  $i$  в выходной цепи каскада является однонаправленным (рис. 1, а). При этом переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как **переменные составляющие** суммарных тока и напряжения, накладывающиеся на их постоянные составляющие  $I_n$  и  $U_n$  (рис. 1, б). Связь между постоянными и переменными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, т. е.  $I_n \geq I_m$  и  $U_n \geq U_m$ . Если эти условия не будут выполняться, ток  $i$  в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведет к искажению формы выходного сигнала. Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока  $I_n$  и напряжения  $U_n$ . Задачу решают путем подачи во входную цепь каскада помимо усиливаемого сигнала соответствующего постоянного напряжения  $U_{вх\ n}$  (или задания соответствующего постоянного входного тока  $I_{вх\ n}$ ).

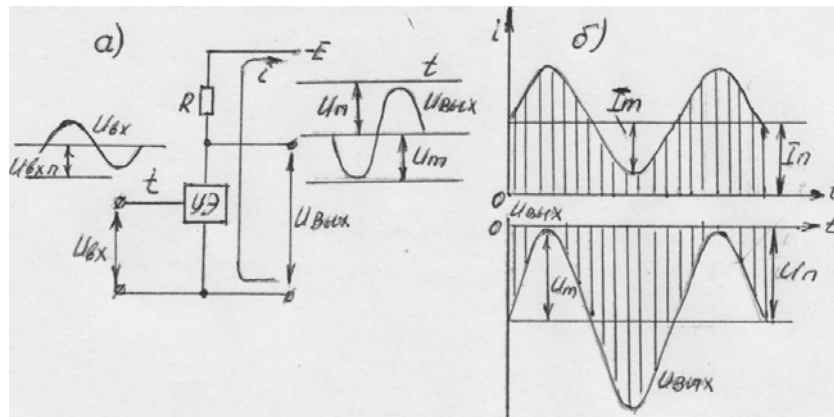


Рис. 1. Принцип построения (а) и временные диаграммы (б) усилительного каскада

Таким образом, усилительные свойства каскадов усиления основываются на следующем. При подаче на управляемый элемент напряжения входного сигнала в токе выходной цепи создается переменная составляющая, вследствие чего на управляемом элементе образуется аналогичная составляющая напряжения, превышающая переменную составляющую напряжения на входе. Усилительные свойства проявляются тем сильнее, чем больше сказывается влияние входного сигнала на выходной ток управляемого элемента и чем сильнее проявляется воздействие изменения тока в выходной цепи на изменение напряжения на управляемом элементе (т. е. чем выше сопротивление  $R$ ).

## В. Усилительный каскад ОЭ

Основными элементами схемы являются источник питания  $E_k$ , управляемый элемент – транзистор  $T$  и резистор  $R_k$ . Эти элементы образуют **главную цепь** усилительного каскада, в которой за счет протекания управляемого по цепи коллекторного тока создается усиленное переменное напряжение на выходе схемы. Остальные элементы каскада выполняют **вспомогательную роль**. Конденсаторы  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  являются разделительными. Конденсатор  $C_{p1}$  исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника входного сигнала по постоянному току, что позволяет, во-первых, исключить протекание постоянного тока через источник входного сигнала по цепи  $E_k - R_1 - R_g$  и, во-вторых, обеспечить независимость от внутреннего сопротивления этого источника  $R_g$  напряжения на базе  $U_{бн}$  в режиме покоя. Функция конденсатора  $C_{p2}$  сводится к пропусканию в цепь нагрузки переменной составляющей напряжения и задержанию постоянной составляющей.

Резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  используются для задания режима покоя каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, ток покоя управляемого элемента (в данном случае ток  $I_{кп}$ ) создается заданием соответствующей величины тока базы покоя  $I_{бп}$ . Резистор  $R_1$  предназначен для создания цепи протекания тока  $I_{бп}$ . Совместно с  $R_2$  резистор  $R_1$  обеспечивает исходное напряжение на базе  $U_{бн}$  относительно зажима "+" источника питания.

Резистор  $R_3$  является элементом отрицательной обратной связи, предназначенным для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры. Конденсатор  $C_3$  шунтирует резистор  $R_3$  по переменному току, исключая тем самым проявление отрицательной обратной связи в каскаде по переменным составляющим. Отсутствие конденсатора  $C_3$  привело бы к уменьшению коэффициентов усиления схемы.

Температурная зависимость параметров режима покоя обусловливается зависимостью коллекторного тока покоя  $I_{кп}$  от температуры. Основными причинами такой зависимости являются изменения от температуры начального тока коллектора  $I_{к0(э)}$ , напряжения  $U_{б0}$  и коэффициента  $\beta$ . Температурная нестабильность указанных параметров приводит к прямой зависимости тока  $I_{кп}$  от температуры. Проявление отрицательной обратной связи и ее стабилизирующего действия на ток  $I_{кп}$  нетрудно показать непосредственно на схеме (рис. 2).

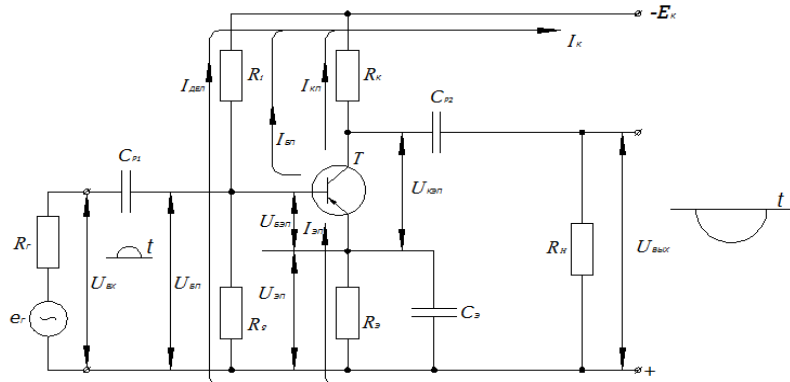


Рис. 2. Схема усилительного каскада ОЭ

Предположим, что под влиянием температуры ток  $I_{кп}$  увеличился. Это отражается на увеличении тока  $I_{эп}$ , повышении напряжения  $U_{эп} = I_{эп} R_э$  и соответственно снижении напряжения  $U_{бэп} = U_{бп} - U_{эп}$ . Ток базы  $I_{бп}$  уменьшается, вызывая уменьшение тока  $I_{кп}$ , чем создается препятствие наметившемуся увеличению тока  $I_{кп}$ . Иными словами, стабилизирующее действие отрицательной обратной связи, создаваемой резистором  $R_э$ , проявляется в том, что температурные изменения параметров режима покоя передаются цепью обратной связи в противофазе на вход каскада, препятствуя тем самым изменению тока  $I_{кп}$ , а следовательно, и напряжения  $U_{кэп}$ .

Принцип действия каскада ОЭ заключается в следующем. При наличии постоянных составляющих токов и напряжений в схема подача на вход каскада переменного напряжения приводит к появлению переменной составляющей тока базы транзистора, а следовательно, переменной составляющей тока в выходной цепи каскада (в коллекторном токе

транзистора). За счет падения напряжения на резисторе  $R_к$  создается переменная составляющая напряжения на коллекторе, которая через конденсатор  $C_2$  передается на выход каскада – в цепь нагрузки.

Рассмотрим основные положения, на которых базируется расчет элементов схемы каскада, предназначенных для обеспечения требуемых параметров режима покоя (расчет по постоянному току).

Анализ каскада по постоянному току проводят **графоаналитическим методом**, основанным на использовании графических построений и расчетных соотношений. Графические построения проводятся с помощью выходных (коллекторных) характеристик транзистора (рис. 3, а). Удобство метода заключается в наглядности нахождения связи параметров режима покоя каскада ( $U_{кэп}$  и  $I_{кп}$ ) с амплитудными значениями его переменных составляющих (выходного напряжения  $U_{выхп}$  и тока  $I_{кп}$ ), являющимися исходными при расчете каскада.

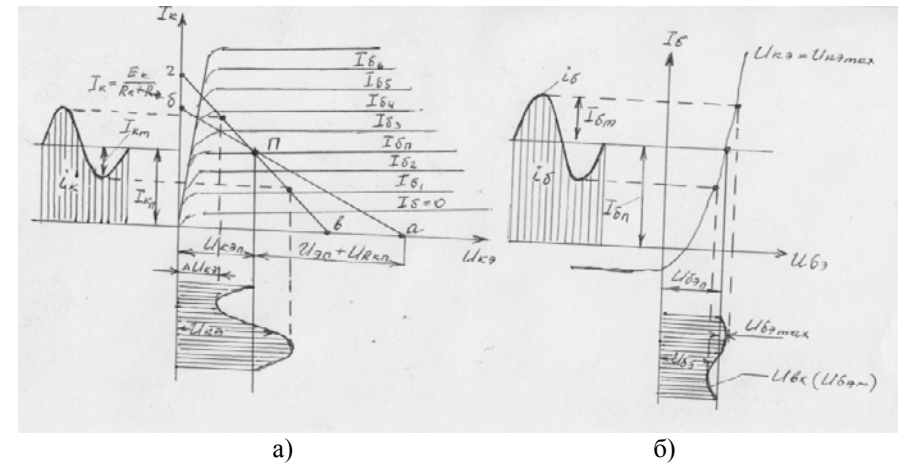


Рис. 3. Графическое определение режима покоя каскада с ОЭ на коллекторных (а) и базовой (б) характеристиках транзистора

На выходных характеристиках (рис. 3, а) проводят так называемую **линию нагрузки каскада по постоянному току** (а – б), представляющую собой геометрические места точек, координаты  $U_{кэ}$  и  $I_{кэ}$ , которых соответствуют возможным значениям точки (режима) покоя каскада. Аналитическую зависимость  $U_{кэп} = f(I_{кп})$  находят из уравнения, характеризующего баланс напряжений в выходной цепи каскада:

$$U_{кэп} = E_к - I_{кп} R_к - I_{эп} R_э = E_к - I_{кп} R_к - \frac{I_{кп}}{\alpha} R_э \quad (1)$$

Поскольку коэффициент  $\alpha$  близок к единице, без особой погрешности можно записать

$$U = E_k - I_{кп} (R_k + R_3) \quad (2)$$

Выражение (2) является графическим уравнением прямой. В связи с этим построение линии нагрузки каскада по постоянному току удобно провести по двум точкам, характеризующим режим холостого хода (точка а) и короткого замыкания (точка б) выходной цепи каскада (рис. 3, а). Для точки а:  $I_{кп} = 0$ ,  $U_{кэп} = -E_k$  и для точки б:  $U_{кэп} = 0$ ,  $I_{кп} = E_k / (R_k + R_3)$ . Выбрав по входной (базовой) характеристике  $I_{бп} = f(U_{бэ})$  необходимое значение тока базы покоя  $I_{бп}$ , тем самым определим координаты точки П пересечения соответствующей выходной характеристики при  $I_б = I_{бп}$  с линией нагрузки каскада по постоянному току (рис. 3, а).

При определении переменных составляющих выходного напряжения каскада и коллекторного тока транзистора используют **линию нагрузки каскада по переменному току**. При этом необходимо учесть, что по переменному току сопротивление в цепи эмиттера транзистора равно нулю, так как резистор  $R_3$  шунтируется конденсатором  $C_3$ , а к коллекторной цепи подключается нагрузка, поскольку сопротивление конденсатора  $C_{p2}$  по переменному току мало. Если к тому же учесть, что сопротивление источника питания  $E_k$  по переменному току также близко к нулю, то окажется, что сопротивление каскада по переменному току определяется сопротивлениями резисторов  $R_k$  и  $R_n$ , включенных параллельно, т. е.  $R_{н\infty} = R_k \parallel R_n$ . Сопротивление нагрузки каскада по постоянному току  $R_{н.} = R_k + R_3$  больше, чем по переменному току  $R_{н\infty} = R_k \parallel R_n$ .

Поскольку при наличии входного сигнала напряжение и ток транзистора представляют собой суммы постоянных и переменных составляющих, линия нагрузки по переменному току проходит через точку покоя П (рис. 3, а). Наклон линии нагрузки по переменному току будет больше, чем по постоянному току. Линию нагрузки по переменному току строят по отношению приращений напряжения к току:  $\Delta U_{кэ} / \Delta I_k = R_k \parallel R_n$ .

При подаче на вход каскада (см. рис. 2) напряжения  $U_{вх}$  в базовой цепи транзистора создается переменная составляющая тока  $i_{б\infty}$ , связанная с напряжением  $U_{вх}$  входной характеристикой транзистора (рис. 3, а). Так как ток коллектора через коэффициент  $\beta$  пропорционально зависит от тока базы, в коллекторной цепи транзистора создаются переменная составляющая тока  $i_{к\infty}$  (рис. 3, а) и переменное выходное напряжение  $U_{вых}$ , связанное с током  $i_{к\infty}$  линией нагрузки по переменному току. При этом линия нагрузки по переменному току характеризует изменение мгновенных значений тока коллектора  $i_k$  и напряжения на транзисторе  $U_{кэ}$  или, как говорят, перемещение **рабочей точки**. Рабочая точка перемещается

вниз от точки покоя П при положительной полуволне входного напряжения и вверх – при отрицательной полуволне. Очевидно, для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка при перемещении вверх по линии нагрузки не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз – в область начальных токов коллектора  $I_{к0(\ominus)}$ . Работа каскада без искажений выходного сигнала достигается за счет обеспечения соответствующей величины входного сигнала и правильного выбора режима (точки) покоя.

Параметрами усилителя являются:

$$1) \text{ Коэффициент усиления по току } K_I = I_{ввых} / I_{вх} \approx I_{ввых} / I_б,$$

где  $I_{ввых}$  – ток нагрузки,  $I_{вх}$  – ток на входе каскада,

$I_б$  – ток базы. В реальных усилителях  $K_I$  может достигать нескольких десятков.

$$2) \text{ Коэффициент усиления по напряжению}$$

$$K_v = \frac{U_{ввых}}{U_{вх}}, K_{vxx} = \frac{U_k}{U_{вх}}; \quad K_{vxx} > K_v,$$

где  $U_{ввых}$  – напряжение на нагрузке,  $U_{вх}$  – выходное напряжение.  $K_v$  может достигать нескольких десятков единиц.

3) Коэффициент усиления по мощности, равный отношению мощности на нагрузке к мощности на входе каскада:

$$K_p = \frac{U_{ввых} I_{ввых}}{U_{вх} I_{вх}} = K_v K_I$$

может достигать нескольких тысяч единиц.

Основными характеристиками усилителей напряжения и тока являются:

– амплитудная характеристика  $U_{ввых} = f(U_{вх})$ ;

– частотная характеристика  $K = \varphi(f)$  (зависимость модуля коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала).

Амплитудная характеристика (рис. 4, а) позволяет определить диапазон входного напряжения, в пределах которого зависимость выходного напряжения от входного линейна.

При большой амплитуде входного напряжения появляются нелинейные искажения выходного напряжения, что связано с нелинейностью входной и выходной характеристик транзистора.

Частотная характеристика (рис. 4, б) позволяет определить полосу пропускания усилителя. Эта характеристика важна при усилении несинусоидальных сигналов. Гармонические составляющие  $U_{вх}$  усиливаются в различной степени из-за неравномерности частотной характеристики. Форма усиленного сигнала искажается.



Полосой пропускания усилителя переменного напряжения называется диапазон частот  $f_H - f_B$ , в котором коэффициент усиления  $K_v \gg K_0/\sqrt{2}$ , где  $K_0$  – максимальный коэффициент усиления.

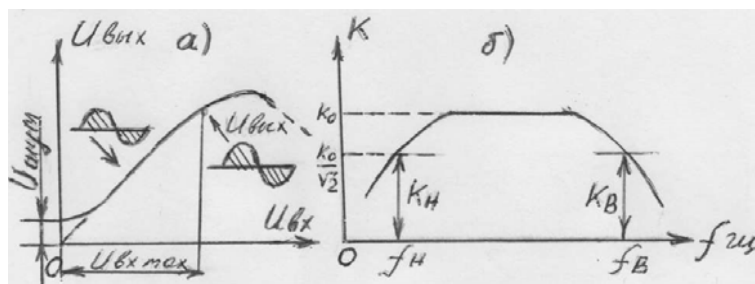


Рис. 4. Амплитудная (а) и частотная (б) характеристики усилителя

Рассмотрим работу усилителя в диапазонах средних, низших  $f_H$  и высших частот  $f_B$ .

На низших частотах заметно влияние конденсаторов  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$ . Напряжение с коллектора транзистора Т1 делится пропорционально сопротивлениям плеч делителя напряжения  $X_{Cp2}$  и  $R_H$  и передается в нагрузку. С понижением частоты сопротивление  $X_{Cp2}$  возрастает и падение напряжения на конденсаторе увеличивается, а доля напряжения на  $R_H$  уменьшается при  $U_{вх} = \text{const}$ .

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению  $K_v$  уменьшается. Аналогичные явления связаны с наличием конденсатора  $C_{p1}$ .

В диапазоне средних частот сопротивление разделительных конденсаторов столь мало, что им можно пренебречь. Коэффициент усиления наибольший и равен  $K_0$ .

Снижение коэффициента усиления в области высших частот обусловлено зависимостью коэффициента усиления по току  $\beta$  от частоты. Для уменьшения искажений частотной характеристики в области высших частот выбирают транзисторы с граничной частотой усиления  $f_\beta$ , значительно большей верхней частоты усиления  $f_B$ .

## ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

1. Повторить раздел электроники, в котором изложены устройство, принцип действия транзистора, статические режимы схем с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором, одиночные усилительные каскады. Список литературы приведен в конце описания.
2. Ответить на контрольные вопросы.

3. Подготовить примерные графики ожидаемых характеристик и таблицы.

## С. Усилитель по схеме с ОЭ

Подготовить к работе осциллограф, генератор звуковых частот и ламповый вольтметр; подключить питание, прогреть в течение 5 мин, установить вольтметр на нуль, а переключатели на приборах в необходимое положение, соответствующее роду работы.

6. Подключить к исследуемому каскаду (рис. 5) генератор, вольтметр и осциллограф.

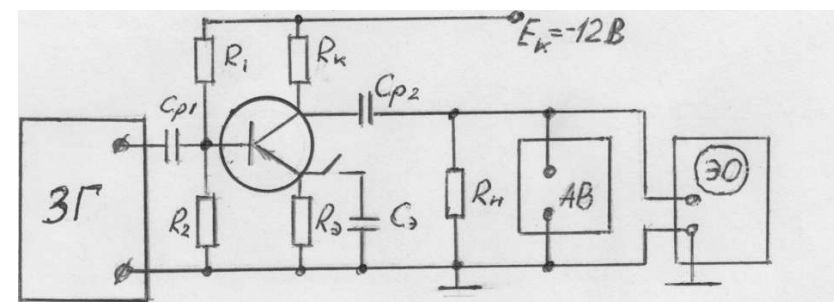


Рис. 5. Схема однокаскадного усилителя

Одна из выходных клемм приборов обычно соединена с его корпусом («земля»). Для повышения помехоустойчивости усилителя проследить, чтобы «земля» генератора, вольтметра и осциллографа была подключена к общей точке входа и выхода усилителя.

7. Определить коэффициент усиления по напряжению каскада с общим эмиттером на частотах 100 и 1000 Гц, для чего, установив частоту выходного напряжения генератора, равную 100 Гц, подключить его выход к входу каскада с ОЭ. Изменяя напряжение генератора, получить амплитуду выходного напряжения каскада, равную 1 В, измеряя ее осциллографом. Определив амплитуду выходного напряжения (также с помощью осциллографа), вычислить коэффициент усиления каскада с общим эмиттером по напряжению на частоте 100 Гц. Определить указанным методом коэффициент усиления каскада на частоте 1000 Гц.

8. Снять амплитудные характеристики  $U_{в\text{ых}} = f(U_{в\text{х}})$  для двух случаев:
  - а) без обратных связей (без ОС);
  - б) с отрицательной обратной связью по переменному току (с ОС).

8. Определить, при каком напряжении  $U_{вх}$  в каскаде без ОС наступает заметное искажение формы  $U_{вых}(t)$ , зарисовать форму  $U_{вых}(t)$  в этом случае.

Результата измерений свести в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{вх}, мВ$							
$U_{вых}$ без ОС							
$U_{вых}$ с ОС							

Измерения провести при частоте входного сигнала  $f = 1000$  Гц,  $C_{p2} = 10$  мкФ. Напряжение  $U_{вх}$  изменять от 0 до 0,3 В (6–7 значений).

9. В единой системе координат построить характеристики  $U_{вых} = f(U_{вх})$  без ОС и с ОС.

10. Снять частотную характеристику  $K_v = F(f)$  при  $C_{p2} = 10$  мкФ,  $U_{вх} = 0,1$  В,  $R_H = 2$  кОм.

Результаты измерений свести в таблицу 2.

Таблица 2

$f, Гц$	100	200	300	600	1000	10000	15000	20000
$U_{вых}, В$								
$K_v$								

11. По результатам таблицы 2 построить характеристику  $K_v = F(f)$

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Точное наименование и цель работы.
2. Таблицу основных данных исследуемого транзистора.
3. Схему для снятия характеристик транзистора с краткой характеристикой входящих в нее элементов.
4. Таблицы наблюдений.
5. Графики входных статических характеристик  $I_б = f(U_{бз})$  при  $U_{кз} = \text{const}$ .
6. Графики выходных статических характеристик  $I_к = f(U_{кз})$  при  $I_б = \text{const}$ .
7. Расчет коэффициента усиления по току  $K_1$  и входного сопротивления транзистора.
8. Схему исследования каскада с ОЭ.

9. Таблицы с измеренными и рассчитанными параметрами каскада с ОЭ.

10. Краткие выводы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите об устройстве плоских транзисторов.
2. Какую зависимость транзистора определяет его выходная характеристика?
3. Какую зависимость транзистора определяет его выходная характеристика?
4. Какой каскад называется усилительным?
5. Для чего служат разделительные емкости в каскаде с ОЭ?

### Лабораторная работа № 9

#### РАБОТА СО СПРАВОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРОЙ ПО МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

#### Цель работы:

Ознакомиться с системой обозначения, цоколевкой и основными параметрами интегральных схем.

#### ЗАДАНИЕ

1. Определить по справочнику цоколевку рассматриваемых интегральных микросхем.
2. Начертить схему выводов элементов (цоколевку) для каждой из рассматриваемых микросхем.
3. Начертить электрическую схему каждой из рассматриваемых интегральных микросхем.
4. Составить отчет о проделанной работе.

#### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Интегральная микросхема (ИМС) – устройство с высокой плотностью упаковки электрически связанных элементов (или элементов и компонентов), выполняющее определенную функцию обработки и преобразования электрических сигналов и рассматриваемое с точки зрения конструктивно-технологических и эксплуатационных требований как единое целое. Элемент, представляет собой часть ИМС (например, транзистор, диод, резистор и др.), выполненную неразрывно с кристаллом или подложкой, которую с

точки зрения эксплуатационных требований, а также требований к испытаниям, упаковке и поставке нельзя рассматривать как самостоятельное изделие. В отличие от элемента компонент, являющийся частью ИМС, можно выделить как самостоятельное комплектующее изделие (например, бескорпусный транзистор в гибридной интегральной схеме).

В зависимости от технологии изготовления интегральные микросхемы подразделяют на полупроводниковые ИМС, пленочные ИМС и микросборки. Пленочные ИМС, подразделяются в свою очередь на тонкопленочные и толстопленочные, обычно имеют в своем составе как элементы, так и компоненты и называются в этом случае гибридными ИМС.

Полупроводниковой интегральной схемой называют ИМС, в которой все активные и пассивные элементы и их соединения выполнены в виде сочетания неразъемно связанных р-п-переходов в одном исходном полупроводниковом кристалле. Полупроводниковый кристалл, в объеме или на поверхности которого с помощью планарной технологии формируются элементы микросхемы и контактные площадки, выполняет таким образом активную роль.

Гибридной интегральной микросхемой называют ИМС, содержащую диэлектрическое основание (подложку), все пассивные элементы на поверхности которой выполняются в виде однослойных или многослойных пленочных структур, соединенных неразрывными пленочными проводниками, а полупроводниковые приборы, в том числе ИМС и другие компоненты (миниатюрные керамические конденсаторы, индуктивности и др.), размещены на подложке в виде дискретных навесных деталей. Транзисторы и другие полупроводниковые приборы в пленочном исполнении не нашли применения, так как получение в производственных условиях монокристаллических тонких пленок полупроводника с удовлетворительной структурой является очень сложной задачей.

На практике широко применяют ИМС, изготовленные с использованием как полупроводниковой, так и пленочной технологии. Поскольку каждый из этих технологических принципов имеет свои преимущества, то оба указанных типа ИМС взаимно дополняют друг друга, не конкурируя между собой. Например, бескорпусные полупроводниковые ИМС во многих случаях являются компонентами гибридных ИМС, что особенно характерно для микросборок.

Микросборка в отличие от полупроводниковых и гибридных ИМС выполняет заданную более сложную функцию и состоит из необходимого для этого сочетания элементов, компонентов и ИМС.

По характеру выполняемых функций различают аналоговые и цифровые ИМС.

Аналоговая интегральная схема выполняет функции преобразования и обработки электрических сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Такие ИМС применяются в качестве усилителей, генераторов гармонических сигналов, фильтров, детекторов и др.

Цифровая интегральная схема предназначена для преобразования и обработки электрических сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции (двоичный или другой цифровой код). Цифровые ИМС называют еще логическими ИМС.

Аналоговые и цифровые ИМС разрабатываются и изготавливаются, как правило, сериями. Серия интегральных схем – это совокупность ИМС, выполняющих различные функции, но имеющих единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначенных для совместного применения в радиоэлектронной аппаратуре.

Система буквенно-цифровых обозначений типов микросхем состоит из четырех основных элементов: первый элемент – цифра соответствует конструктивно-технологической группе микросхем: 1, 5, 7 – полупроводниковые; 2, 4, 6, 8 – гибридные; 3 – прочие;

второй элемент – две цифры от 00 до 99, указывающие на порядковый номер разработки серии микросхем. Первый и второй элементы образуют число, обозначающее серию микросхем. Микросхемы широкого применения имеют в начале обозначения букву К, которая входит в обозначение серии; третий элемент – две буквы – обозначает функциональное назначение микросхемы; четвертый элемент – порядковый номер разработки микросхемы в данной серии. Например, К153УД5 – операционный усилитель в виде полупроводниковой ИМС, серия 153, порядковый номер разработки в данной серии – пятый.

Для защиты элементов и компонентов ИМС от воздействия внешних факторов – пыли, влаги, механических воздействий и др. – осуществляется герметизация кристалла или подложки, что существенно повышает их эксплуатацию и надежность. Герметизацию ИМС осуществляют либо с помощью изоляционных материалов, либо с использованием принципов вакуум-плотной герметизации.

При герметизации ИМС изоляционными материалами кристалл полупроводника или подложку гибридной ИМС покрывают слоем органического диэлектрика: лака или компаунда. Однако изоляционные материалы не обеспечивают должной защиты ИМС от повышенной влажности.

Надежным способом защиты кристалла (подложки) ИМС от влияния внешней среды является вакуум-плотная герметизация, достигаемая при помещении кристалла в герметичный корпус. Промышленность выпускает корпуса прямоугольной и круглой формы. На рис. 1, а показана общая конструкция ИМС с корпусом прямоугольной формы, а на рис. 1, б – с корпусом круглой формы.

По применяемому материалу различают четыре типа корпусов: металлостеклянные, металлокерамические, керамические и пластмассовые. При этом главными элементами конструкции корпуса являются металлическая или керамическая крышка и армированное выводами основание (рис. 1),

на котором с помощью вспомогательных конструктивных элементов крепится кристалл (подложка) микросхемы. В совокупности все это представляет собой законченный конструктивный узел – ИМС.

Нумерация выводов микросхемы, имеющей корпус круглой формы, производится от ключа по часовой стрелке, если смотреть на микросхему со стороны выводов (рис. 1, б). Если микросхема имеет прямоугольный корпус, то отсчет выводов ведется от ключа, если смотреть на схему со стороны крышки (рис. 1, а).

В некоторых ИМС отсчет выводов ведется по часовой стрелке от вывода, отмеченного цветной меткой.

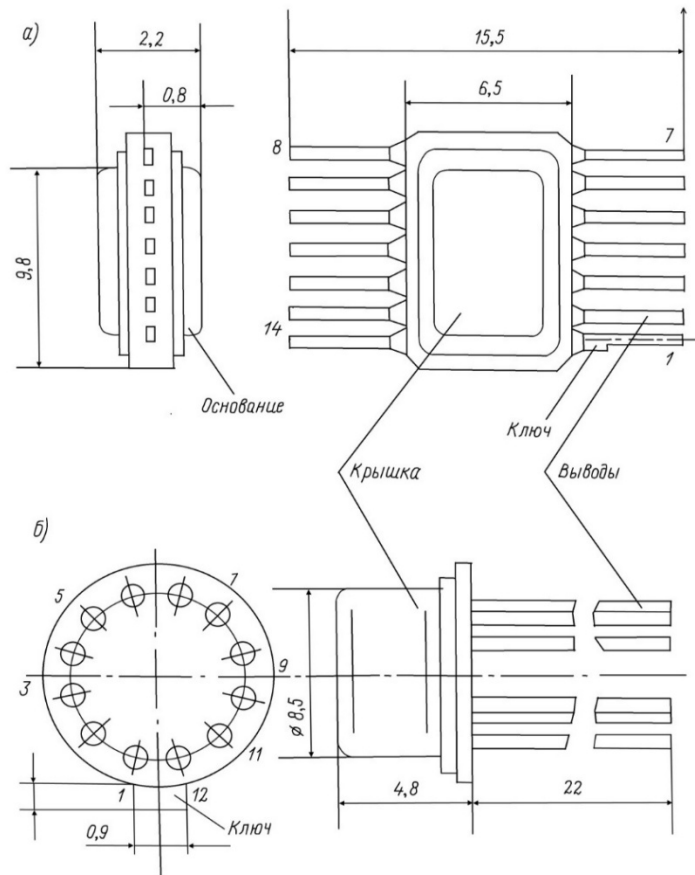


Рис. 1. Конструкция и цоколевка ИМС

и пластмассовые. При этом главными элементами конструкции корпуса являются металлическая или керамическая крышка и армированное выводами основание (рис. 1), на котором с помощью вспомогательных конструктивных элементов крепится кристалл (подложка) микросхемы. В совокупности все это представляет собой законченный конструктивный узел – ИМС.

Нумерация выводов микросхемы, имеющей корпус круглой формы, производится от ключа по часовой стрелке, если смотреть на микросхему со стороны выводов (рис. 1, б). Если микросхема имеет прямоугольный корпус, то отсчет выводов ведется от ключа, если смотреть на схему со стороны крышки (рис. 1, а).

В некоторых ИМС отсчет выводов ведется по часовой стрелке от вывода, отмеченного цветной меткой.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с выделенными руководителем занятия интегральными схемами разных типов, расшифровать маркировку каждой из них и занести эти данные в отчет.

2. Найти в справочнике цоколевку каждой из предложенных ИМС и определить нумерацию выводов. Начертить цоколевку для каждой из рассматриваемых ИМС (вид корпуса и расположение выводов).

3. Начертить электрические схемы рассматриваемых ИМС.

4. Используя данные, приведенные в справочнике, занести в отчет основные параметры рассматриваемых ИМС.

5. Сделать выводы о проделанной работе.

#### ОТЧЕТНЫЙ МАТЕРИАЛ

1. Данные расшифровки маркировки каждой из рассмотренных ИМС.

2. Цоколевка и электрическая схема каждой из рассмотренных ИМС.

3. Основные параметры ИМС, полученные из справочника.

4. Выводы о проделанной работе.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое микроэлектроника?

2. Какие направления в развитии интегральных микросхем существуют в настоящее время?

3. Как маркируются интегральные микросхемы?

4. Где применяются интегральные микросхемы?

5. Каковы перспективы дальнейшего развития микроэлектроники?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника. М.: Высшая школа, 2006.
2. Гуревич В. М., Иваненко Н. С. Справочник по электронике. М.: Высшая школа, 1987.
3. Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника. М.: Энергоиздат, 1988.
4. Галкин В. И. Промышленная электроника. Минск: Высшая школа, 1989.
5. Лачин В. И., Савелов Н. С. Электроника: Ростов н/Д: Феникс, 2004. 576 с.
6. ГОСТ 20004-74. Диоды полупроводниковые. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения. М., 1974.
7. ГОСТ 20332-74. Тиристоры. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения. М., 1974.
8. ГОСТ 15133-77. Приборы полупроводниковые. Термины и определения. М., 1977.
9. ГОСТ 19095-73. Транзисторы полевые. Электрические параметры. Термины, определения и буквенные обозначения. М., 1973.

Составители:

*И. А. Аккозиев, А. П. Балянов,  
Д. В. Виноградов, О. П. Новиков*

## ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие  
к выполнению лабораторных работ для бакалавров  
по техническим направлениям

Редактор *А.И. Шевченко*  
Компьютерная верстка *Ю.Ю. Юдаковой*

Подписано в печать 1.07.15  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Офсетная печать. Объем 4,75 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ 266

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2