

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра теоретической и общей электротехники

А.Т. Раимова, Н. И. Доброжанова

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Методические указания к лабораторным работам по курсам  
«Электротехника и электроника» и «Общая электротехника и электроника»

Рекомендовано Редакционно-издательским советом Государственного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург  
ИПК ГОУ ОГУ  
2011

УДК 621.382.(076.5)  
ББК 32.852я7  
Р18

Рецензент – кандидат технических наук, доцент А.В. Хлуденев

**Раимова, А.Т.**

**Р18** Исследование характеристик полупроводниковых приборов: методические указания к лабораторным работам / А. Т. Раимова, Н. И. Доброжанова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2011. – 47 с.

В методических указаниях изложен материал, помогающий студентам при выполнении лабораторных работ исследовать характеристики полупроводниковых приборов, усвоить основные принципы измерений, анализировать результаты измерения, творчески применять знания по курсам в процессе обучения, на лабораторных занятиях, в дипломных и исследовательских работах.

Методические указания являются основным учебным руководством при выполнении лабораторных работ по курсам «Общая электротехника и электроника» и «Электротехника и электроника» студентами инженерно-технических неэлектротехнических специальностей.

УДК 621.382.(076.5)  
ББК 32.852я7

© Раимова А.Т., Доброжанова Н. И., 2011  
© ГОУ ОГУ, 2011

## Содержание

1	Назначение лабораторной установки и порядок ее работы .....	4
2	Исследование характеристик полупроводникового диода .....	9
2.1	Теоретическое введение .....	9
2.2	Задание на выполнение лабораторной работы .....	10
2.2.1	Экспериментальная часть работы .....	10
2.2.2	Расчетная часть работы .....	10
2.2.3	Исследовательская часть работы .....	11
2.3	Контрольные вопросы .....	15
3	Исследование характеристик биполярного транзистора .....	16
3.1	Теоретическое введение .....	16
3.2	Задание на выполнение лабораторной работы .....	18
3.2.1	Экспериментальная часть работы .....	18
3.2.2	Расчетная часть работы .....	18
3.2.3	Исследовательская часть работы .....	18
3.3	Контрольные вопросы .....	27
4	Исследование характеристик полевого транзистора .....	28
4.1	Теоретическое введение .....	28
4.2	Задание на выполнение лабораторной работы .....	29
4.2.1	Экспериментальная часть работы .....	29
4.2.2	Расчетная часть работы .....	29
4.2.3	Исследовательская часть работы .....	30
4.3	Контрольные вопросы .....	37
5	Исследование характеристик тиристора .....	38
5.1	Теоретическое введение .....	38
5.2	Задание на выполнение лабораторной работы .....	38
5.2.1	Экспериментальная часть работы .....	38
5.2.2	Расчетная часть работы .....	39
5.2.3	Исследовательская часть работы .....	39
5.3	Контрольные вопросы .....	44
6	Содержание отчета .....	45
7	Тесты контроля качества усвоения дисциплины .....	45
	Список использованных источников .....	47

# 1 Назначение лабораторной установки и порядок ее работы

Для выполнения лабораторных работ по исследованию характеристик полупроводниковых приборов по курсам «Общая электротехника и электроника» и «Электротехника и электроника» используется виртуальный универсальный лабораторный стенд *electronics workbench*, реализованный в виде программы, представленной на рабочем столе ярлыком, показанном на рисунке 1.1:



Рисунок 1.1

Панель инструментов стенда представлена на рисунке 1.2.

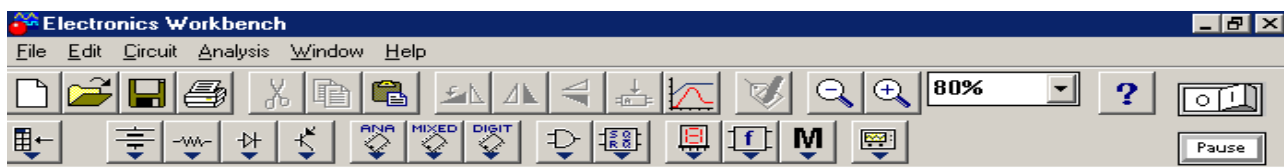
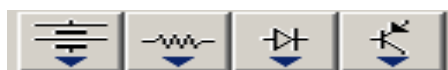


Рисунок 1.2 – Панель инструментов стенда

Схемы исследуемых устройств «собираются» с помощью панели инструментов для построения схемы и панели инструментов для измерений, представленных на рисунках 1.3 а, б соответственно:



а) для построения схемы



б) для измерений

Рисунок 1.3 – Панели инструментов

Для выполнения лабораторных работ понадобятся *источник напряжений, амперметр, вольтметр и исследуемые полупроводниковые приборы.*





Рисунок 1.6 – Переменный резистор

Настройка переменных резисторов осуществляется следующим образом:

- с помощью правой кнопки «мыши» вызывается подменю «Component Properties/Value»;
- в пункте «Resistance (R)» устанавливается величина максимального сопротивления между выводами «a» и «c»;
- в пункте «Setting» с помощью стрелочек устанавливается величина относительного сопротивления резистора;
- в пункте «Increment» устанавливается шаг изменения;
- величину относительного сопротивления можно установить и с клавиатуры с помощью «горячей» клавиши, определённой в пункте «Key». При одном нажатии такой клавиши «key» относительное сопротивление уменьшается на величину шага, установленную в «Increment», а при нажатии комбинации «Shift» + «key» - уменьшается. Панель настройки переменного резистора приведена на рисунке 1.7.

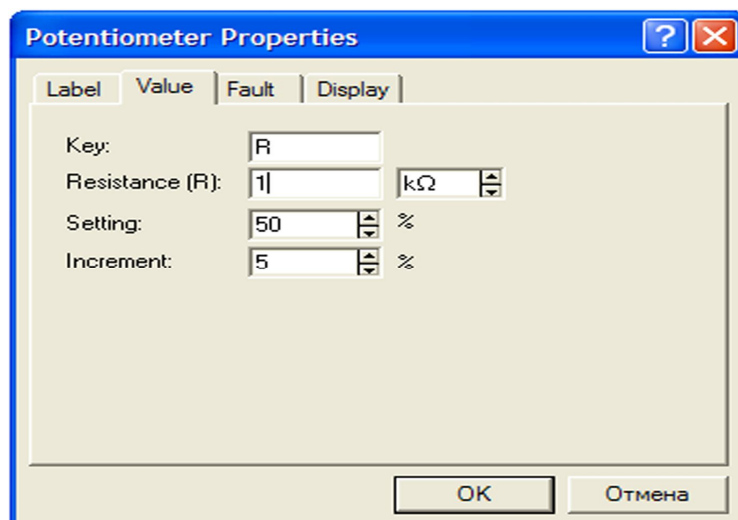













Рисунок 1.7 – Панель настройки переменного резистора

Биполярный  и униполярные транзисторы      ,     вызываются из панели «Transistors», приведенного на рисунке 1.8, появляющейся при нажатии четвертой кнопки панели инструментов для построения схемы, приведенной на рисунке 1.3, а.

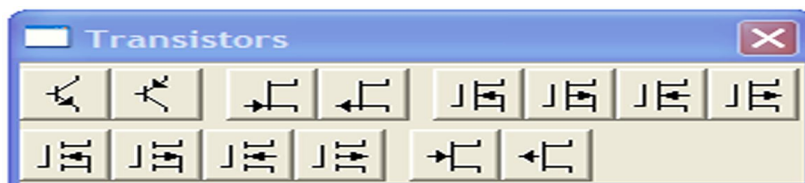


Рисунок 1.8 – Панель «Transistors»



Источник напряжения  вызывается из панели источников «Sources», представленного на рисунке 1.9, появляющейся в виде всплывающего меню нажатием первой кнопки  панели инструментов для построения схемы.



Рисунок 1.9 – Панель источников «Sources»

Величина ЭДС, а также параметры пассивных элементов схем устанавливается следующим образом:

- а) курсор «мыши» наводится на соответствующий элемент схемы;
- б) «кликаньем» правой кнопки вызывается всплывающее меню, из которого вызывается пункт «*component properties*»;
- в) далее выбирается пункт «*value*», в котором устанавливается требуемая величина и единица измерения настраиваемого параметра.

Амперметр и вольтметр выбираются из панели индикаторов, представленной на рисунке 1.10, вызываемой нажатием первой кнопки панели для измерений.



Рисунок 1.10 – Панель индикаторов

В измерительных схемах лабораторной установки применяется источник напряжения управляемый напряжением (ИНУН), приведенный на рисунке 1.11 – как элемент гальванической развязки между схемами регулирования тиристора и самим тиристором. ИНУН вызывается из панели источников «Sources», приведенного на рисунке 1.9. Основной параметр компонента - коэффициент передачи «Voltage gain» устанавливается в меню «Component Properties/Value».

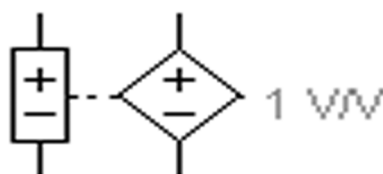



Рисунок 1.11 – ИНУН

Функционирование схемы запускается с помощью переключателя , расположенного в правой части панели инструментов. Кнопкой «*pause*» можно останавливать функционирование; повторным нажатием – снова разрешать функционирование схемы.



## 2 Исследование характеристик полупроводникового диода

- Цель работы:*
1. Изучить свойства электронно-дырочного перехода, определяющие характеристики выпрямительного диода и стабилитрона.
  2. Приобрести навыки работы с измерительными приборами, а также по обработке и оформлению полученных результатов.

### 2.1 Теоретическое введение

Электронно-дырочный переход (*p-n* переход) – это контакт двух проводников с различным типом проводимости. Изготавливается он обычно из одного кристалла полупроводника, в котором формируются области с повышенной концентрацией акцепторной примеси (*p*-область) и донорной примеси (*n*-область).

В зависимости от технологии изготовления существуют различные типы *p-n* переходов, например, резкий или плавный *p-n* переходы. В резком переходе область изменения концентрации примеси значительно меньше толщины области пространственного заряда, который образуется за счет диффузии электронов и дырок, а в плавном переходе – наоборот.

Если переход находится в равновесии (внешнее электрическое поле отсутствует), то его состояние определяется двумя конкурирующими процессами:

- 1) диффузией основных носителей – дырок из *p*-области в *n*-область и диффузией электронов в обратном направлении;
- 2) дрейфом неосновных носителей под действием поля перехода.

В условиях равновесия полный ток через переход (дрейфовый плюс диффузионный) носителей каждого знака равен нулю .

Если приложить к переходу разность потенциалов  $U$ , то величину полного тока через переход можно попытаться определять по следующей приближённой формуле:

$$I \approx I_0 \left( e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (2.1)$$

где:  $I_0$  – ток насыщения; [ А ]

$q$  – заряд электрона; [ К ]

$k$  – постоянная Больцмана; [ Дж/К ]

$T$  – абсолютная температура;

$U$  – приложенное к переходу внешнее напряжение, причем «+» (плюс) – соответствует прямому напряжению, «-» (минус) – соответствует обратному напряжению; [ В ].

## 2.2 Задание на выполнение лабораторной работы

### 2.2.1 Экспериментальная часть работы

В зависимости от требований преподавателя, выполнить одну или обе исследовательские задачи, перечисленные ниже:

1. С помощью измерительных схем, представленных на рисунках 2.1 и 2.2, исследовать прямую и обратную ветви ВАХ выпрямительного диода, указанной преподавателем марки. Построить их графики.

2. С помощью измерительных схем, приведенных на рисунках 2.3 и 2.4, исследовать прямую и обратную ветви ВАХ стабилитрона, указанной преподавателем марки. Построить их графики.

### 2.2.2 Расчётная часть работы

По полученным результатам выполнить одну или обе расчётные задачи (в зависимости от требований преподавателя):

1. Определить коэффициенты выпрямления  $K_B$  исследуемых диодов, для чего значения прямого тока и обратного при напряжении 0.1 В подставить в формулу:

$$K_B = I_{ПР} / I_{ОБР}. \quad (2.2)$$

2. Рассчитать для средней точки рабочего участка характеристики стабилитрона статическое сопротивление  $r_{cm}$ . Вычислить на этом участке динамическое сопротивление по формуле:

$$r_{\partial} = \Delta U / \Delta I. \quad (2.3)$$

### 2.2.3 Исследовательская часть работы

#### *Исследование прямой ветви ВАХ выпрямительного диода*

1. Собрать схему, представленную на рисунке 2.1., показать для проверки преподавателю. (Значения номиналов элементов схем и марок диодов могут не совпадать с данными, приведенными на рисунках 2.1-2.4, т.к. на рисунках приведены примеры схем.)

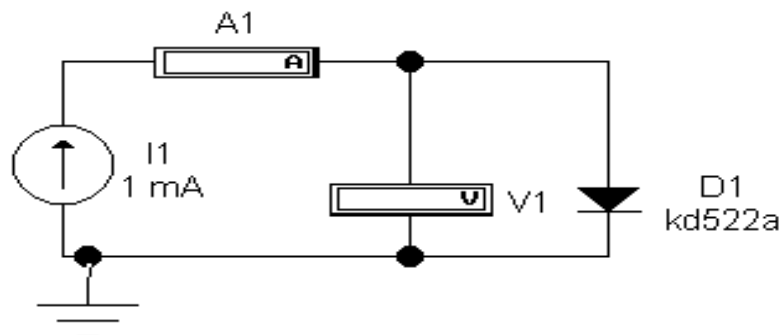


Рисунок 2.1 - Схема для измерения прямой ветки ВАХ диода

2. Записать в отчёт значения следующих параметров диода (марку диода спросить у преподавателя):

- предельно-допустимый постоянный прямой ток  $I_{np\max}$ ;
- предельно-допустимое обратное напряжение  $U_{обр\max}$ .

Указанные значения взять из справочников, либо спросить у преподавателя.

3. Задать 6 значений прямого тока источника  $I_1$ , которые вычисляются по выражениям во 2-м столбце таблицы 2.1. Полученные значения являются рекомендуемыми, их допускается округлять до ближайшего «удобного» числа. Для каждого установленного тока  $I_1$  измерить по показаниям вольтметра  $V_1$  прямое напряжение, результаты измерений записать в 3-й столбец таблицы 2.1. При оформлении отчёта в первый столбец вместо выражений вписать вычисленные

значения. Единиц измерения напряжений и токов, указанных в первой строке таблицы 1 строго придерживаться не нужно. При оформлении таблицы в отчёте рекомендуется фиксировать значения токов и напряжений в тех единицах, которые являются наиболее оптимальными.

Таблица 2.1 - Прямая ветвь ВАХ диода типа ...

Номер опыта	$I_{np}$ , mA	$U_{np}$ , В
1	$0.05 \cdot I_{np \max}$	
2	$0.1 \cdot I_{np \max}$	
3	$0.3 \cdot I_{np \max}$	
4	$0.5 \cdot I_{np \max}$	
5	$0.7 \cdot I_{np \max}$	
6	$0.95 \cdot I_{np \max}$	

*Исследование обратной ветви ВАХ выпрямительного диода*

1. Изменить включение диода, собрав схему, представленную на рисунке 2.2.

Показать для проверки преподавателю.

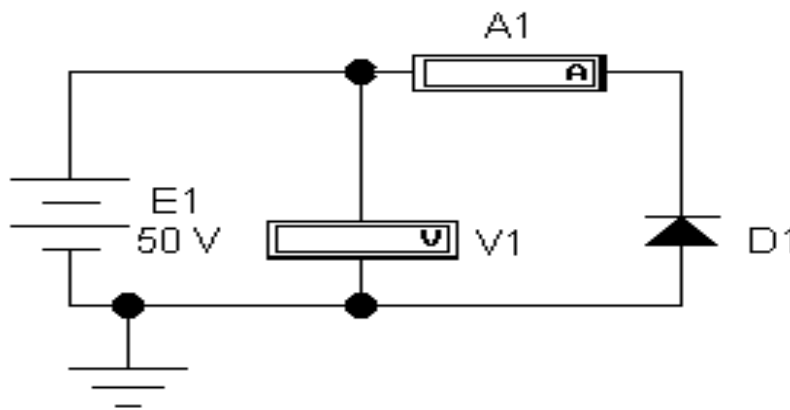


Рисунок 2.2 - Схема для измерения обратной ветви ВАХ диодов

2. Задать 7 значений обратного напряжения с помощью источника  $E_1$ , которые вычисляются по выражениям во 2-м столбце таблицы 2.2. Как и при измерении прямой ветви ВАХ, полученные значения являются рекомендуемыми. Для каждого значения  $U_{обр}$  измерить обратный ток по амперметру  $A_1$ , измеренные величины зафиксировать в 3-м столбе таблицы 2.2.

3. По значениям таблиц 2.1 и 2.2 построить графики прямой и обратной ветвей ВАХ исследуемого диода.

Таблица 2.2 - Обратная ветвь ВАХ диода типа ...

Номер опыта	$U_{обр}, В$	$I_{обр}, мкА$
1	$0.005 \cdot U_{обр \max}$	
2	$0.01 \cdot U_{обр \max}$	
3	$0.05 \cdot U_{обр \max}$	
4	$0.07 \cdot U_{обр \max}$	
5	$0.1 \cdot U_{обр \max}$	
6	$0.5 \cdot U_{обр \max}$	
7	$0.95 \cdot U_{обр \max}$	

### Исследование обратной ветви ВАХ стабилитрона

1. Собрать схему рисунка 2.3, установив тип стабилитрона (задаётся преподавателем). Показать собранную схему для проверки преподавателю.

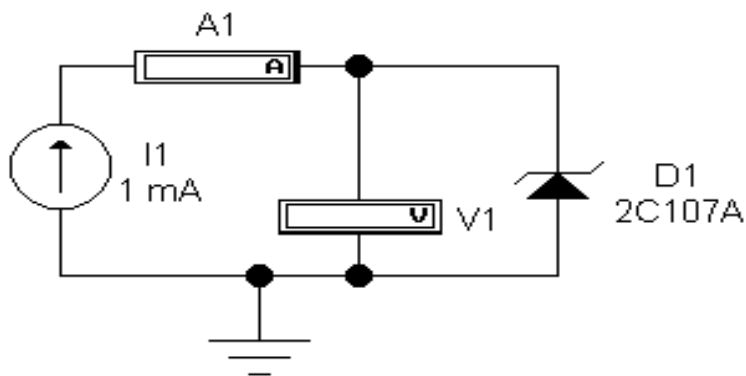


Рисунок 2.3 - Схема для измерения обратной ветви ВАХ стабилитронов

2. Записать в отчёт значения следующих параметров стабилитрона:

- минимальный ток стабилизации  $I_{ст \min}$  ;
- максимальный ток стабилизации  $I_{ст \max}$  ;
- номинальное напряжение стабилизации  $U_{ст}$  .

3. Измерить по вольтметру  $V_1$  напряжение стабилитрона при 5 рекомендуемых значениях обратного тока  $I_{обр}$ , которые вычисляются по

выражениям во 2-м столбце. Вычисленные значения тока  $I_{обр}$  устанавливаются с помощью источника  $I_1$ . Полученные значения занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Обратная ВАХ стабилизатора типа ...

Номер опыта	$I_{обр}$ , mA	$U_{обр}$ , В
1	$0.5 \cdot I_{ст\ min}$	
2	$I_{ст\ min}$	
3	$0.2 \cdot I_{ст\ max}$	
4	$0.5 \cdot I_{ст\ max}$	
5	$0.95 \cdot I_{ст\ max}$	

### Исследование прямой ветви ВАХ стабилизатора

1. Изменить включение стабилизатора - перейти к схеме, представленной на рисунке 2.4. Показать для проверки преподавателю.

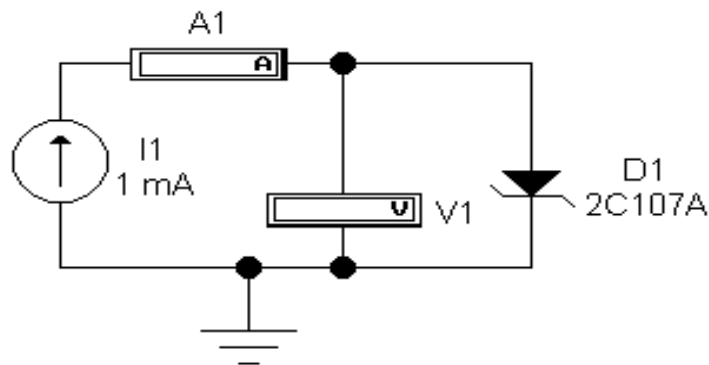


Рисунок 2.4 - Схема для измерения прямой ветви ВАХ стабилизатора

2. Измерить прямое напряжение при пяти рекомендуемых значениях тока  $I_{пр}$ , указанных во 2-м столбце таблицы 2.4. Измеренные и установленные значения занести в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Прямая ВАХ стабилизатора типа ...

Номер опыта	$I_{пр}$ , mA	$U_{пр}$ , В
1	1 mA	
2	4 mA	
3	10 mA	
4	15 mA	

3. По значениям таблиц 2.3 и 2.4 построить графики прямой и обратной ветви ВАХ стабилитрона.

### 2.3 Контрольные вопросы

1. Почему  $p-n$  переход часто называют запирающим слоем?
2. Какое напряжение называется прямым?
3. Какое из приведенных утверждений правильное:
  - а) электронно-дырочный переход – это слой, обеднённый носителями заряда;
  - б) Электронно-дырочный переход – это слой, обогащённый носителями заряда;
4. Нарисуйте и объясните энергетическую диаграмму  $p-n$  перехода.
5. Дайте характеристику обратимому и необратимому пробоем  $p-n$  перехода.
6. Перечислить основные параметры выпрямительного диода и стабилитрона.
7. Нарисуйте схему включения опорного диода.
8. Какое напряжение называется выпрямленным?
9. Какой диод называется «идеальным»?
10. Какой ток называется максимальным током стабилизации?
11. Как определяется динамическое сопротивление выпрямительного диода?
12. Каково назначение импульсного диода?

### 3 Исследование характеристик биполярного транзистора

- Цель работы:*
1. Изучить статические ВАХ и другие определяющие характеристики биполярных транзисторов (БТ).
  2. Определить дифференциальные  $h$ -параметры БТ.

#### 3.1 Теоретическое введение

Биполярный транзистор (БП) - это полупроводниковый прибор, содержащий два взаимодействующих  $p-n$  перехода и применяемый в схемах генерации, усиления и преобразования электрических сигналов. Термин «биполярный» означает, что физические процессы в приборе протекают под управлением разности потенциалов между входными электродами.

Конструктивно транзистор представляет собой монокристалл полупроводника, в котором сформированы чередующиеся области с разным типом проводимости. Соответственно различают транзисторы  $p-n-p$  типа и  $n-p-n$  типа. Средняя область, которая делается достаточно тонкой (что принципиально важно для работы транзистора), называется базой. Две другие - эмиттер и коллектор. База отделена от эмиттера и коллектора эмиттерным и коллекторным  $p-n$  переходами. Назначение эмиттера – инжектирование носителя заряда в базу, задача коллектора - экстракция носителей из базы.

В соответствии с наличием трех выводов возможны три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ) (рисунок 3.1, а), с общим эмиттером (ОЭ) (рисунок 3.1, б), с общим коллектором (ОК) (рисунок 3.1, в).

Существует четыре режима работы биполярных транзисторов: нормальный активный, двойной инжекции (насыщения), отсечки и инверсный активному. В нормальном активном режиме эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. В режиме двойной инжекции оба перехода включены в прямом направлении. В режиме отсечки оба перехода включены в обратном



направлении. В режиме инверсном активному коллекторный переход включен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном.

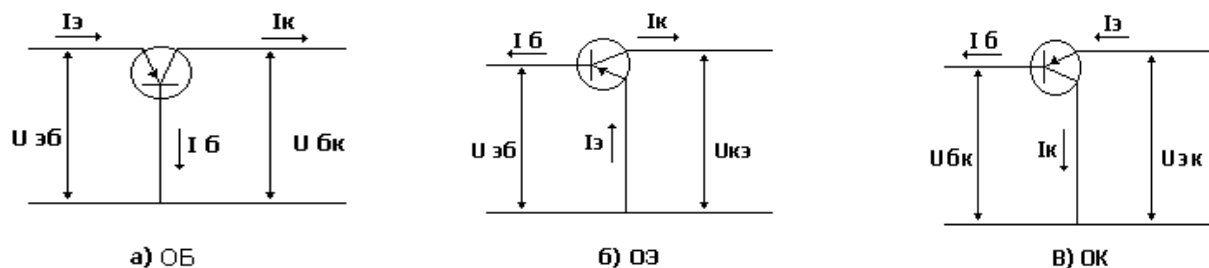


Рисунок 3.1 – Схемы включения биполярного транзистора

Поведение транзистора, как и любого другого прибора, в электрической цепи определяется его статическими характеристиками. Статические характеристики – это уравнения либо графические зависимости, связывающие входные и выходные токи и напряжения в установившемся режиме. Часто для БП-транзисторов для описания статических характеристик применяются системы уравнений в  $h$ -параметрах:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

$h$ -параметры имеют простой физический смысл:

- $h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{U_2=0}$  – входное сопротивление при коротком замыкании выходной цепи;
- $h_{12} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_1=0}$  – коэффициент обратной связи по напряжению в режиме холостого хода во входной цепи;
- $h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{U_2=0}$  – коэффициент передачи тока при коротком замыкании выходной цепи;
- $h_{22} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{I_1=0}$  – выходная проводимость в режиме холостого хода во входной цепи.

Итак, для определения  $h$ -параметров необходим режим короткого замыкания в выходной цепи и режим холостого хода во входной. Это достаточно просто осуществляется экспериментально, поскольку указанные режимы близки к режимам работы транзистора в реальных схемах.

### 3.2 Задание на выполнение лабораторной работы

#### 3.2.1 Экспериментальная часть работы

1. С помощью измерительной схемы, приведенной на рисунке 3.2, исследовать семейства входных и выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Марка транзистора задаётся преподавателем.

2. С помощью измерительной схемы, приведенной на рисунке 3.3, исследовать семейства входных и выходных ВАХ того же транзистора, включенного по схеме с общей базой (ОБ).

#### 3.2.2 Расчётная часть работы

Определить дифференциальные  $h$ -параметры биполярного транзистора для схем с ОЭ и с ОБ по вольт-амперным характеристикам БТ, полученным в ходе эксперимента.

#### 3.2.3. Исследовательская часть работы

Получить у преподавателя тип (марку) биполярного транзистора. Выписать из справочника следующие параметры исследуемого транзистора:

- а) выписать структуру транзистора ( $p-n-p$  или  $n-p-n$ );
- б)  $I_{K \max}$  - максимально допустимый постоянный ток коллектора;
- в)  $U_{КБО \max}$ ,  $(U_{КЭr \max})$  - максимально допустимое напряжение между коллектором и базой (эмиттером и коллектором);
- г)  $h_{21э}$  - коэффициент передачи по току для схемы с ОЭ. В справочниках указанный параметр может быть указан в следующих формах:

- диапазоном значений  $h_{21э}$ , например  $h_{21э} = 15...150$ ;
- в виде неравенства -  $h_{21э} \leq 40$ .

В первом случае в качестве значения  $h_{21э}$  брать среднее значение, во втором – минимальное.

### ***Исследование включения биполярного транзистора по схеме с ОЭ***

1. Собрать измерительную схему, приведенную на рисунке 3.2, для исследования семейств входных и выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Кроме того, если вам достался *p-n-p*-транзистор, то схему, приведенную на рисунке 3.2, необходимо исправить так, чтобы ваш *p-n-p*-транзистор был включен именно по схеме с ОЭ, а не иначе (*эмиттер* должен сидеть на «земле», *база* являться входом, *коллектор* - выходом). Направление *источника тока*  $I_1$ , полярность *батареи*  $E_1$ , подключение измерительных приборов должно соответствовать включению транзистора в нормальном активном режиме.

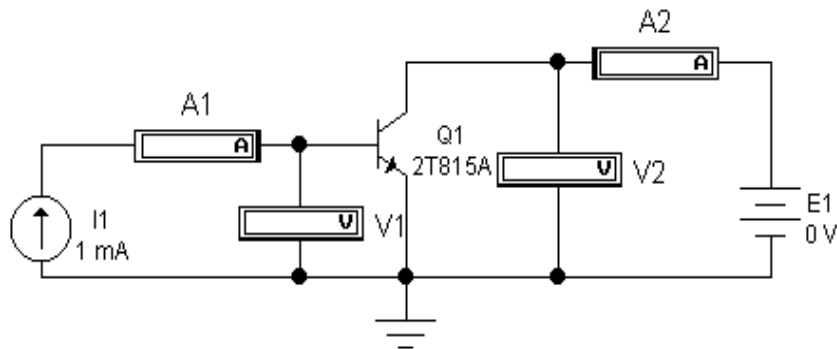


Рисунок 3.2 – Измерительная схема включения БТ *n-p-n* типа с ОЭ

После проверки схемы преподавателем перейти к выполнению следующих ниже действий.

2. Исследовать семейство статических входных ВАХ биполярного транзистора при трёх фиксированных значениях  $U_{кэ,j} = const, j=1, \dots, 3$ , указанных в первой строке таблицы 3.1. Для исследования каждой ветви ВАХ выполнить следующие действия:

- установить значение *источника*  $E_1$  измерительной схемы в соответствии с очередным значением  $U_{кэ,j}$ ;

- установить 5 значений *источника тока*  $I_1$  в соответствии с рекомендуемыми значениями тока базы  $I_{б,i}, i=1, \dots, 5$ , вычисленные по выражениям во втором столбце таблицы 3.1;

Таблица 3.1 - Семейство входных ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОЭ

Номер опыта	$I_{б}, \text{мА}$	$U_{кэ,1}=0$	$U_{кэ,2}=0.05 \text{ В}$	$U_{кэ,3} = 0.5 \cdot U_{КБ0 \text{ max}}, (0.5 \cdot U_{КЭ \text{ max}}), \text{В}$
		$U_{бэ}, \text{мВ}$	$U_{бэ}, \text{мВ}$	$U_{бэ}, \text{мВ}$
1	$0.05 \cdot I_{К \text{ max}} / h_{21Э}$			
2	$0.25 \cdot I_{К \text{ max}} / h_{21Э}$			
3	$0.5 \cdot I_{К \text{ max}} / h_{21Э}$			
4	$0.75 \cdot I_{К \text{ max}} / h_{21Э}$			

- для каждого установленного  $i$ -го тока базы измерить  $U_{бэ}$  по вольтметру  $V_1$  и зафиксировать в соответствующий столбец таблицы 3.1. Повторить вышеуказанные действия для всех трёх указанных в таблице значений  $U_{кэ,j}$ . Затем по измеренным значениям построить график семейства входных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

3. Исследовать семейство статических выходных ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОЭ при пяти фиксированных *рекомендуемых* значениях *входного* тока базы  $I_{б,j} = \text{const}, j=1, \dots, 5$ , определённых по выражениям в первой строке таблицы 3.2. Для каждой ветви выполнить следующие действия:

- установить значение *источника тока*  $I_1$  в соответствии с очередным  $j$ -м значением входного тока  $I_{б,j}$  в первой строке таблицы 3.2;

- установить 5 значений *источника ЭДС*  $E_1$  в соответствии с рекомендуемыми значениями  $U_{кэ,i}, i=1, \dots, 6$ , вычисленными по выражениям во 2-м

столбце таблицы 3.2;

- для каждого установленного значения  $U_{кэ,i}$  измерить ток коллектора по амперметру  $A_2$  и зафиксировать в таблицу 3.2.\*

Повторить вышеуказанные действия для всех пяти указанных в таблице значений  $I_{б,j}$ . По измеренным значениям построить график семейства выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

Таблица 3.2 – Семейство выходных ВАХ БП-транзистора в схеме с ОЭ

Номер опыта	$U_{кэ}, В$	$I_{б,1} = \frac{I_{К \max}}{10 \cdot h_{21 \ominus}}$	$I_{б,1} = \frac{3 \cdot I_{К \max}}{10 \cdot h_{21 \ominus}}$	$I_{б,1} = \frac{5 \cdot I_{К \max}}{10 \cdot h_{21 \ominus}}$	$I_{б,1} = \frac{7 \cdot I_{К \max}}{10 \cdot h_{21 \ominus}}$
		$I_k, mA$	$I_k, mA$	$I_k, mA$	$I_k, mA$
1	0.1				
2	0.5				
3	1.0				

### **Исследование включения биполярного транзистора по схеме с ОБ**

1. Собрать измерительную схему, приведенную на рисунке 3.3, для исследования семейств входных и выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОБ.

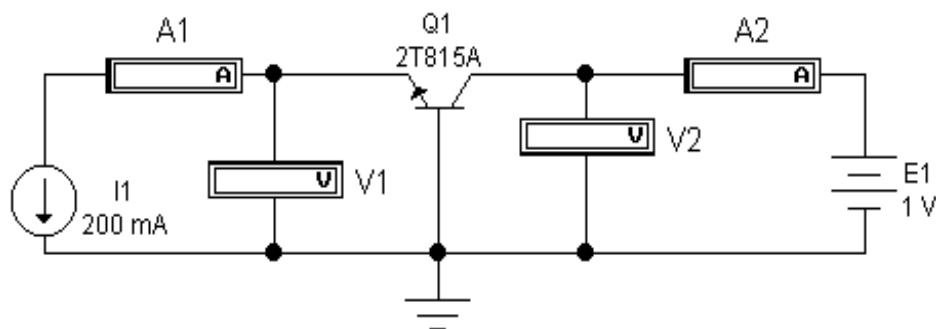


Рисунок 3.3 – Измерительная схема включения БТ *n-p-n* с ОБ

2. Исследовать семейство входных ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОБ при 3-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{кб,j} = const, j=1, \dots, 3$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 3.3.

\* Вместо выражений для токов базы и значений  $U_{кэ}$  в таблицу в отчёте писать вычисленные значения.

Таблица 3.3 – Семейство входных ВАХ БП-транзистора в схеме с ОБ

Номер опыта	$I_{э}, \text{mA}$	$U_{кб,1}=0 \text{ В}$	$U_{кб,2}=0.25 \cdot U_{КБО \text{ max}}, \text{ В}$	$U_{кб,3}=0.5 \cdot U_{КБО \text{ max}}, \text{ В}$
		$U_{бэ}, \text{mB}$	$U_{бэ}, \text{mB}$	$U_{бэ}, \text{mB}$
1	$0.05 \cdot I_{K \text{ max}}$			
2	$0.25 \cdot I_{K \text{ max}}$			
3	$0.5 \cdot I_{K \text{ max}}$			
4	$0.75 \cdot I_{K \text{ max}}$			
5	$0.95 \cdot I_{K \text{ max}}$			

Для каждой ветви выполнить следующие действия:

- установить значение источника ЭДС  $E_1$  в соответствии с очередным значением  $U_{кб,j}$ ;

- установить 5 значений источника тока  $I_1$  в соответствии с рекомендуемыми значениями тока эмиттера  $I_{э,i}$ ,  $i=1, \dots, 5$  вычисляемым по выражениям во втором столбце таблицы 3.3;

- для каждого установленного тока эмиттера измерить  $U_{бэ}$  по вольтметру  $V_1$  и зафиксировать в таблицу 3.3.

Повторить вышеуказанные действия для всех 3-х указанных в таблице значений  $U_{кб,j}$ .

По измеренным значениям построить график семейства входных ВАХ. Определить параметры  $h_{11б}$  и  $h_{12б}$ .

3. Исследовать семейство статических выходных ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОБ при пяти фиксированных рекомендуемых значениях тока  $I_{э,j} = \text{const}$ ,  $j=1, \dots, 5$  вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 3.4.

Для исследования каждой ветви выполнить следующие действия:

- установить значение источника тока  $I_1$  в соответствии с очередным значением  $I_{э,j}$  первой строки таблицы;

- установить 4 значения источника ЭДС  $E_1$  в соответствии с рекомендуемыми значениями  $U_{кб,i}$ ,  $i=1, \dots, 4$ , вычисляемыми по выражениям во 2-м

столбце таблицы;

- для каждого установленного значения  $U_{кб,i}$  измерить ток коллектора по амперметру  $A2$  и зафиксировать в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - Семейство выходных ВАХ БП-транзистора в схеме с ОБ

Номер опыта	$U_{кб}, В$	$I_{э,1} = \frac{I_{k \max}}{10}$	$I_{э,2} = \frac{3I_{k \max}}{10}$	$I_{э,3} = \frac{5I_{k \max}}{10}$	$I_{э,4} = \frac{7I_{k \max}}{10}$
		$I_k, mA$	$I_k, mA$	$I_k, mA$	$I_k, mA$
1	0				
2	1.0				
3	$0.2 \cdot U_{КБЭ \max}$				
4	$0.8 \cdot U_{КБЭ \max}$				

Повторить вышеуказанные действия для всех пяти указанных в таблице 3.4 значений  $I_{э,j}$ . По измеренным значениям построить график семейства выходных ВАХ биполярного транзистора в схеме с ОБ.

**Методические рекомендации по вычислению дифференциальных малосигнальных  $h$ -параметров БТ**

1. Методика определения  $h_{11э}$  – входного сопротивления  $r_э$  «в режиме короткого замыкания на выходе» для схемы ОЭ. Параметр  $h_{11э}$  определяется по графикам входных ВАХ, приведенных на рисунке 3.4.

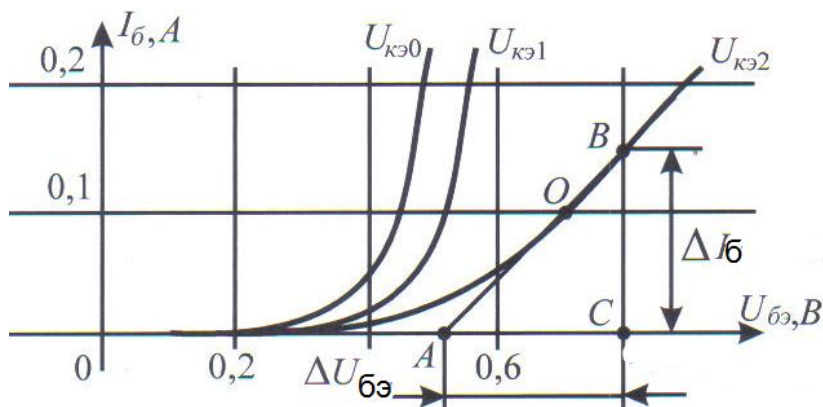


Рисунок 3.4 – Графическое определение  $h_{11э}$

Последовательность определения параметра  $h_{11Э}$  следующая:

- выбирается произвольная точка  $O$  на линейном участке последней ветви ВАХ - при  $U_{кЭ} = U_{кЭ,2} = 0.5U_{кб\max}$ ;
- в выбранной точке строится касательная к графику ВАХ, на которой строится произвольный прямоугольный треугольник  $ACB$ ;
- параметр  $h_{11Э}$  определяется как отношение длин катетов  $CA$  и  $BC$ :

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \Big|_{U_2=const} = \frac{\Delta U_{бЭ}}{\Delta I_{б}} \Big|_{U_{кЭ}=U_{кЭ,2}}, \quad (3.2)$$

$$\text{где } \Delta U_{бЭ} = U_{бЭ(C)} - U_{бЭ(A)}, \quad (3.3)$$

$$\Delta I_{б} = I_{б(B)} - I_{б(C)}. \quad (3.4)$$

2. Методика определения  $h_{12Э}$  - коэффициента обратной связи по напряжению «в режиме холостого хода на входе» в схеме ОЭ. Параметр  $h_{12Э}$  определяется также по входным ВАХ транзистора, приведенным на рисунке 3.5.

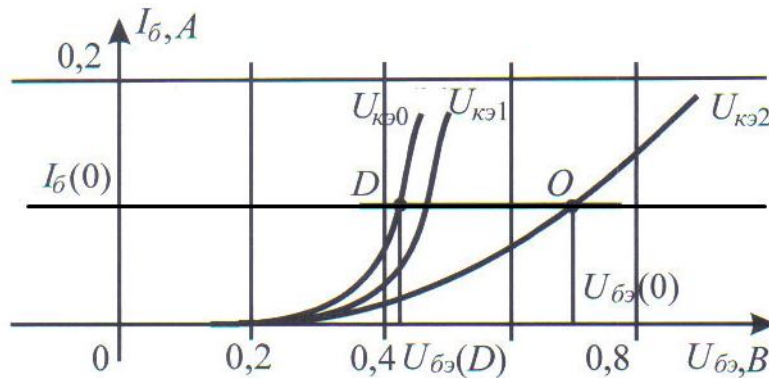


Рисунок 3.5 – Графическое определение  $h_{12Э}$

Последовательность определения параметра  $h_{12Э}$  следующая:

- через точку  $O$  проводится горизонтальная секущая  $OD$ ;
- вычисляются изменения входных и выходных напряжений при фиксированном значении входного тока  $I_1 = I_{б}(O)$  по формулам 3.5 и 3.6.



$$\Delta U_1 = \Delta U_{\delta\varepsilon} = U_{\delta\varepsilon(O)} - U_{\delta\varepsilon(D)}, \quad (3.5)$$

$$\Delta U_2 = \Delta U_{\kappa\varepsilon} = U_{\kappa\varepsilon 2} - U_{\kappa\varepsilon 0}; \quad (3.6)$$

- вычисляется величина параметра  $h_{12\varepsilon}$  по формуле (3.7).

$$h_{12\varepsilon} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \Big|_{I_1 = \text{const}} = \frac{\Delta U_{\delta\varepsilon}}{\Delta U_{\kappa\varepsilon}} \Big|_{I_{\delta} = I_{\delta(O)}}. \quad (3.7)$$

3. *Методика определения  $h_{21\varepsilon}$*  - коэффициента передачи по току в режиме «короткого замыкания на выходе». Для определения  $h_{21\varepsilon}$  в схеме ОЭ пользуются выходными ВАХ, приведенными на рисунке 3.6.

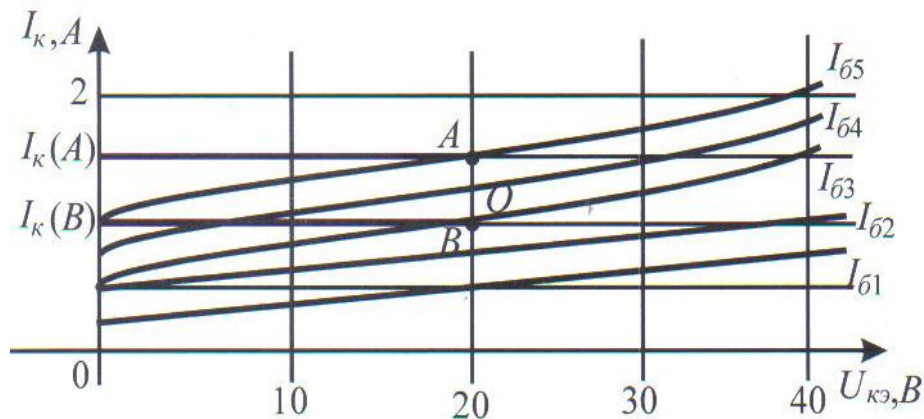


Рисунок 3.6 – Графическое определение  $h_{21\varepsilon}$

Последовательность определения параметра  $h_{21\varepsilon}$  следующая:

- выбирается точка  $O$  на активном участке одной из ветвей выходных ВАХ. (Рекомендуется выбирать так, чтобы точка  $O$  принадлежала ветви, соответствующей току базы, близкому к  $I_{\delta(O)}$  согласно построений, представленных на рисунках 3.4 и 3.5, а напряжение  $U_{\kappa\varepsilon(O)}$  в точке  $O$ , как показано на рисунке 3.4 было близко к  $U_{\kappa\varepsilon 2}$ );

- через точку  $O$  проводится вертикальная секущая  $AB$ ;

- вычисляются величины изменений токов при фиксированном значении выходного напряжения  $U_2 = U_{кэ}(O)$ :

$$\Delta I_2 = \Delta I_k = I_{k(A)} - I_{k(B)}, \quad (3.8)$$

$$\Delta I_1 = \Delta I_{\bar{\sigma}} = I_{\bar{\sigma}5} - I_{\bar{\sigma}3}; \quad (3.9)$$

- вычисляется параметр  $h_{21э}$ :

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2 = const} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{\bar{\sigma}}} \right|_{U_{кэ} = U_{кэ}(O)}. \quad (3.10)$$

4. *Методика определения  $h_{22э}$*  - выходной проводимости транзистора в схеме ОЭ в режиме «холостого хода на входе». Для определения  $h_{22э}$  в схеме ОЭ также используются выходные ВАХ транзистора, при этом выполняются следующие операции:

- через ту же точку  $O$  проводится касательная  $CE$  к ветви выходных ВАХ;
- на касательной строится прямоугольный треугольник  $CDE$ ;
- параметр  $h_{22э}$  определяется как отношение длин катетов  $DC$  и  $ED$ , как показано на рисунке 3.7.

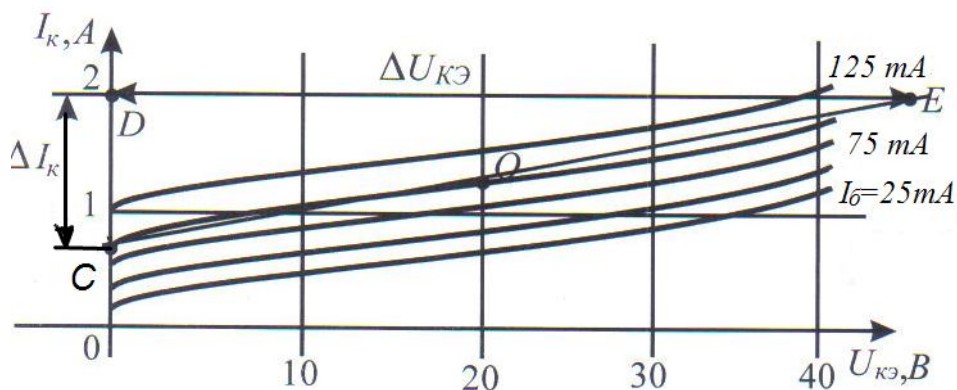


Рисунок 3.7 – Графическое определения  $h_{22э}$

Таким образом, параметр  $h_{22э}$  определяется следующим образом:

$$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1 = \text{const} = I_{\delta 3}} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_{\delta} = I_{\delta 3}}, \quad (3.11)$$

$$\text{где } \Delta U_2 = \Delta U_{KЭ} = U_{KЭ}(E) - U_{KЭ}(D), \quad (3.12)$$

$$\Delta I_2 = \Delta I_K = I_K(D) - I_K(C). \quad (3.13)$$

Отметим, что  $h$ -параметры для схемы ОБ определяются по аналогичным методикам по соответствующим семействам входных и выходных ВАХ, с учётом того, что  $\Delta I_1 = \Delta I_э$ ,  $I_1 = I_э$ ,  $\Delta U_2 = \Delta U_{\delta K}$ ,  $U_2 = U_{\delta K}$ .

### 3.3 Контрольные вопросы

1. Перечислите основные режимы работы транзисторов.
2. Какие физические факторы определяют усилительные свойства транзистора?
3. Какими отличительными особенностями характеризуются три схемы включения транзистора?
4. Перечислите  $h$ -параметры транзистора, объясните их физический смысл.
5. Объясните способ экспериментального определения  $h$ -параметров.
6. Объясните процесс усиления по току в схеме включения транзистора с ОЭ?
7. Как влияет величина напряжения на участке коллектор - эмиттер на положение входной статической характеристики транзистора?
8. Какое влияние на работу транзистора оказывает изменение частоты?
9. На какие параметры транзистора влияет изменение температуры?
10. В чем состоит отличие управления током коллектора транзистора от управления анодным током электронной лампы?
11. Перечислите и охарактеризуйте режимы работы биполярного транзистора.
12. Какая линия называется линией нагрузки транзистора?

## 4 Исследование характеристик полевого транзистора

*Цель работы:* изучить статические ВАХ и другие определяющие характеристики полевых (униполярных) транзисторов (ПТ).

#### 4.1 Теоретическое введение

Униполярный (полевой) транзистор – это полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на полевом эффекте – изменение электропроводимости поверхностного слоя под действием электрического поля, направленного перпендикулярно поверхности. Устройство полевого транзистора на основе МДП структуры показано на рисунке 4.1.

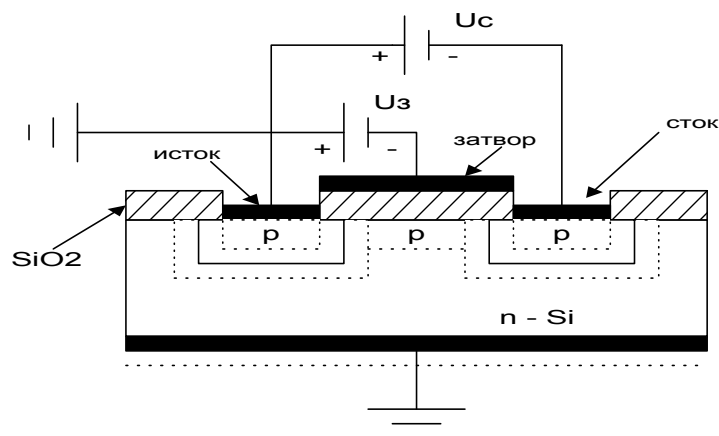


Рисунок 4.1 – Полевой транзистор МДП-структуры

От биполярного транзистора полевой транзистор отличается:

1) принципом действия: в биполярном транзисторе управление выходным сопротивлением производится либо входным током, либо разностью потенциалов между входными выводами транзистора, а в полевом транзисторе – входным потенциалом затвора или электрическим полем;

2) полевой транзистор обладает *большим входным сопротивлением!!!*

3) в полевом транзисторе не происходит инжекции носителей заряда – отсюда уменьшение рекомбинационных явлений и низкий уровень шумов (особенно на низких частотах).

*Униполярные (полевые) транзисторы с изолирующим затвором* (МДП структуры: металл-диэлектрик-полупроводник) подразделяются на: МДП-транзисторы с индуцированным каналом *n*-типа или *p*-типа, которые работают на основе появления индуцированного проводящего канала, т.е. заметный ток стока появляется только при определенной полярности и определенном значении напряжения на затворе относительно истока; МДП-транзисторы с встроенным каналом *n*-типа или *p*-типа, у которых канал наведен технологически изначально. Существуют также *униполярные транзисторы с управляющим p-n переходом*. Принцип работы таких транзисторов состоит в изменении площади сечения канала в соответствии с изменением напряжения между затвором и истоком  $U_{зв}$ . Легко увидеть, что принцип работы полевых транзисторов с изолированным затвором и управляющим *p-n* переходом в основном совпадает:

- 1) цепь управления изолирована от выходной цепи и потребляет ничтожную мощность управления;
- 2) эффект управления сводится к изменению сопротивления проводящего канала;
- 3) управляющее электрическое поле направлено перпендикулярно выходному току (структура с горизонтальным каналом).

## **4.2 Задание на выполнение лабораторной работы**

### 4.2.1 Экспериментальная часть работы

1. Исследовать семейства проходных (сток-затворных) и выходных (стоковых) ВАХ униполярного транзистора, указанной преподавателем марки, используя измерительные схемы, приведенные на рисунках 4.2, 4.3 или 4.4.
2. По полученным данным построить графики ВАХ соответствующего униполярного транзистора.

### 4.2.2 Расчетная часть работы

1. По графику сток-затворной характеристики определить дифференциальную крутизну  $S$ , (согласно методическим указаниям, приведенным ниже).

2. По графику выходных (стоковых) ВАХ определить дифференциальное выходное сопротивление  $r_{вых}$ .

#### 4.2.3 Исследовательская часть работы

Получить у преподавателя для проведения исследований тип (марку) униполярного транзистора.

Выписать из справочников *тип структуры и тип проводимости канала транзистора*, а также значения следующих параметров:

- а)  $I_{c\max}$ , мА – максимально допустимого постоянного ток стока;
- б)  $U_{cu\max}$ , В – предельно допустимого напряжения между стоком и истоком;
- в)  $U_{zu\max}$ , В – предельно допустимого напряжения между затвором и истоком;
- г)  $U_{zu\text{отс}}$ , В – напряжения отсечки для ПТУП или МДП-транзистора со встроенным каналом;
- д)  $U_{zu\text{пор}}$ , В – порогового напряжения для МДП-транзистора с индуцированным каналом;
- е)  $S$ , мА/В – крутизна сток-затворной ВАХ. В справочниках этот параметр может быть указан в следующих видах:
  - в виде диапазона значений  $S$ , например  $S = 0.4...2.4$  - в этом случае за  $S$  принимать среднее арифметическое значение диапазона;
  - в виде неравенства ( $S \geq 0.4$ ) – тогда за  $S$  брать минимальное значение.

#### ***Исследование ВАХ полевого транзистора с управляющим p-n переходом (ПТУП)***

1. Собрать измерительную схему, приведенную на рисунке 4.2, для исследования семейств сток-затворных и стоковых ВАХ ПТУП. Если вам достался транзистор с *p-каналом*, то приведенную схему необходимо исправить так, чтобы полярности подключения источников  $E_1$  и  $E_2$ , а также подключение измерительных приборов соответствовали нормальному включению ПТУП-транзистора. То есть *p-n* переход между затвором и истоком должен быть смещён источником  $E_1$  в

обратном направлении, а основные носители заряда в канале должны течь под действием  $E_2$  от истока к стоку.

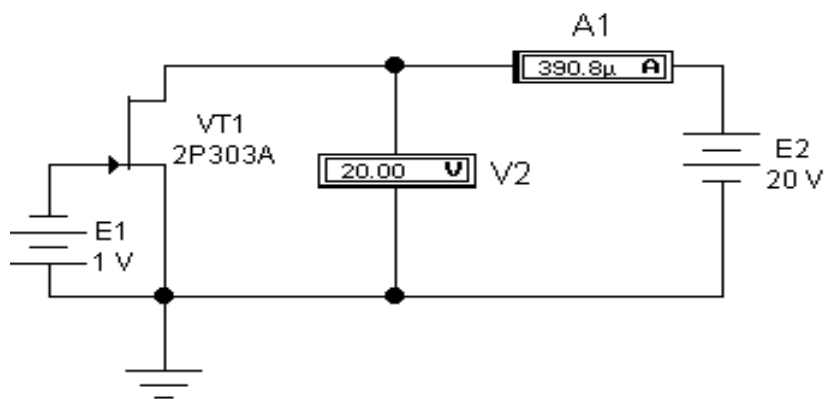


Рисунок 4.2 – Измерительная схема ПТУП-транзистора с  $n$ -каналом

2. Исследовать семейство статических сток-затворных ВАХ ПТУП-транзистора при двух фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{cu} = const$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.1. Для исследования каждой ветви ВАХ выполнить следующие действия:

- установить значение  $E_2$  в соответствии с очередным значением  $U_{cu}$ ;
- вычислить по выражениям во 2-м столбце таблицы 4.1 рекомендуемые значения  $U_{zu}$  и зафиксировать их во 2-м столбце таблицы 4.1 в отчёте;

Таблица 4.1 – Семейство проходных ВАХ ПТУП-транзистора

Номер опыта	$U_{zu}, В$	$U_{cu} = 0.01 \cdot U_{cu \max}, В$	$U_{cu} = 0.5 \cdot U_{cu \max}, В$
		$I_c, mA$	$I_c, mA$
1	$0.95 \cdot U_{zu \text{ отс}}$		
2	$0.75 \cdot U_{zu \text{ отс}}$		
3	$0.5 \cdot U_{zu \text{ отс}}$		
4	$0.25 \cdot U_{zu \text{ отс}}$		
5	0		

- с помощью источника  $E_1$  установить вычисленные выше значения  $U_{zu}$ ;
- для каждого установленного  $U_{zu}$  измерить по амперметру  $A1$  ток стока  $I_c$  и зафиксировать в таблицу 4.1;

- выполнить вышеуказанные действия для обоих указанных в таблице значений  $U_{си}$ . По измеренным значениям построить семейство сток-затворных ВАХ ПТУП.

3. Исследовать семейство статических стоковых ВАХ ПТУП-транзистора при 4-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{зи} = const$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.2. Для исследования каждой ветви ВАХ выполнить следующие действия:

- с помощью источника  $E_1$  установить очередное рекомендуемое значение  $U_{зи}$ , определяемое по выражению первой строки таблицы 4.2;

- вычислить по рекомендуемым выражениям в соответствующем столбце таблицы 4.2 рекомендуемые значения  $U_{си}$  и зафиксировать их;

- с помощью источника  $E_2$  установить вычисленные значения  $U_{си}$ ;

- для каждого установленного значения  $U_{си}$  измерить ток стока  $I_c$  по амперметру  $A1$  и зафиксировать в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Семейство выходных ВАХ ПТУП-транзистора

$U_{зи,1} = 0.9 \cdot U_{зиотс}$ , В		$U_{зи,2} = 0.5 \cdot U_{зиотс}$ , В		$U_{зи,3} = 0.1 \cdot U_{зиотс}$ , В	
$U_{си}$ , В	$I_c$ , мА	$U_{си}$ , В	$I_c$ , мА	$U_{си}$ , В	$I_c$ , мА
$0.1(U_{зиотс} - U_{зи,1})$		$0.1(U_{зиотс} - U_{зи,2})$		$0.1(U_{зиотс} - U_{зи,3})$	
$0.5(U_{зиотс} - U_{зи,1})$		$0.5(U_{зиотс} - U_{зи,2})$		$0.5(U_{зиотс} - U_{зи,3})$	
$U_{зиотс} - U_{зи,1}$		$U_{зиотс} - U_{зи,2}$		$U_{зиотс} - U_{зи,3}$	
$0.5 \cdot U_{си\max}$		$0.5 \cdot U_{си\max}$		$0.5 \cdot U_{си\max}$	
$0.8 \cdot U_{си\max}$		$0.8 \cdot U_{си\max}$		$0.8 \cdot U_{си\max}$	

Повторить вышеуказанные действия для всех указанных в таблице значений  $U_{зи}$ .

По измеренным значениям построить график семейства стоковых ВАХ.

### ***Исследование ВАХ МДП-транзисторов с индуцированным каналом***

1. Собрать измерительную схему, приведенную на рисунке 4.3, для исследования семейств сток-затворных и стоковых ВАХ МДП-транзисторов с индуцированным каналом. Если вам достался транзистор с p-каналом, то



приведенную схему необходимо исправить так, чтобы полярности подключения источников  $E_1$  и  $E_2$ , а также подключение измерительных приборов соответствовали нормальному включению МДП-транзистора. То есть поле затвора, создаваемое  $E_1$ , должно притягивать из подложки носители заряда, совпадающие по знаку с носителями заряда канала, а основные носители заряда в канале должны течь под действием  $E_2$  от истока к стоку. После проверки схемы преподавателем перейти к выполнению следующих пунктов.

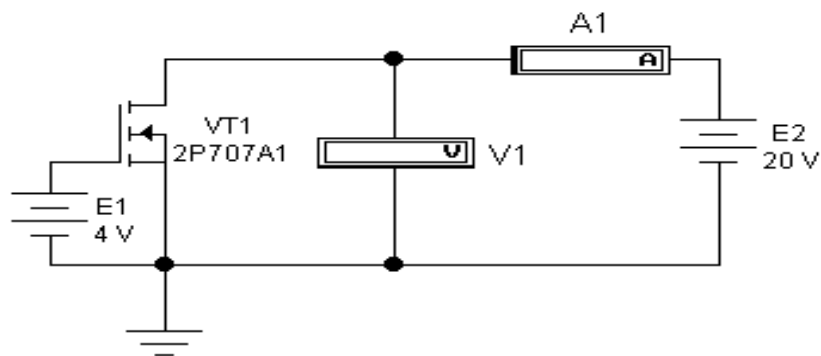


Рисунок 4.3 – Измерительная схема для исследования ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа

2. Исследовать семейство статических сток-затворных ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом при двух фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{cu} = const$ , вычисленных по выражениям в первой строке таблицы 4.3 по методике, аналогичной рассмотренной ранее. Результаты измерений занести в таблицу 4.3. По измеренным значениям построить график сток-затворных (проходных) ВАХ транзистора.

Таблица 4.3 – Семейство проходных ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом

Номер опыта	$U_{зи}$ , В	$U_{cu} = 0.01 \cdot U_{cu\max}$ , В	$U_{cu} = 0.5 \cdot U_{cu\max}$ , В
		$I_c$ , mA	$I_c$ , mA
1	$U_{зи\text{ пор}}$		
2	$2 \cdot U_{зи\text{ пор}}$		
3	$3 \cdot U_{зи\text{ пор}}$		
4	$0.5 \cdot U_{зи\text{ max}}$		

3. Исследовать семейство статических стоковых ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом при 4-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{зи} = const$ , вычисленных по выражениям в первой строке таблицы 4.4

Результаты измерений занести в таблицу 4.4. По измеренным значениям построить график семейства стоковых (выходных) ВАХ.

Таблица 4.4 – Семейство выходных ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом

$U_{зи,1} = 1.1 \cdot U_{зи\ пор}, В$		$U_{зи,2} = 2 \cdot U_{зи\ пор}, В$		$U_{зи,3} = 3 \cdot U_{зи\ пор}, В$	
$U_{си}, В$	$I_C, mA$	$U_{си}, В$	$I_C, mA$	$U_{си}, В$	$I_C, mA$
$0.1 \cdot (U_{зи,1} - U_{зи\ пор})$		$0.1 \cdot (U_{зи,2} - U_{зи\ пор})$		$0.1 \cdot (U_{зи,3} - U_{зи\ пор})$	
$0.5 \cdot (U_{зи,1} - U_{зи\ пор})$		$0.5 \cdot (U_{зи,2} - U_{зи\ пор})$		$0.5 \cdot (U_{зи,3} - U_{зи\ пор})$	
$U_{зи,1} - U_{зи\ пор}$		$U_{зи,2} - U_{зи\ пор}$		$U_{зи,3} - U_{зи\ пор}$	
$0.5 \cdot U_{си\ max}$		$0.5 \cdot U_{си\ max}$		$0.5 \cdot U_{си\ max}$	

### ***Исследование ВАХ МДП-транзисторов со встроенным каналом***

1. Собрать измерительную схему для исследования семейств сток-затворных и стоковых ВАХ МДП-транзисторов со встроенным каналом, приведенную на рисунке 4.4.

2. Исследовать семейство статических сток-затворных ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом при двух фиксированных *рекомендуемых* значениях  $U_{си} = const$ , вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.5.

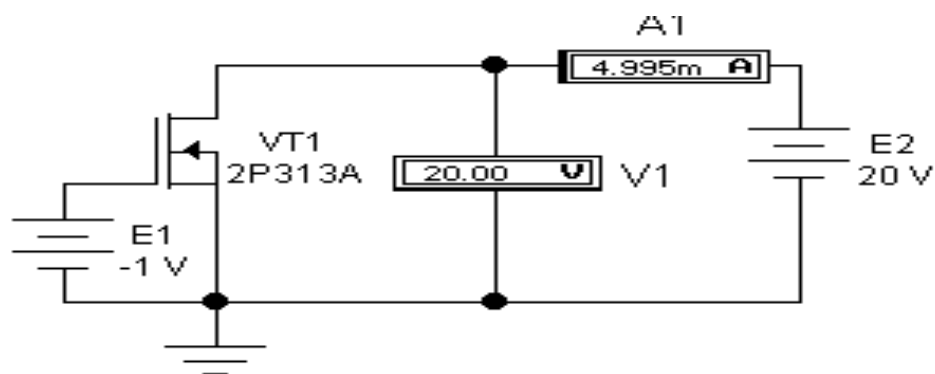


Рисунок 4.4 – Измерительная схема для исследования ВАХ МДП-транзистора со встроенным *n*-каналом

Результаты измерений занести в таблицу 4.5. По измеренным значениям построить график сток-затворных ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом.

Таблица 4.5 – Семейство проходных ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом. Транзистор типа ...

Номер опыта	$U_{зи}, В$	$U_{си} = 0.01 \cdot U_{си\ max}, В$	$U_{си} = 0.5 \cdot U_{си\ max}, В$
		$I_c, mA$	$I_c, mA$
1	$-0.95 \cdot U_{зи\ отс}$		
2	$-0.75 \cdot U_{зи\ отс}$		
3	$-0.5 \cdot U_{зи\ отс}$		
4	$-0.25 \cdot U_{зи\ отс}$		
5	0		
6	$0.25 \cdot U_{зи\ max}$		
7	$0.5 \cdot U_{зи\ max}$		

3. Исследовать семейство статических стоковых ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом при 4-х фиксированных рекомендуемых значениях  $U_{зи} = const$ , вычисленных по выражениям в первой строке таблицы 4.6. Результаты измерений занести в таблицу 4.6. По измеренным значениям построить график семейства стоковых (выходных) ВАХ.

Таблица 4.6 – Семейство выходных ВАХ МДП-транзистора со встроенным каналом.

$U_{зи,1} = -0.2 \cdot U_{зи\ отс}, В$		$U_{зи,2} = 0 В$		$U_{зи,3} = 0.5 \cdot U_{зи\ max}, В$	
$U_{си}, В$	$I_c, mA$	$U_{си}, В$	$I_c, mA$	$U_{си}, В$	$I_c, mA$
$0.1 (U_{зи,1} + U_{зи\ отс})$		$0.1 (U_{зи,2} + U_{зи\ отс})$		$0.1 (U_{зи,3} + U_{зи\ отс})$	
$0.5 (U_{зи,1} + U_{зи\ отс})$		$0.5 (U_{зи,2} + U_{зи\ отс})$		$0.5 (U_{зи,3} + U_{зи\ отс})$	
$U_{зи,1} + U_{зи\ отс}$		$U_{зи,2} + U_{зи\ отс}$		$U_{зи,3} + U_{зи\ отс}$	
$0.5 \cdot U_{си\ max}$		$0.5 \cdot U_{си\ max}$		$0.5 \cdot U_{си\ max}$	
$0.8 \cdot U_{си\ max}$		$0.8 \cdot U_{си\ max}$		$0.8 \cdot U_{си\ max}$	

**Методика определение крутизны сток-затворной ВАХ полевого транзистора**

Крутизна полевого транзистора  $S$  определяется по графику сток-затворной (проходной) ВАХ, приведенной на рисунке 4.5, по следующей методике:

- выбирается точка **O** на линейном участке ВАХ при  $U_{си} = 0.5 \cdot U_{си\ max}$ ;
- в выбранной точке строится касательная к графику ВАХ;
- на касательной строится произвольный прямоугольный треугольник ( $ACB$ );

- крутизна характеристики  $S$  определяется как отношение длин катетов  $CA$  и  $BC$ :

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{zu}}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta U_{zu} = U_{zu(C)} - U_{zu(A)}$ , (4.2)

$$\Delta I_c = I_c(B) - I_c(C). \quad (4.3)$$

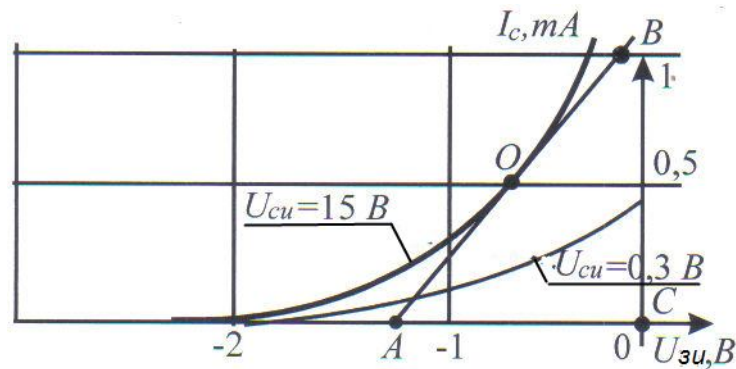


Рисунок 4.5 – Определение крутизны сток-затворной характеристики

### **Определение дифференциального выходного сопротивления**

Выходное дифференциальное сопротивление  $r_{вых}$  определяется по графикам выходных (стоковых) ВАХ, приведенных на рисунке 4.6, по следующей методике:

- выбирается произвольная точка  $O$  на произвольной ветви выходных ВАХ в области насыщения токов;
- в выбранной точке строится касательная к графику ВАХ;
- на касательной строится произвольный прямоугольный треугольник ( $ACB$ );
- дифференциальное сопротивление  $r_{вых}$  определяется как отношение длин катетов  $CA$  и  $BC$ :

$$r_{вых} = \frac{\Delta U_{cu}}{\Delta I_c}, \quad (4.4)$$

где  $\Delta U_{cu} = U_{cu(A)} - U_{cu(C)}$ , (4.5)

$$\Delta I_c = I_c(C) - I_c(B). \quad (4.6)$$

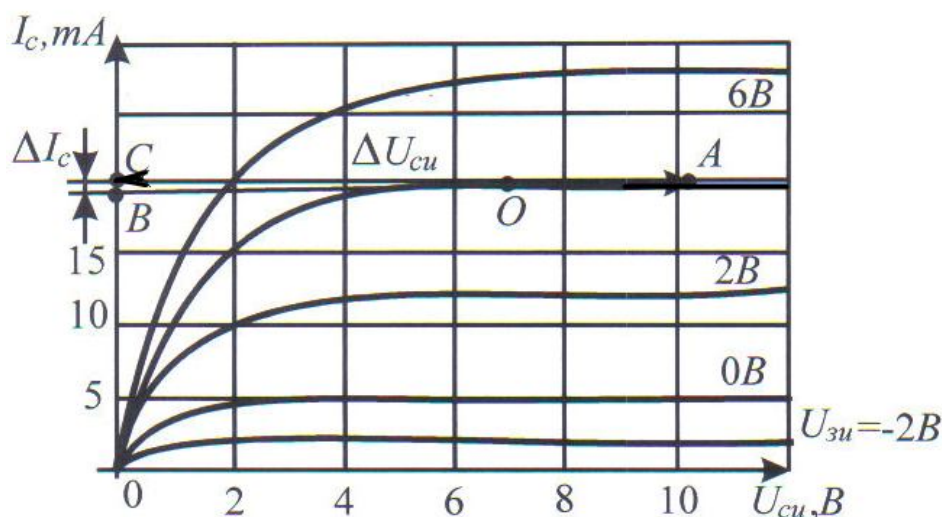


Рисунок 4.6 – Определения выходного дифференциального сопротивления

### 4.3 Контрольные вопросы

1. Объясните принципы работы маломощного полевого транзистора с  $p-n$  переходом и МДП-транзисторов.
2. Охарактеризуйте основные отличия внутренних структур мощных полевых транзисторов всех типов по сравнению с обычными (маломощными).
3. Дайте сравнительную характеристику их электрических параметров.
4. Дайте сравнительную характеристику свойств полевых транзисторов и биполярных.
5. В чем различие характера управления стоковым током в рассматриваемых транзисторах?
6. Изобразите и поясните статические сток-затворные характеристики полевых транзисторов всех типов.
7. Изобразите и поясните статические стоковые характеристики полевых транзисторов всех типов.
8. Назовите основные дифференциальные параметры полевых транзисторов и способы их определения.
9. В чем заключается особенность работы МДП транзистора с индуцированным каналом?

## 5 Исследование характеристик тиристора

*Цель работы:* исследовать статические вольт-амперные характеристики тиристорov

### 5.1 Теоретическое введение

Тиристор - это полупроводниковый прибор с тремя и более  $p-n$  переходами, имеющий на ВАХ участок с отрицательным динамическим сопротивлением. Тиристоры используются, в основном, в схемах переключения.

Существуют двухэлектродные тиристоры – динисторы; трехэлектродные тиристоры – тринисторы, в которых возможно управление напряжением включения тиристора, а также четырехвыводные тиристоры, в которых возможно управление как напряжением включения, так и отключением тиристора. Разработаны тиристоры, имеющие одинаковые ВАХ при различной полярности приложенного напряжения. Это симметричные тиристоры – симисторы.

Включение тиристора как это следует из вышесказанного, можно производить: путем медленного увеличения анодного напряжения; путем подачи напряжения на управляющий электрод.

Возможно также включение тиристора путем быстрого увеличения анодного напряжения. При этом через прибор будут протекать значительные емкостные токи, приводящие к уменьшению напряжения включения с ростом скорости изменения напряжения  $\partial U/\partial t$ .

### 5.2 Задание на выполнение лабораторной работы

#### 5.2.1 Экспериментальная часть работы

1. Пользуясь методическими указаниями, в зависимости от поставленной преподавателем задачи, исследовать ВАХ одного или нескольких тиристорov – динистора и/или тринистора, используя измерительные схемы, приведенные на рисунках 5.1 и 5.2 (в зависимости от типа тиристора).

2. По полученным данным построить графики ВАХ соответствующих тиристоров.

### 5.2.2 Расчетная часть работы

В ходе измерений определить следующие характеристики исследуемых тиристоров:

1. Пороговые значения анодных напряжений  $U_{a\text{пор}}$ .
2. Остаточные анодные напряжения в открытом состоянии  $U_{oc}$ .
3. Токи удержания  $I_{y\partial}$  - минимальные анодные токи, при которых тиристоры переходят из открытого состояния в закрытое.

### 5.2.3 Исследовательская часть

Получив у преподавателя марку тиристора, выяснив тип его структуры выписать из справочника следующие параметры прибора:

- $I_{oc\text{ ср}}$  - максимальный средний анодный ток в открытом состоянии;
- $I_{zc}$  - постоянный анодный ток в закрытом состоянии (при определённом значении  $U_a$ );
- $I_{обр}$  - обратный постоянный анодный ток в закрытом состоянии (при определённом значении  $U_{a\text{обр}}$ );
- $U_{обр\text{ max}}$  - максимальное обратное анодное напряжение;
- $U_{zc\text{ пор}}$  - максимальное анодное напряжение (пороговое напряжение);
- $U_{oc}$  - анодное прямое напряжение в открытом состоянии;
- $I_{y\text{ от}}$  - постоянный ток управления, необходимый для открывания тиристора;
- $U_{y\text{ нот}}$  - наибольшее постоянное напряжение на управляющем электроде, вызывающее включение тиристора.

В зависимости от разновидности структуры исследуемого тиристора – динистора или тринистора – собрать соответствующую измерительную схему рисунка 5.1 или 5.2. При сборке схем рекомендуется установить:

- величину переменных резисторов «Resistance» - 1 kOm;

- шаг изменения для переменников «Increment» - 1%;
- разные кнопки регулирования переменников «key»;
- коэффициент передачи «Voltage gain» для ИНУН – 1V/V;
- величину  $E_1 = (2 \dots 2.1)U_{зс\ пор}$ ;
- величину  $R_1 = \frac{2U_{a\ nom}}{I_{oc\ ср}}$ .

Выполнить методические указания пункта, соответствующего исследуемому тиристор.

### Исследование ВАХ динистора

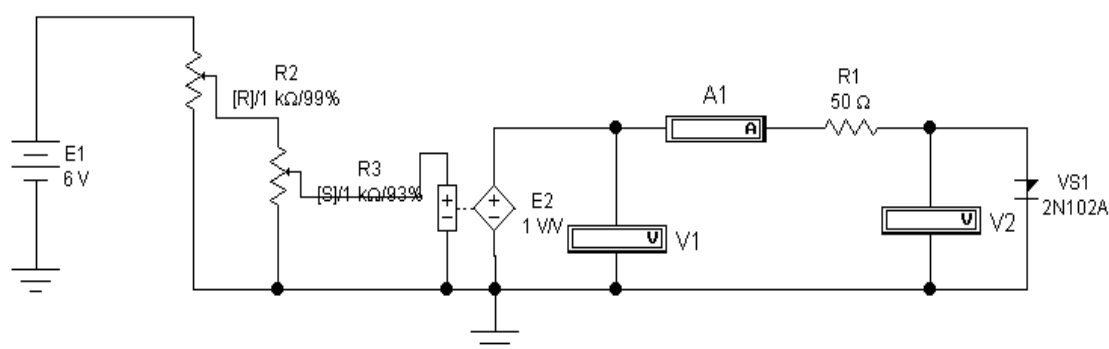


Рисунок 5.1 – Измерительная схема для исследования ВАХ динистора

После проверки собранной схемы выполнить следующие действия.

#### 1. Исследование ВАХ динистора в закрытом состоянии (до включения):

а) регулируя потенциометры R2 и R3, установите по вольтметру V2 анодные напряжения  $U_a$  в соответствии с первыми 2-мя рекомендуемыми значениями, вычисленными по выражениям в первой строке таблицы 5.1;

б) при каждом установленном  $U_a$  измерить анодный ток амперметром A1 и зафиксировать его в таблицу 5.1;

Таблица 5.1 – ВАХ динистора.

№ n/n	1	2	3	4	5
$U_a, В$	$0 \dots \frac{U_{зс\ пор}}{100}$	$(0.4 \dots 0.6)U_{a\ пор}$	$(0.95 \dots 0.99)U_{a\ пор}$		
$I_a, А$				$(0.4 \dots 0.6)I_{oc\ ср}$	$(0.4 \dots 0.6)I_{oc\ ср}$



с) «Аккуратно» настройте по вольтметру  $V_2$  3-е вычисленное значение и зафиксируйте значение анодного тока по амперметру  $A_1$  в таблицу. Если в процессе настройки тиристор открылся (признак включения - анодный ток резко возрос и показания  $V_2$  резко упали), а показания приборов до момента открывания вы зафиксировать не успели, то необходимо снизить анодное напряжение до запираания тиристора (когда значение анодного тока  $I_a$  станет малым – меньше 1 мА, показания  $V_1$  и  $V_2$  выровняются) и снова увеличить его до требуемой величины.

## 2. Исследование ВАХ динистора в открытом состоянии (после включения):

а) 4-е измерение – чуть «сдвинув»  $U_a$ , откройте тиристор – анодное напряжение должно резко упасть ( $V_2 \ll V_1$ ), а анодный ток резко возрасти и принять значение, определяемое выражением:

$$I_a = \frac{V_1 - V_2}{R_1} \approx \frac{V_1}{R_1} \approx \frac{E_1}{R_1} \approx \frac{I_{oc.ср}}{2};$$

б) по вольтметру  $V_2$  измерьте анодное напряжение и зафиксируете его в таблицу 5.1;

с) 5-е измерение - подстроив  $R_2$  и  $R_3$ , установите следующее значение тока  $I_a$  таблицы и измерьте  $U_a$ .

3. По измерениям таблицы 5.1 построить анодную ВАХ динистора в закрытом состоянии до включения и в открытом состоянии.

4. По результатам измерений определить следующие величины:

- пороговое анодное напряжения включения  $U_{a\text{ пор}}$ ;
- ток удержания  $I_{уд}$ ;
- остаточное анодное напряжение в открытом состоянии  $U_{oc}$ .

## **Исследование ВАХ тринистора**

Исследовать семейство анодных ВАХ тринистора при 3-х значениях управляющего тока  $I_{y,i}$ ,  $i=1, \dots, 3$ , указанных в таблице 5.2.

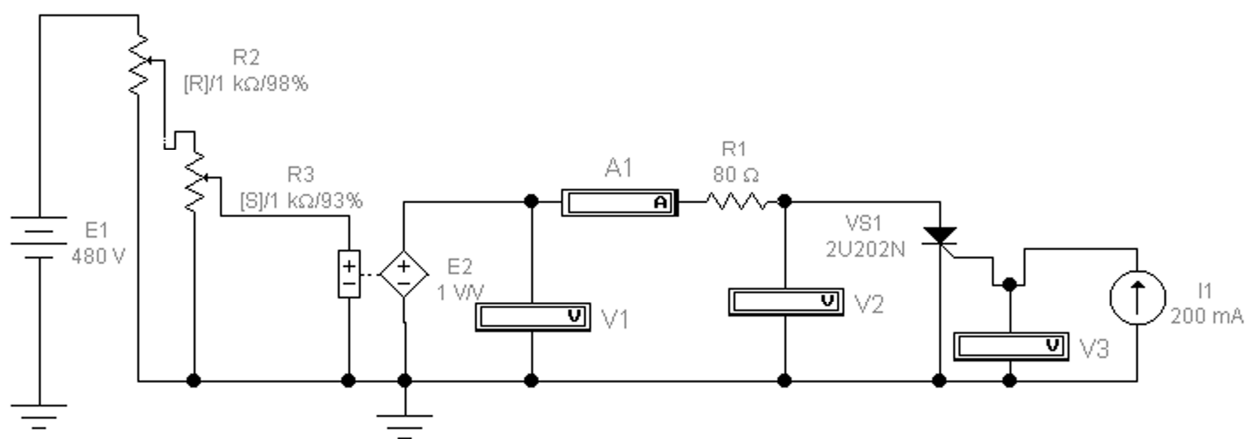



Рисунок 5.2 – Схема для исследования семейства ВАХ тристора

При исследовании очередной  $i$ -й характеристики выполнить:

1. *Определение  $i$ -х значений порогового анодного напряжения  $U_{a\text{пор},i}$  и тока удержания  $I_{yд,i}$ :*

a) для источника  $I_1$  установить очередное  $i$ -е значение управляющего тока  $I_{y,i}$  из таблицы 5.2 и включить ;

b) по вольтметру  $V_3$  измерить управляющее напряжение  $U_{y,i}$  и зафиксировать его в первую строку соответствующего столбца таблицы 5.2;

c) убедиться, что тристор находится в закрытом состоянии – *анодный ток  $I_a$  мал – меньше 1 мА, а показания вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  одинаковы или почти одинаковы*. В противном случае необходимо закрыть тиристор - с помощью  $R_2$  и  $R_3$  уменьшать анодное напряжение (по  $V_2$ ) до появления указанных признаков;

d) «прогнать» анодную ВАХ «вперёд» до включения тристора, плавно увеличивая анодное напряжение  $U_a$  (показания  $V_2$ ). Величину напряжения  $U_{a\text{пор},i}$  после которого он включился, зафиксировать в первую строку соответствующего столбца таблицы 5.2. Если момент включения вы «проскочили», тристор необходимо вернуть в закрытое состояние и начать опыт с начала;

e) «прогнать» анодную ВАХ «назад» с помощью потенциометров  $R_3$  и  $R_2$ , плавно уменьшать  $I_a$  до *отключения* тристора. Величину тока  $I_{yд,i}$  после которого он отключился, записать в 1-ю строку соответствующего столбца таблицы 5.2;

ф) установить  $E1 = (2 \dots 2.1)U_{a \text{ пор}, i}$ ;

г) установить относительную величину  $R3 = 0 \%$ .

## 2. Исследование анодной ВАХ до включения тринистора.

а) выполнить 1-е и 2-е измерения, установив потенциометром  $R_2$  рекомендуемые значения анодного напряжения  $U_a$ , вычисленные по соответствующим выражениям в соответствующем столбце таблицы 5.2. При каждом установленном  $U_a$  измерить анодный ток амперметром  $A_1$  и зафиксировать его в таблицу 5.2;

б) выполнить 3-е измерение таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Семейство анодных характеристик тринистора типа ...

№	$I_{y,0} = 0; U_{y,0} = \dots, B;$ $U_{a \text{ пор},0} = \dots, B; I_{y\partial,0} = \dots, mA$		$I_{y,1} = 0.5I_{y \text{ от}}; U_{y,1} = \dots, B;$ $U_{a \text{ пор},1} = \dots, B; I_{y\partial,1} = \dots, mA$		$I_{y,2} = I_{y \text{ от}}; U_{y,2} = \dots, B;$ $U_{a \text{ пор},2} = \dots, B; I_{y\partial,2} = \dots, mA$	
	$U_a, B$	$I_a$	$U_a, B$	$I_a$	$U_a, B$	$I_a$
1.	$(0 \dots 0.02)U_{a \text{ пор},0}$		$(0 \dots 0.02)U_{a \text{ пор},1}$		$(0 \dots 0.02)U_{a \text{ пор},2}$	
2.	$(0.2 \dots 0.3)U_{a \text{ пор},0}$		$(0.2 \dots 0.3)U_{a \text{ пор},1}$		$(0.2 \dots 0.3)U_{a \text{ пор},1}$	
3.	$(0.95 \dots 0.99)U_{a \text{ пор},0}$		$(0.95 \dots 0.99)U_{a \text{ пор},1}$		$(0.95 \dots 0.99)U_{a \text{ пор},2}$	
4.						
5.		$(0.8 \dots 0.9)I_{oc \text{ ср}}$		$(0.8 \dots 0.9)I_{oc \text{ ср}}$		$(0.8 \dots 0.9)I_{oc \text{ ср}}$
6.		$(1.01 \dots 1.05)I_{y\partial,0}$		$(1.01 \dots 1.05)I_{y\partial,1}$		$(1.01 \dots 1.05)I_{y\partial,2}$
7.						

## 3. Исследование анодной ВАХ после включения тринистора.

а) четвертое измерение - чуть «сдвинув»  $U_a$  с помощью  $R_2$  «вперёд», открыть тринистор;

б) зафиксировать значение анодного тока и анодного напряжения;

с) пятое измерение - установить значение тока для 5-го измерения и измерьте  $U_a$ . Если вы «недотягиваете» до требуемого значения тока, можете

увеличить значение  $E_1$ .

4. *Исследование анодной ВАХ в открытом состоянии «при выключении»*

a) *шестое измерение* - регулируя  $R_2$  и  $R_3$ , аккуратно уменьшить анодный ток  $I_a$  до значения  $(1.01...1.05)I_{yд,i}$ ;

b) измерить полученное анодное напряжение.

5. *Исследование ВАХ тринистора в закрытом состоянии (после выключения)*

a) *7-е измерение*. Регулируя  $R_2$ , «сдвинуть» анодный ток  $I_a$  до отключения тринистора, получившиеся значения  $I_a$  и  $U_a$  записать в таблицу 5.2.

6. Выполнять действия 1-5 для всех управляющих токов таблицы 5.2.

7. По измеренным значениям построить семейство анодных ВАХ тринистора.

8. Из результатов измерений для каждого  $I_{y,i}$  определить величины остаточного анодного напряжения в открытом состоянии  $U_{oc,i}$ .

### 5.3 Контрольные вопросы к защите отчета по лабораторной работе

1. Каковы особенности ВАХ неуправляемого тиристора?

2. Какие составляющие токов протекают в управляемом тиристоре?

3. Какими способами можно включить тринистор?

4. Какими способами можно выключить тринистор?

5. Как меняется вольт – амперная характеристика триодного тиристора при изменении напряжения на управляющем электроде?

6. Начертите схему включения тиристора, выполняющего роль ключа.

7. Начертите схему включения тиристора для определения его параметров.

8. Как изменится значение напряжения включения, если значение управляющего тока увеличить в два раза?

9. Как выглядит ВАХ симистора?

## 6 Содержание отчета

1. Тема и цель лабораторной работы.
2. Схемы лабораторных установок для исследования.
3. Таблицы наблюдений.
4. ВАХ исследуемых приборов.
5. Полученные экспериментальные и расчетные величины приборов.
6. Выводы по результатам проведенных исследований\*.

## 7 Тесты контроля качества усвоения дисциплины

**Тест 1.** Какое из приведенных утверждений правильное ?

- а) Электронно-дырочный переход - это слой, обеднённый носителями заряда;
- б) Электронно-дырочный переход - это слой, обогащённый носителями заряда.

**Тест 2.** Какой из приведенных пробоев является необратимым?

- а) лавинный;
- б) туннельный;
- в) тепловой.

**Тест 3.** Какая схема включения биполярного транзистора обеспечивает наибольшее усиление мощности? Почему?

- а) схема с общим коллектором;
- б) схема с общим эмиттером;
- в) схема с общей базой.

**Тест 4.** Какую схему включения биполярного транзистора называют эмиттерным повторителем? Почему?

- а) схема с общим коллектором;
- б) схема с общим эмиттером;
- в) схема с общей базой.

---

\* Защита выполненной лабораторной работы осуществляется каждым студентом индивидуально, как правило, непосредственно на занятии или в часы самостоятельной работы при наличии отчета.

**Тест 5.** Какой из приведенных униполярных транзисторов закрывается сразу после отключения питающего напряжения?

- а) с управляющим р-п переходом;
- б) МДП структуры с индуцированным каналом;
- в) МДП структуры с встроенным каналом.

**Тест 6.** Какой из приведенных униполярных транзисторов используется как при положительном, так и при отрицательном управляющем напряжении?

- а) с управляющим р-п переходом;
- б) МДП структуры с индуцированным каналом;
- в) МДП структуры с встроенным каналом.

**Тест 7.** Как изменится значение напряжения включения тиристора, если величина управляющего тока увеличится?

- а) увеличится;
- б) уменьшится;
- в) не изменится.

**Тест 8.** Сколько выводов имеет диностор?

- а) 2-х;
- б) 3-х;
- в) 4-х.

**Тест 9.** В каком режиме работает усилительный каскад, если рабочая точка расположена на участке линейной зависимости переходной характеристики?

- а) А;
- б) В;
- в) С.

**Тест 10.** Какой тип межкаскадной связи присутствует в усилителе низкой частоты?

- а) по переменной составляющей;
- б) гальваническая.

**Тест 11.** Какой из ниже перечисленных элементов может использоваться в качестве элемента управления усилительного каскада?

- а) источник питания;
- б) транзистор;

с) диод.

**Тест 12.** Чем обусловлены нелинейные искажения в усилителе?

- а) появлением высших гармоник в выходном сигнале;
- б) наличием реактивных элементов в схеме усилителя;
- в) зависимостью коэффициента усиления от частоты.

**Тест 13.** Какие из перечисленных характеристик цифровых интегральных схем относятся к статическим характеристикам?

- а) передаточные характеристики;
- б) амплитудно-временные характеристики;
- в) формирующие характеристики.

**Тест 14.** Какой из перечисленных генераторов относится к генератору синусоидальных колебаний?

- а) генератор напряжения прямоугольной формы;
- б) генератор ступенчато изменяющегося напряжения;
- в) RC-генератор.

**Тест 15.** Какое напряжение установится на выходе ЦАП, если на входе присутствует пятиразрядный двоичный код 11101:

- а) 25;
- б) 37;
- в) 29.

### **Список использованных источников**

1. Бобровников, Л. З. Электроника: учебник для вузов / Л. З. Бобровников. – СПб. : Питер, 2004.
2. Гальперин, М. В. Электронная техника: учебник / М. В. Гальперин. – М. : ФОРУМ, 2003.
3. Бикулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Бикулин, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990.
4. Тутов, Н. М. Полупроводниковые приборы / Н. М. Тутов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990.

