



М.В. Позднов

---

# ЭЛЕКТРОНИКА

---

Лабораторный практикум

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт энергетики и электротехники  
Кафедра «Промышленная электроника»

М.В. Позднов

## **ЭЛЕКТРОНИКА**

Лабораторный практикум

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012

УДК 621.38  
ББК 74.58 Я73  
П47

Рецензенты:

к.т.н., администратор проекта «Рено-Ниссан» ЗАО «Полад»

*Д.А. Яковлев;*

к.т.н., доцент Тольяттинского государственного университета

*А.В. Прядилов.*

**П47** Позднов, М.В. Электроника : лабораторный практикум / М.В. Позднов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. – 76 с. : обл.

В лабораторном практикуме приведены цели, задачи, программы лабораторных работ, методические рекомендации по их выполнению и составлению отчетов. Дано описание универсального лабораторного стенда и организационных мероприятий при проведении практикума.

Предназначен для студентов направлений подготовки 050100.62 «Педагогическое образование» специальностей 150702.65 «Физика металлов», 152200.62 «Наноинженерия», специализации «Физика наноструктур» очной формы обучения.

УДК 621.38  
ББК 74.58 Я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский  
государственный университет», 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум является важным видом учебной работы студентов, поскольку позволяет закрепить полученные на лекционных занятиях знания и сформировать навыки практического обращения с электронными компонентами и измерительным оборудованием для исследования их свойств, в частности электронной системы сбора данных, позволяющей автоматизировать эксперимент.

Наряду с экспериментальными видами работ в лабораторном практикуме представлены работы теоретического и расчетно-графического характера. Они способствуют углублению практических навыков и выработке умений работать со справочной, научной, методической и нормативной литературой.

Составление отчетной документации по выполненной лабораторной работе учит правильно оформлять результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований и их последующей обработки, а также анализировать и делать выводы.

Отработка подобных навыков на отдельных отчетах небольшого объема (по лабораторным работам) позволяет в дальнейшем выработать умения безошибочного оформления гораздо больших по объему материалов курсовых, дипломных и диссертационных работ, а также отчетов по научно-исследовательским работам.

Широкий спектр выполняемых работ и привлекаемых знаний и навыков способствует формированию студента как специалиста с высоким уровнем исследовательской подготовки [1].

## 1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Все лабораторные работы, описанные в настоящем практикуме, выполняются на универсальном модернизированном лабораторном стенде 87Л-01 «Луч».

В комплект оборудования входят:

- лабораторный стенд с приборами и электрическими источниками;
- измерительная система сбора данных с универсальным генератором;
- сменные панели;
- съемные элементы и соединительные провода.

### 1.1. Состав лабораторного стенда

Стенд содержит следующие приборы и электрические источники (рис. 1.1):

- два мультиметра, расположенных по краям стенда;
- универсальный генератор в левой части стенда;
- измерительную систему сбора данных (универсальный двухканальный осциллограф, подключенный к компьютеру) в правой части;
- набор генераторов постоянного тока и напряжения, расположенных внизу стенда.

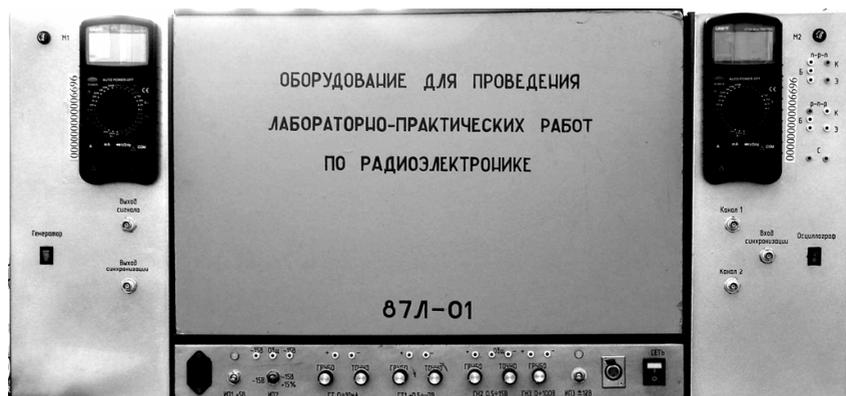


Рис. 1.1. Общий вид стенда

## 1.2. Описание электрических источников

Электрические источники расположены на нижней панели стенда (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Нижняя панель универсального лабораторного стенда

Включение стенда осуществляется клавишей «Сеть», после чего первичная обмотка трансформатора стенда подключается к сети, на клавише загорается сигнальная лампа. Для подачи напряжения на исследуемые схемы блок питания имеет пять источников: *ГТ*, *ГТ1*, *ГН2*, *ГН3*, выходные зажимы которых выведены на его лицевую панель.

### 1.2.1. Описание набора генераторов постоянного тока и напряжения

Генератор тока *ГТ* (рис. 1.2) является источником постоянного тока и обладает большим внутренним сопротивлением, поэтому его выходной ток практически не зависит от сопротивления нагрузки. Максимальный выходной ток *ГТ* составляет 10 мА.

Генератор напряжения *ГТ1* является источником постоянного напряжения, обладает малым внутренним сопротивлением, и его выходное напряжение плавно регулируется от +0,5 до -7 В ручками «Грубо» и «Точно». Полярность выходного напряжения *ГТ1*, указанная на лицевой панели, соответствует интервалу его регулирования от +0,5 В до 0. При регулировании выходного напряжения *ГТ1* от 0 до -7 В его **полярность противоположна указанной**.

Генератор напряжения *ГН2* является стабилизированным источником напряжения, значение его напряжения плавно регулируется в пределах от 0,5 до 15 В ручками «Грубо» и «Точно». Ток нагрузки, при котором срабатывает защита *ГН2*, составляет 200 мА при выходном напряжении 15 В. При уменьшении выходного напряжения ток срабатывания защиты уменьшается.

Генератор постоянного напряжения *ГН3* позволяет плавно изменять выходное напряжение в пределах от 0 до 100 В одним регулятором.

### 1.2.2. Описание блока мультиметров

Блок мультиметров состоит из двух мультиметров (рис. 1.3) модели UNI-T UT54 (далее – мультиметр), расположенных на левой и правой панели стенда в верхней его части.



Рис. 1.3. Внешний вид мультиметра модели UNI-T UT54

Мультиметр имеет дисплей, отображающий  $3\frac{1}{2}$  значащих разряда и позволяет измерять значения постоянного, переменного тока и напряжения, сопротивления.

Точность измерения зависит от измеряемой величины и диапазона измерения, выбранного переключателем диапазонов.

Основные параметры мультиметра отражены в табл. 1.1–1.5.

Таблица 1.1

## Параметры измерения в режиме вольтметров

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
200 mV	100 $\mu$ V	$\pm (0,5\% + 1 \text{ разряд})$
2 V	1 mV	
20 V	10 mV	
200 V	100 mV	
1000 V	1 V	$\pm (0,8\% + 2 \text{ разряда})$

*Примечания.* На всех диапазонах входное сопротивление 10 Мом. Вольтметр имеет встроенную защиту от перенапряжений.

Таблица 1.2

## Параметры измерения в режиме амперметров

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
2 mA	1 $\mu$ A	$\pm (0,8\% + 1 \text{ разряд})$
20 mA	10 $\mu$ A	
200 mA	100 $\mu$ A	$\pm (1,5\% + 1 \text{ разряд})$
2 A	1 mA	
10 A	10 mA	$\pm(2\% + 5)$
20 A	10 mA	$\pm(2\% + 5)$

Таблица 1.3

## Параметры измерения в режиме омметра

Диапазон	Разрешающая способность	Точность
200 $\Omega$	0,1 $\Omega$	$\pm (0,8\% + 3)$
2 к $\Omega$	1 $\Omega$	$\pm (0,8\% + 1)$
20 к $\Omega$	10 $\Omega$	
200 к $\Omega$	100 $\Omega$	
2 М $\Omega$	1 к $\Omega$	
20 М $\Omega$	10 к $\Omega$	$\pm (1\% + 2)$
200 М $\Omega$	100 к $\Omega$	$\pm (5\%(-10) + 10)$

*Примечания.* Напряжение при разомкнутой цепи менее 700 мВ (на диапазоне 200 М $\Omega$  напряжение при разомкнутой цепи около 3 В). Имеет встроенную защиту от перенапряжений до 250 В постоянного напряжения или действующего значения переменного напряжения.

Таблица 1.4

**Параметры в режиме проверки диодов**

Условия измерения	Комментарий
При проверке прямого смещения течет постоянный ток около 1 мА. При обратном смещении (режим холостого хода) напряжение 2,8 В	Отображает напряжение, близкое к прямому напряжению на диоде, единица измерения мВ
Напряжение разомкнутой цепи около 2,8 В	Звуковой сигнал раздается, если сопротивление короткого замыкания меньше 70 Ом. Отображается приближенное значение в омах

Измерения в этом режиме имеют защиту от перегрузок 250 В постоянного напряжения или действующее значение переменного тока.

Таблица 1.5

**Параметры в режиме измерения коэффициента передачи по току маломощных транзисторов**

Диапазон	Условия измерения	Комментарии
hFE	Ток базы около 10 мкА, напряжение коллектор-эмиттер около 2,8 В	Измерение коэффициента передачи биполярных n-p-n и p-n-p транзисторов в диапазоне 0–1000

### **1.3. Описание измерительной системы сбора данных и универсальный генератор**

#### **1.3.1. Система сбора данных**

Измерительная система сбора данных представляет собой двухканальный цифровой осциллограф. Система подключена к компьютеру и позволяет через специальное программное обеспечение осуществлять снятие показаний и обработку электрических сигналов. Осциллограф может работать в режиме реального времени, отражая изменение сигнала на экране компьютера или осуществлять запись в файл в режиме регистратора.

Осциллограф (рис. 1.4) имеет два канала с общей землей (корпусом) и входом синхронизации (с общим корпусом). Включение блока осуществляется переключателем «Осциллограф».



Рис. 1.4. Внешняя панель осциллографа

Технические характеристики осциллографа:

- частота дискретизации – 1 Гвыб./с;
- временная развертка – 20 нс – 100 мс/дел;
- входная чувствительность – 5 мВ – 15 В/дел;
- длина записи – 4096 выборок/канал;
- входной импеданс – 1 МОм/30 пФ;
- максимальное входное напряжение – 100 В (пост./перем.);
- частотный характер –  $\pm 3$  дБ – 0 Гц–50 МГц.

Осциллограф имеет оптическую гальваническую развязку от компьютера, а также следующие особенности:

- внешний триггер с запуском по нарастанию и спаду сигнала;
- возможность отображения суммы и разности сигналов на входах и инвертированного сигнала;
- возможность отображения периодических сигналов с частотой стробирования до 1 ГГц.

Для входов вертикального отклонения предусмотрены следующие возможности:

- АС – фильтрация постоянной составляющей сигнала и работа с сигналами переменного тока;
- DC – непосредственное подключение источника сигнала к измерительным цепям приставки с передачей постоянной составляющей;
- Ground – заземление входа.

Чувствительность входов и режимы их работы изменяются программным путем. При этом щупы имеют дополнительную емкость 50–100 пФ.

### 1.3.2. Универсальный генератор

Универсальный функциональный генератор (УГ), так же как и осциллограф, подключен к персональному компьютеру и объединен в единую информационную систему с осциллографической приставкой. Генератор позволяет получать на своем выходе сигналы произвольной формы, в том числе и из перечня стандартных (синусоидальный, треугольный, прямоугольные и т. д.).

Генератор имеет следующие особенности:

- кварцевую стабилизацию частоты;
- оптическую изоляцию от персонального компьютера;
- дополнительный выход для синхронизации сигнала TTL-уровня;
- библиотеку форм дополнительных сигналов;
- возможность создания индивидуальных форм сигналов.



Рис. 1.5. Внешняя панель генератора

Основные параметры генератора:

- диапазон частот – 0,01 Гц–1 МГц;
- разрешение по частоте – 0,01%;
- вертикальное разрешение – 8 бит (0,4% от полной шкалы);
- диапазон амплитуды – 100 мВ–10 В при нагрузке 600 Ом;

- отклонение от нуля – от -5 В до +5 В;
- максимальная частота дискретизации – 32 МГц;
- коэффициент гармоник синусоиды – не более 0,08%;
- выходной импеданс – 50 Ом.

Передняя панель генератора показана на рис. 1.5. Здесь располагаются выход и вход синхронизации (оба с общим корпусом). Включение блока осуществляется переключателем «Генератор».

#### **1.4. Описание элементов монтажной части стенда**

*Сменные панели* представляют собой древесноволокнистые плиты, размер которых равен размеру монтажного поля. На лицевые поверхности сменных панелей нанесены изображения исследуемых электрических схем. Каждая сменная панель устанавливается только на то монтажное поле, штыри которого совпадают с отверстиями в ней. Правильность выбора рабочей стороны блока монтажных полей определяют также по маркировке сменной панели (шифр изделия, номер сменной панели и лабораторной работы). Если маркировка нанесена в левом нижнем углу сменной панели, следует использовать монтажное поле 1, а если в левом верхнем углу – монтажное поле 2.

Сменные панели хранятся в шкафу лаборатории.

Следует отметить, что изображения измерительных приборов на сменных панелях выполнены с некоторыми отступлениями от ГОСТов.

*Съемные элементы и соединительные провода* предназначены для сборки исследуемых схем. Съемные элементы устанавливают на монтажное поле через отверстия в сменной панели, имеющиеся на условных графических обозначениях элементов. Монтажное поле выполнено так, что после установки всех необходимых элементов исследуемая схема оказывается собранной (смонтированной). Соединительными проводами к ней подключают источники питания, измерительные приборы, подают сигналы от генератора и др.

Сборка исследуемой схемы занимает несколько минут, причем возможна замена любого ее элемента, имитация его выхода из строя, измерение напряжения в любой точке или тока в любом проводе и др.

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Работа с мультиметрами

Перед проведением измерений надо убедиться, что корректно установлен тип измеряемой величины (ток, напряжение и т. д.) и ее значение, а предполагаемое измеренное ее значение не превышает значения, указанного на переключателе диапазонов (находится по центру мультиметра).

Вращающийся переключатель необходимо установить на требуемый диапазон до проведения замеров.

#### **Внимание!**

1. Если измеряемая величина неизвестна, всегда следует начинать с наибольшего диапазона измерений и уменьшать диапазон, пока не будет отображено значение с удовлетворительной точностью.

2. Если на индикаторе отображается символ «1», показывающий, что измеряемая величина превышает значения в выбранном диапазоне, необходимо с помощью переключателя перейти на больший диапазон.

#### **2.1.1. Измерение постоянного напряжения**

1. Подсоединить черный измерительный провод к разъему «СОМ», а красный провод – к разъему «V».

2. Установить вращающийся переключатель в сектор, обозначенный « V».

3. Соединить измерительные проводники с измеряемым участком цепи. Жидкокристаллический индикатор высветит измеренное значение, а также полярность красного измерительного проводника.

#### **2.1.2. Измерение величины постоянного тока**

1. Соединить черный измерительный провод с разъемом «СОМ», красный измерительный проводник подсоединить к разъему «mA».

2. Установить вращающийся переключатель в положение «A..

3. Соединить измерительные проводники последовательно с измеряемой цепью. На индикаторе высветится измеряемое значение и полярность красного измерительного проводника.

#### **2.1.3. Измерение сопротивления**

1. Подключить черный измерительный провод к разъему «СОМ» и красный измерительный провод к разъему «Ω».

2. Установить вращающийся переключатель в положение, соответствующее сектору «Ω».

3. Присоединить измерительные провода к измеряемому элементу.

### **Внимание!**

1. Символ «1» появляется также при разорванной цепи и неприсоединенной нагрузке.

2. Перед замерами убедитесь, что все присоединяемые цепи и элементы не находятся под напряжением.

#### **2.1.4. Сигнализация короткого замыкания**

1. Подсоединить черный измерительный провод к разъему «COM», а красный провод к разъему «V».

2. Установить вращающийся переключатель в положение .

3. Подсоединить измерительные проводники к объекту измерений. На индикаторе отобразится измеренное значение.

4. Звуковой сигнал будет звучать, если сопротивление измеряемого объекта между измерительными проводами будет менее 70 Ом.

#### **2.1.5. Проверка диодов**

1. П. 1 и 2 из п. 2.1.4.

2. При проверке диодов в одном из направлений (прямом) на экране должно высветиться примерное напряжение на диоде, в другом (обратном) на экране должна высветиться единица в старшем разряде, что говорит о большом сопротивлении в обратном направлении.

3. При этих условиях диод исправен и полярность его при прозвонке в прямом включении: красный — анод, черный — катод. Если прибор показывает значения в обоих направлениях или звучит при прозвонке, диод неисправен.

#### **2.1.6. Измерение коэффициента передачи биполярного транзистора**

1. Установить вращающийся переключатель в положение hFE.

2. Определить, какого типа исследуемый транзистор: p-n-p или n-p-n. Вставить транзистор в гнезда соответствующего типа (рис. 2.1).

3. На индикаторе отобразится измеренное значение.

4. Условия измерения: ток базы около 10 мкА, напряжение коллектор-эмиттер около 2,8 В.

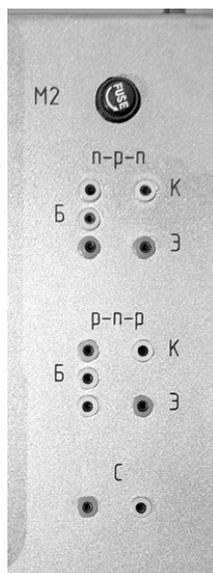


Рис. 2.1. Панели для измерения параметров транзисторов

### 2.1.7. Функция автовыключения

Данный мультиметр оснащен функцией автовыключения, выключающей мультиметр в случае длительного неиспользования (потребляемый ток менее 7 мкА в течение 15 минут). Чтобы включить мультиметр после перехода в спящий режим, надо дважды нажать на кнопку «On/Off».

## 2.2. Работа с универсальным генератором и осциллографом в среде PC-Lab

### 2.2.1. Описание программы PC-Lab

Программа PC-Lab 2000 предназначена для работы с осциллографом и генератором фирмы Velleman. После запуска программы на экран выводится окно, представленное на рис. 2.2.

В этом окне требуется проконтролировать выбор осциллографа PCS500, генератора PCG10, адрес LPT порта персонального компьютера, равный 378, а также установку в поле None в разделе Recorder/Logger. После этого необходимо нажать кнопку ОК, после чего программа перейдет к своему главному окну, показанному на рис. 2.3.

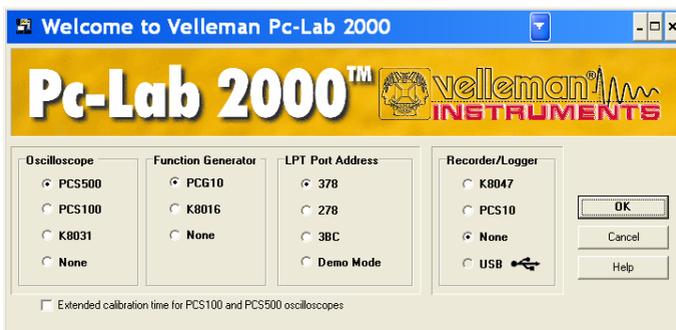


Рис. 2.2. Окно начальных настроек оборудования программы PC-Lab 2000

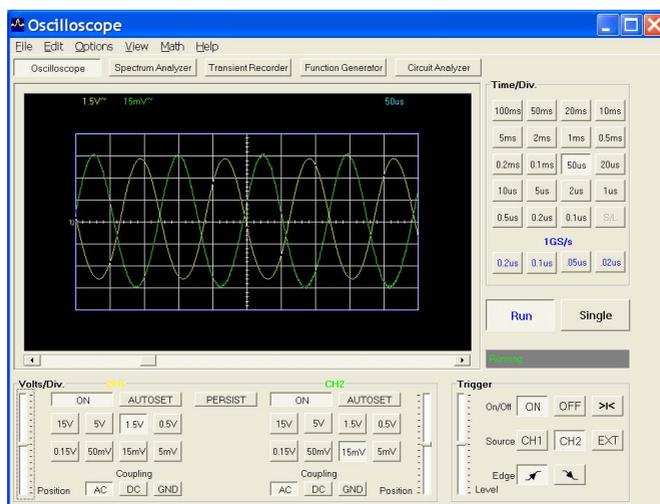


Рис. 2.3. Главное окно программы PC-Lab 2000, режим осциллографа

В области под главным меню (File, Edit, Options, View, Math, Help) располагается ряд кнопок, которые отражают текущий режим, в котором работает программа (на рисунке – Oscilloscope). Кнопки позволяют выбрать режим работы программы:

- Oscilloscope – режим осциллографа;
- SpectrumAnalyzer – режим анализатора спектра;
- TransientRecorder – режим регистратора переходных процессов;
- FunctionGenerator – режим функционального генератора;
- CircuitAnalyzer – анализатор электрических цепей.

Под кнопками выбора режима работы располагается поле для отображения графиков, соответствующих кривым напряжения, наблюдаемым в режиме Oscilloscope, и амплитудно-частотным характеристикам в режиме SpectrumAnalyzer, записанным зависимостям напряжения от времени в режиме регистратора переходных процессов TransientRecorder, состоянию работы генератора FunctionGenerator.

Для лабораторного практикума достаточно будет использования режимов осциллографа и генератора.

### 2.2.2. Описание работы с генератором

Вызов окна генератора производится в главном окне кнопкой FunctionGenerator (рис. 2.4).

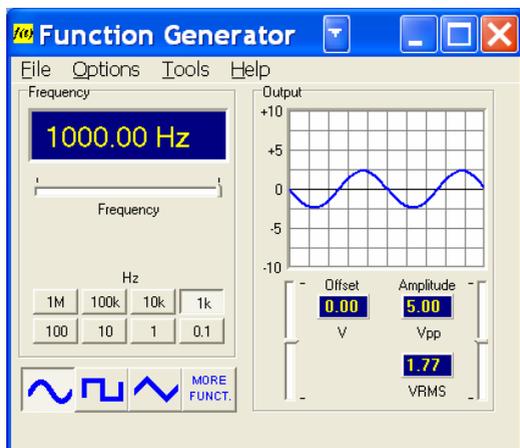


Рис. 2.4. Окно режима генератора

В окне генератора можно кнопками выбирать форму генерируемого сигнала. Диапазон сигналов More funct. позволяет выбирать другие формы сигналов, в том числе программируемые пользователем. Диапазон частоты повторения сигнала выбирается нажатием на соответствующие экранные кнопки диапазона Hz, а точное значение частоты задается с помощью ползунка под цифровым индикатором Frequency или непосредственно с клавиатуры в нем после активизации поля мышью.

Дополнительно можно изменять параметры сигнала в полях:

- Offset – добавлять постоянную составляющую в сигнал в вольтах в этом поле или ползунком;

- VRMS – устанавливать уровень сигнала по его действующему значению в поле VRMS в вольтах;
- Amplitude – устанавливать сигнал с перепадом напряжения от максимального до минимального в поле Amplitude в вольтах.

Особо следует отметить, что работа и с осциллографической и генераторной приставками производится с помощью одной программы – PC-Lab 2000.

### **2.2.3. Описание работы с осциллографом**

В режиме осциллографа (рис. 2.3) программа PC-Lab 2000 предоставляет в распоряжение органы управления, аналогичные обычным осциллографам.

Выделим поля главного окна:

- Time/Div – предназначен для установки масштаба по временной оси (оси  $x$ ) в одной клетке (синий цвет);
- Trigger – поле управления запуском осциллографа, т. е. установок режима четкого и статичного получения графика измеряемого сигнала;
- Volts/Div. – поля масштаба по напряжению (ось  $y$ ) для измеряемых сигналов по каналам CH1 и CH2.

Последовательность настройки на запись сигналов у данного осциллографа такая же, как и у обычных осциллографов:

- нажимаем запуск осциллографа RUN;
- задаем масштаб по времени в области Time/Div;
- задаем масштабы каналов CH1 и CH2 по напряжению;
- определяемся с тем, как будет осуществляться запуск осциллографа: по одному из каналов или внешним запуском. Допустим, это первый канал, тогда в области Source выбираем CH1 и фронт или спад (эти кнопки отражены косыми стрелками в поле Edge), по которому будет осуществлен запуск. Для настройки осциллографа рекомендуется для начала проводить настройку в автоматическом режиме, нажав OFF в поле Trigger;
- смещаем лучи каналов на необходимый уровень, для наглядности каждого луча. Эта операция выполняется линейками Position для CH1 и CH2, расположенными в окне Volts, а также для каждого канала по бокам вертикально;
- для проверки нулевого уровня (проверки нахождения нулевого напряжения на заданном канале) нажимаем GND в полях каждого канала.

- Обратите внимание: каждый канал может измерять как полный сигнал (режим DC), так и без постоянной составляющей сигнала (режим AC);
- смещение сигнала по времени осуществляем движком прокрутки, расположенным сразу под графическим полем с диаграммами.

### ***Рекомендации при настройке***

- Если настроить осциллограф сразу сложно, можно воспользоваться режимом автонастройки кнопки AUTOSET у каждого из каналов. Однако стоит быть *внимательным*, так как часто автонастройка заканчивается переключением осциллографа в режимы AC, что необходимо учитывать в дальнейшем.
- Запуск в ждущем режиме полезен для изучения особенностей сигналов на заданном уровне. Для этого запуска необходимо сначала в авторежиме (кнопка OFF в окне Trigger) найти лучи и настроить их масштабы по напряжению и времени. Включить кнопку ON и движком уровня в меню Trigger добиться прорисовки луча.

### **2.2.4. Описание системы меню основного окна программы**

Меню программы PC-Lab 2000 содержит следующие позиции:

- File – операции с файлами;
- Edit – выполнение команд редактирования: копирования Copy и вставки Paste;
- Options – управление параметрами программы;
- View – установка режима видимости различных параметров на экране программы;
- Math – установка типа математических операций, выполняемых над измеряемыми сигналами – сумма двух сигналов, их разница, инверсия сигнала во втором канале и построение зависимости XY (канал 1 – Y, канал 2 – X);
- Help – вызов помощи по программе.

Рассмотрим каждую из позиций меню подробнее.

#### ***Меню File***

Программа PC-Lab 2000 позволяет обмениваться данными с другими программами для анализа и обработки посредством передачи графических изображений через файлы формата bmp и численными значениями через файлы формата txt. Файл содержит численные значения измеряемых величин в несколько столбиков (указаны в самом файле). Первый

показывает время, второй и третий — напряжения первого и второго каналов. Всего в файл записывается 4096 значений напряжения.

Работу с файлами обеспечивают следующие пункты меню:

- OpenImage... — эта позиция предназначена для чтения изображений из графических файлов формата.bmp и вывода их на экран осциллографа в PC-Lab 2000;
- Open DSO Data — загрузка осциллограмм в виде численных данных из файла формата.txt;
- Save Image... — сохранение изображения снятых осциллограмм в графические файлы формата.bmp;
- Save DSO Data... — сохранение осциллограмм в виде численных данных в файл формата.txt;
- Save FFT Data... — сохранение данных анализатора спектра в файл формата.txt;
- Save settings... — сохранение установок осциллографа в файл с расширением.set;
- Recall Settings... — сброс сделанных установок в данном сеансе работы и вызов установок, записанных в файле установок.set;
- Print... — вывод окна печати изображения экрана;
- Print Setup... — отображение окна установок печати;
- Exit — завершение работы с программой;
- Calibrate & Exit — калибровка осциллографической приставки и выход из программы.

Все записанные файлы по умолчанию хранятся в папке Data, расположенной в каталоге программы PC-Lab 2000.

### ***Меню Edit***

Пункты меню Edit позволяют работать с буфером обмена операционной системы:

- Copy — копирует содержимое экрана осциллографа в буфер обмена в графическом виде;
- Paste — вставляет содержимое буфера обмена на экран осциллографа.

### ***Меню Options***

Пункты меню Options позволяют управлять параметрами аппаратной и программной частей измерительного комплекса. Состав пунктов меню следующий:

- FFT Windows – установка частотных окон при быстром преобразовании Фурье (БПФ);
- FFT Options – установка параметров, задающих работу быстрого преобразования Фурье;
- Hardware Setup... – установка порта, используемого осциллографом;
- Color... – установка цвета объектов экрана;
- Trigger Options – установка опции очистки сигнала синхронизации от шума.



Рис. 2.5. Окно пункта Hardware Setup меню Options

Пункт Hardware Setup открывает окно установки параметров осциллографической приставки (рис. 2.5) (режим работы или режим демонстрации), а также позволяет выбрать адрес параллельного порта, по которому осуществляется подключение осциллографической приставки к персональному компьютеру.

Пункт *меню Color* позволяет изменить цвета всех объектов экрана и его фона.

### *Меню View*

Меню View содержит контекстно зависимый набор команд. Для режима осциллографирования это:

- RMS value – вывод данных об измерении действующего значения переменного напряжения;
- dBm value – вывод данных об уровне переменного напряжения в децибелах;

- Sample Rate – вывод данных о скорости дискретизации (в отсчетах в секунду – S/s);
- Wawefrom Parameters... – вывод окна значений автоматически измеряемых параметров сигналов (рис. 2.6);
- Markers DSO;
- Markers FFT f&V;
- Markers FFT f&dV;
- Markers FFT f&SpectralDensity dV/sqrt(H);
- Bright Grid – установка повышенной яркости масштабной сетки;
- Dot Join – задание соединения линиями точек графика.



Рис. 2.6. Окно вычисления параметров измеренных осциллографом сигналов

Функция Dot Join по умолчанию включена, в результате чего осциллограммы представляются сплошными линиями – промежуточные значения между замерами интерполируются. Отключение этой функции ведет к точечному представлению осциллограмм, и каждая точка соответствует выборке сигнала.

В окне Waveform Parameters (параметры сигнала) позволяет определить ряд параметров сигнала и задать опции вывода того или иного параметра. Эти опции задаются для каждого канала или только для одного из них. Однако для адекватных вычислений форма осциллограмм должна быть достаточно простой, а на экране должно размещаться

несколько стационарных периодов наблюдаемых сигналов. В случае если *средствами программы не удастся адекватно вычислить какой-либо параметр*, вместо его значения показываются *два знака вопроса «??», а при невозможности вычисления — три знака «???»*. Последняя ситуация возможна, если осциллограмма не содержит информации для вычисления параметров — произведено измерение либо части периода, либо слишком большого числа периодов.

### *Меню Math*

Команды меню Math позволяют выполнять с измеряемыми сигналами ряд операций:

- CH1+CH2 — построение осциллограммы суммы сигналов двух каналов;
- CH1-CH2 — построение осциллограммы разности двух каналов;
- XY Plot — работа в режиме, когда сигнал первого канала является ординатой, а сигнал второго канала — абсциссой результирующей точки, в этом режиме возможно строить фигуры Лиссажу, вычислять фазовые сдвиги, контролировать кратные частоты и использовать осциллограф в качестве характериографа;
- Inverse CH2 — инверсия сигнала в канале CH2.

Выбор того или иного режима приводит к появлению кнопки с его названием под кнопкой PERSIST. Кнопка режима работы может быть либо в нажатом, либо в отжатом состоянии. В случае если кнопка нажата, выполняется соответствующая операция и полученная осциллограмма является результатом выполнения выбранной операции. Если отжать кнопку математической операции, осциллограф возвращается к стандартному режиму отображения сигналов от обоих каналов.

### 3. ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

Все лабораторные работы проводятся фронтально. На первом занятии целесообразно ознакомиться с устройством стенда, его источниками питания и измерительными приборами. Для этого необходимо подготовить программу измерений и исследований отдельных устройств самого стенда. Каждое очередное занятие состоит из следующих частей:

- предварительной беседы с преподавателями (допуска);
- подготовки к лабораторной работе и ее выполнения;
- составления отчета и защиты выполненной работы.

В ходе предварительной беседы преподаватель определяет возможность допуска студента к выполнению лабораторной работы. Студент должен объяснить смысл и цель предстоящей работы, знать основные положения теории, методику различных измерений в лабораторной работе.

Подготовка к работе проводится студентами самостоятельно и включает повторение теоретического материала с использованием учебников и другой литературы, а также конспекта лекций по изучаемой дисциплине и заготовку формуляра отчета с описанием программы работ и методики ее экспериментального выполнения. Перед подготовкой к работе необходимо ознакомиться со схемой, изображенной на сменной панели и предназначенной для конкретной лабораторной работы.

Для выполнения лабораторной работы сменные панели должны быть установлены на монтажные поля стендов и зафиксированы в рабочем положении. Стенды должны быть обесточены.

Студенты под руководством лаборанта в соответствии с методическими указаниями по выполнению работы собирают исследуемую схему, подключают измерительные приборы, генераторы и источники питания. Питание на стенды подается централизованно только после того, как преподаватель и лаборант проверят правильность сборки схем всей группой.

Особое внимание следует уделять исправности съемных элементов. Бережного отношения требуют сменные панели. Снятие блока монтажных полей и доступ в среднюю часть стенда, где находятся элементы крепления блоков и хранятся съемные элементы и соединительные провода, студентам запрещены.

Стенды в достаточной степени резервированы по источникам питания и измерительным приборам, что позволяет легко корректировать исследования при частичных отказах.

При выполнении лабораторных работ студенты должны произвести все измерения и заполнить таблицы.

Предварительно полученные данные целесообразно записывать в черновой рабочей тетради и по ним построить графики необходимых диаграмм, например вольт-амперных характеристик. Предъявив эти диаграммы преподавателю, необходимо убедиться в правильности выполненного эксперимента. Если *преподаватель выявит ошибки*, то эксперимент повторяют до их исчезновения. После этого стенды обесточивают, тумблеры выключают, а съемные элементы и соединительные провода собирают на пенале и предъявляют преподавателю.

После составления отчета по лабораторной работе и проверки его преподавателем студенты защищают работу [1].

## 4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

### Лабораторная работа 1 Определение свойств, параметров, вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов и степени их соответствия техническим условиям

*Цели работы:* достичь глубокого и прочного понимания свойств и характеристик полупроводниковых выпрямительных диодов, приобрести навыки экспериментального определения их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и практического определения соответствия их параметров техническим условиям или справочным данным.

*Задачи работы:*

- изучить теоретический материал по выпрямительным диодам;
- выполнить экспериментальную часть работы в соответствии с программой и обработать результаты экспериментов;
- по результатам проведенных работ оформить отчет и защитить его.

#### Краткие теоретические сведения

##### *Полупроводниковый диод*

Полупроводниковый диод представляет собой двухслойный прибор, состоящий из материалов с электронной  $n$  и дырочной  $p$  электропроводимостями и обладающий односторонней проводимостью тока. Работа диода основана на электронно-дырочном переходе, образующемся на границе раздела  $p$ - и  $n$ -областей.

##### *Электрические процессы в $p$ - $n$ -переходе в отсутствие внешнего напряжения*

В германиевых и кремниевых диодах двухслойная  $p$ - $n$ -структура (рис. 4.1,а) создается введением в один из слоев монокристалла акцепторной примеси, а в другой – донорной примеси. При комнатной температуре атомы акцепторов и доноров можно считать полностью ионизированными, т. е. практически все акцепторные атомы присоединяют к себе электроны, создавая при этом дырки, а донорные атомы отдают свои электроны, которые становятся свободными. Кроме основных носителей заряда в каждом из слоев имеются неосновные носители заряда, создаваемые путем перехода электронов основного материала из валентной зоны в зону свободных уровней.

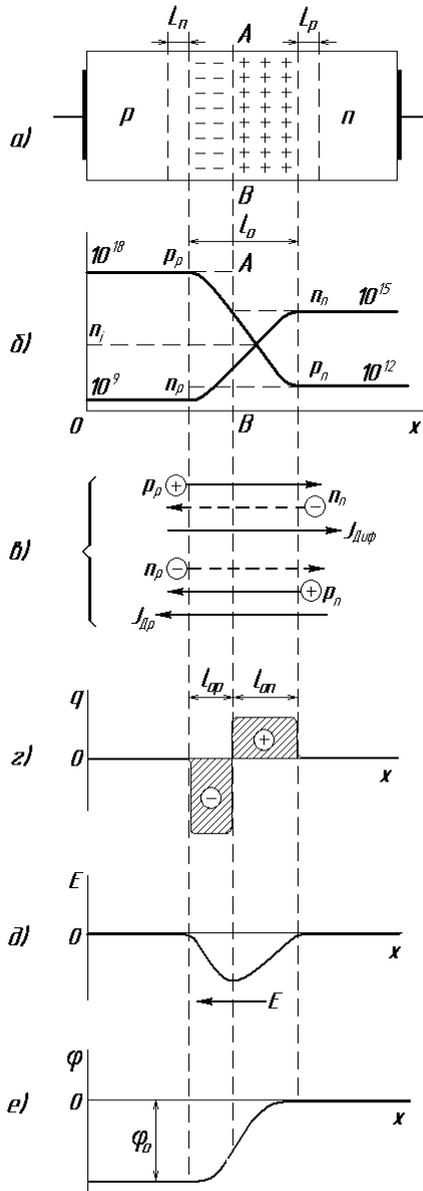


Рис. 4.1. Процессы в  $p$ - $n$ -переходе без внешнего смещения

На практике наибольшее распространение получили структуры с неодинаковой концентрацией внесенных акцепторной  $Na$  и донорной  $Nd$  примесей, т. е. с неодинаковой концентрацией основных носителей заряда в слоях  $p_p \approx Na$  и  $n_n \approx Nd$ . Типичными являются структуры с  $Na \gg Nd$  ( $p_p \gg n_n$ ). Распределение концентраций носителей заряда для таких структур показано на рис. 4.1,б и на примере германия, где приняты  $p_p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация собственных носителей заряда в германии при комнатной температуре  $n_i = 2,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Концентрации неосновных носителей заряда, существенно меньшие концентраций основных носителей заряда, составят для рассматриваемой структуры  $n_p = n_i^2/p_p = 10^9 \text{ см}^{-3}$ ;  $p_n = n_i^2/n_n = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

В  $p$ - $n$ -структуре на границе раздела слоев возникает разность концентраций одноименных носителей заряда: в одном слое они являются основными, в другом – неосновными. В приграничной области под действием разности концентраций возникает диффузионное движение основных носителей заряда во встречном направлении через границу раздела (рис. 4.1,в). Дырки из  $p$ -области диффундируют в  $n$ -область, электроны из  $n$ -области – в  $p$ -область. Дырки, вошедшие в  $n$ -область, рекомбинируют с электронами этой области, а электроны, вошедшие в  $p$ -область, – с дырками  $p$ -области. Вследствие двух факторов (ухода основных носителей заряда из приграничных областей и их рекомбинации с носителями заряда противоположного знака) концентрации основных носителей заряда ( $p_p$  и  $n_n$ ) в обеих приграничных областях, суммарная ширина которых  $l_p$ , снижаются (рис. 1.8,б). Кроме того, снижение концентрации носителей заряда одного знака сопровождается повышением концентрации носителей заряда другого знака. Вследствие этого в приграничной  $p$ -области повышается концентрация электронов, а в приграничной  $n$ -области – концентрация дырок. Таким образом, становится понятным характер распределения концентрации носителей заряда в  $p$ - $n$ -переходе, показанной на рис. 4.1,б сплошными линиями.

Такое диффузионное движение носителей заряда через границу раздела слоев проявляется в появлении в приграничных областях объемных зарядов, создаваемых ионами атомов примесей. Так, при уходе дырок из  $p$ -слоя в нем создается нескомпенсированный отрицательный объемный заряд за счет оставшихся отрицательных ионов акцепторных атомов примеси. Электроны же, ушедшие из  $n$ -слоя, оставляют здесь

нескомпенсированный положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами донорных атомов примеси. Наличие объемного заряда является главной особенностью  $p$ - $n$ -перехода. Кривая распределения объемного заряда в  $p$ - $n$ -переходе показана на рис. 4.1,г. Ввиду наличия объемного заряда в  $p$ - $n$ -переходе создаются электрическое поле и разность потенциалов. Кривые напряженности и потенциала показаны на рис. 4.1,д,е (за нулевой принят потенциал  $n$ -слоя). Отметим, что рассмотренный процесс формирования  $p$ - $n$ -перехода происходит уже на этапе введения в монокристалл акцепторной и донорной примесей.

Толщина слоя объемного заряда  $l_0$  составляет доли микрометров и зависит от концентрации примеси (основных носителей заряда) в  $p$ - и  $n$ -областях. Объемные заряды по обе стороны границы раздела равны. Из-за  $p_p \gg n_n$  переход будет преимущественно сосредоточен в  $n$ -области, как в более высокоомной.

Внутреннее электрическое поле, созданное объемными зарядами, является фактором, под действием которого обеспечивается равенство потоков носителей заряда через переход в обоих направлениях, т. е. равенство нулю суммарного тока в отсутствие внешнего электрического поля. Это обуславливается тем, что внутреннее электрическое поле с потенциальным барьером  $\phi_0$  (рис. 4.1,е) создает тормозящее действие для основных и ускоряющее — для неосновных носителей заряда. Таким образом, внутреннее электрическое поле приводит к уменьшению плотности диффузионного тока  $p_p$  и  $n_n$  ( $J_{\text{диф}}$ ) через переход и появлению встречного ему дрейфового тока  $p_p$  и  $n_n$  плотностью ( $J_{\text{др}}$ ).

Высота потенциального барьера  $\phi_0$  уменьшается с ростом температуры ввиду зависимости от температуры концентраций неосновных носителей заряда в слоях полупроводниковой структуры. При комнатной температуре для германия Ge 0,3–0,5 В, а для Si 0,6–0,8 В. Различие в значениях объясняется большей величиной запрещенной зоны в кремнии и, следовательно, меньшей концентрацией неосновных носителей заряда (при одинаковой температуре и одинаковых концентрациях внесенных примесей).

### ***Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода***

Рассмотрим случай, когда внешнее напряжение подключено к  $p$ - $n$ -структуре в прямом направлении, т. е. плюсом источника к выводу  $p$ -области, а минусом источника к выводу  $n$ -области (рис. 4.2,а). При

таким подключением источника создаваемое им электрическое поле направлено противоположно внутреннему полю в переходе, что приводит к уменьшению результирующего поля в  $p$ - $n$ -переходе. Объемный заряд обоих знаков, сосредоточенный в переходе по разные стороны границы раздела, будет определяться не только величиной  $\varphi_0$ , обусловливаемой, как было показано, диффузионным движением носителей заряда под действием разности их концентраций в приграничных слоях, но и внешним напряжением  $U_a$ . Если пренебречь падением напряжения в слоях  $p$ - и  $n$ -структуры, то объемному заряду в переходе будет отвечать напряжение  $\varphi_0 - U_a$ , меньшее, чем в отсутствие внешнего источника. Следовательно, уменьшится и обусловленный напряжением объемный заряд в  $p$ - $n$ -переходе. Величина  $\varphi_0 - U_n$  определяет высоту потенциального барьера в  $p$ - $n$ -переходе при включении внешнего напряжения в прямом направлении (рис. 4.2,б). Уменьшение объемного заряда (потенциального барьера) проявляется в сужении  $p$ - $n$ -перехода, которое происходит в основном за счет  $n$ -слоя, как более высокоомного.

Уменьшение потенциального барьера облегчает переход основных носителей заряда под действием диффузии через границу раздела в соседние области, что приводит к увеличению диффузионного тока через  $p$ - $n$ -переход (рис. 4.2,в). Указанное явление называют инжекцией носителей заряда через  $p$ - $n$ -переход.

Вместе с тем дрейфовый ток через  $p$ - $n$ -переход, создаваемый потоками неосновных носителей заряда, подходящих из приграничных слоев толщиной  $L$  к  $p$ - $n$ -переходу, остается без изменения. Разность диффузионного и дрейфового токов определяет результирующий прямой ток через  $p$ - $n$ -переход (прямой ток диода).

С повышением приложенного внешнего напряжения диффузионный ток увеличивается (так как уменьшившийся потенциальный барьер способны преодолеть основные носители заряда, обладающие меньшей энергией), в связи с чем возрастает прямой ток через  $p$ - $n$ -переход. Примерный вид прямой ветви вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода (диода) показан на рис. 4.2,г.

В кремниевых диодах величина  $\varphi_0$  выше, чем в германиевых. Одинаковая величина внешнего напряжения здесь создает меньшее относительное снижение потенциального барьера, чем в германиевых диодах, и обуславливает меньший прямой ток при одинаковой площади

*p-n*-перехода. Большая величина  $\phi_0$  является одной из причин большего падения напряжения в кремниевых диодах (0,8–1,2 В) по сравнению с германиевыми диодами (0,3–0,6 В) при протекании тока в прямом направлении. Таким образом, падение напряжения в полупроводниковых диодах не превышает 1,2 В, что выгодно отличает их от диодов других типов, в частности электровакуумных и газоразрядных (ионных).

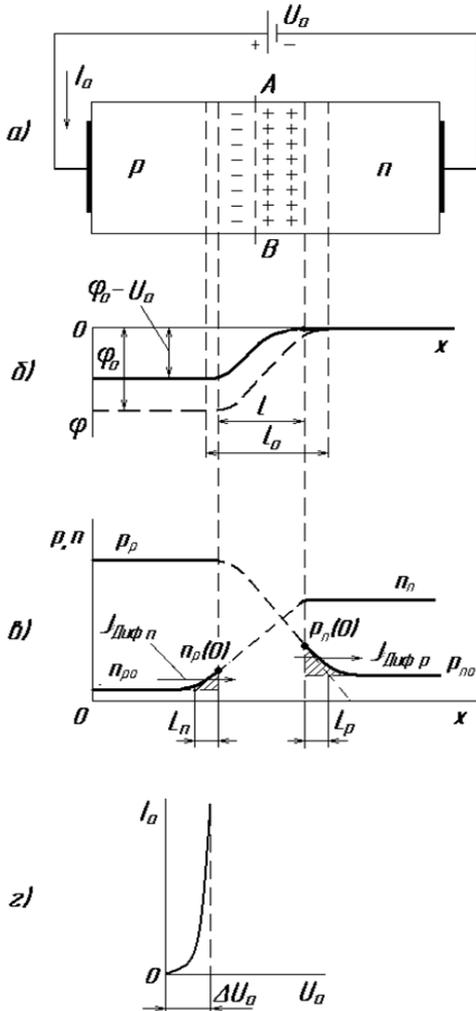


Рис. 4.2. Процессы в *p-n*-переходе при прямом смещении

Распределение неравновесных концентраций носителей заряда в прилегающих к  $p$ - $n$ -переходу слоях, создаваемых диффузией носителей через смещенный в прямом направлении  $p$ - $n$ -переход, показано на рис. 4.2,в.

При прямом смещении  $p$ - $n$ -перехода диффузионные составляющие тока существенно превышают дрейфовые составляющие. В связи с этим на границах перехода создаются избыточные концентрации неравновесных носителей заряда (отмечены штриховыми площадками на рис. 4.2,в).

Диффундируя в глубь слоев, неравновесные концентрации электронов и дырок рекомбинируют соответственно с дырками  $p$ -слоя, с электронами  $n$ -слоя. В связи с этим концентрации неравновесных носителей заряда уменьшаются по экспоненциальному закону до значений равновесных концентраций (рис. 4.2,в). На расстоянии диффузионных длин  $L_n$  и  $L_p$  их концентрации уменьшаются в  $e$  раз.

В несимметричном  $p$ - $n$ -переходе концентрация дырок в  $p$ -слое на несколько порядков выше электронов в  $n$ -слое, а неосновных носителей заряда в  $p$ -слое (электронов), наоборот, меньше, чем в  $n$ -слое (дырок). Этим и объясняется, что ток через  $p$ - $n$ -переход определяется в основном диффузией дырок из  $p$ -слоя в  $n$ -слой.  $p$ -слой, осуществляющий эмиссию дырок через  $p$ - $n$ -переход, называют эмиттером, а  $n$ -слой – базой.

Непрерывная диффузия дырок через  $p$ - $n$ -переход и их рекомбинация с электронами в прилегающем слое базы создают непрерывный приток электронов от отрицательного полюса источника, а следовательно, и ток в рассматриваемом участке цепи. Таким образом, в то время как прямой ток в  $p$ - $n$ -переходе определяется диффузионным током дырок, ток в основной части базового слоя и внешнем выводе обуславливается дрейфовым током электронов. В примыкающем к  $p$ - $n$ -переходу базовом слое прямой ток равен сумме диффузионного тока дырок и дрейфового тока электронов. Уменьшение дырочной диффузионной составляющей тока по мере удаления от границы  $p$ - $n$ -перехода объясняется уменьшением градиента концентрации дырок вследствие рекомбинации с электронами.

### ***Обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода***

При подключении к диоду источника внешнего напряжения в обратном направлении (рис. 4.3,а) потенциальный барьер возрастает на величину  $U_b$  и становится равным  $\phi_0 + U_b$  (рис. 4.3,б). При этом увеличиваются объемный заряд в  $p$ - $n$ -переходе и его ширина. Возросший потенциальный

барьер затрудняет прохождение через  $p$ - $n$ -переход основных носителей заряда, вследствие чего диффузионный ток, создаваемый этими носителями, уменьшается. Дрейфовый же ток, обусловленный концентрациями неосновных носителей заряда по обе стороны перехода, можно считать неизменным (рис. 4.3,б). Однако теперь он будет больше диффузионного тока. Через диод будет протекать ток в обратном направлении.

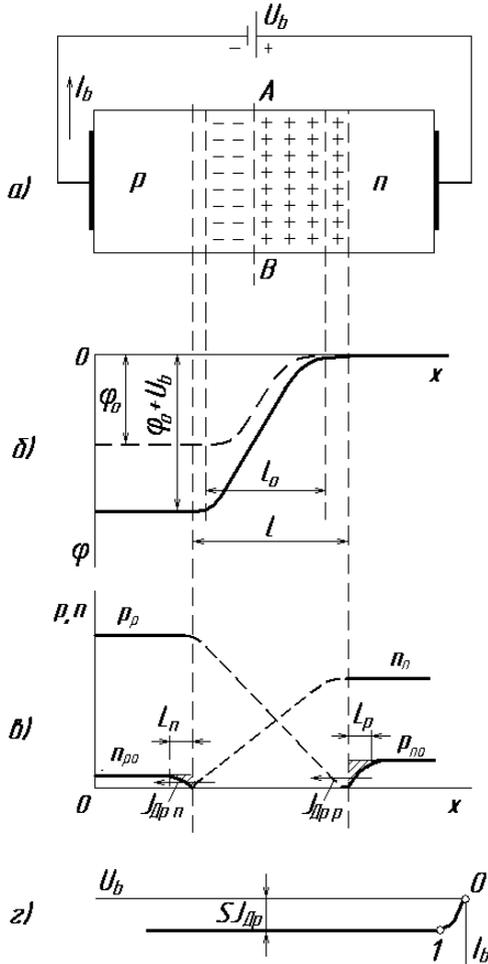


Рис. 4.3. Процессы в  $p$ - $n$ -переходе при обратном смещении

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики диода показана на рис. 4.3,з. При небольших обратных напряжениях (участок 0–1) увели-

чение обратного тока наблюдается за счет уменьшения диффузионной составляющей. При обратном напряжении, соответствующем точке 1, и большем основные носители заряда не способны преодолеть потенциальный барьер, в связи с чем диффузионный ток равен нулю. Этим объясняется отсутствие роста обратного тока при увеличении обратного напряжения (участок характеристики левее точки 1).

Приведенная на рис. 4.3,в диаграмма распределения концентраций соответствует обратным напряжениям, превышающим напряжение в точке 1. Она подтверждает неизменность обратного тока на рассматриваемом участке.

В отсутствие инжекции распределение концентраций носителей заряда в прилегающих к  $p$ - $n$ -переходу слоях характеризуется уменьшением концентраций неосновных носителей вследствие их ухода через  $p$ - $n$ -переход. На границах  $p$ - $n$ -перехода для неосновных носителей заряда действует ускоряющее поле  $p$ - $n$ -перехода, вследствие чего их концентрация там равна нулю. Поскольку в прилегающих к  $p$ - $n$ -переходу слоях полупроводник должен оставаться электрически нейтральным, уменьшение в них концентрации неосновных носителей заряда вызывает аналогичное уменьшение концентрации основных носителей заряда. Однако ввиду существенно большей концентрации основных носителей заряда это снижение слабо отражается на их значениях (на рис. 4.3,в не показано).

Составляющие дрейфового тока создаются неосновными носителями заряда (дырками и электронами), диффундирующими к границам  $p$ - $n$ -перехода из прилегающих к ним слоев. Они определяются по градиентам концентрации неосновных носителей заряда на границах  $p$ - $n$ -перехода, т. е. из условия их диффузии в направлении перехода, и не зависят от приложенного напряжения  $U_b$ .

Обратный ток, создаваемый неосновными носителями заряда, зависит от их концентраций в  $p$ - и  $n$ -слоях, а также от рабочей поверхности переходов. Этим объясняется то, что в диодах, имеющих большую площадь  $p$ - $n$ -перехода, обратный ток больше, чем в маломощных. Поскольку концентрация неосновных носителей заряда является функцией температуры кристалла, обратный ток диода также зависит от температуры. По этой причине обратный ток иногда называют тепловым. Увеличение обратного тока с ростом температуры подчиняется примерно экспоненциальному закону.

Как известно, концентрация неосновных носителей заряда уменьшается с ростом ширины запрещенной зоны на энергетической диаграмме полупроводника. Ширина запрещенной зоны в кремнии (1,12 эВ) больше, чем в германии (0,72 эВ). В силу этого обратный ток в кремниевых диодах на несколько порядков меньше, чем в германиевых, и кремниевые диоды допускают эксплуатацию при более высокой температуре полупроводниковой структуры.

### *Статическое и динамическое сопротивление диода*

Полупроводниковый диод имеет нелинейную вольт-амперную характеристику. Если к нелинейному элементу приложить постоянное напряжение, то его состояние будет характеризоваться статическими параметрами: напряжением, током и сопротивлением. Отношение напряжения на диоде к соответствующему току, протекающему через него,  $R_{cm} = \frac{U}{I}$ .

Совокупность значений тока и напряжения в нелинейном элементе определяет статический режим, т. е. режим покоя, или координаты рабочей точки нелинейного элемента.

Положение рабочей точки определяет в дальнейшем работу нелинейного элемента в динамическом режиме, когда к нему будет приложен какой-либо изменяющийся сигнал.

Если сигнал достаточно мал, так что рабочая точка перемещается незначительно, то можно говорить о динамическом сопротивлении, характеризующем нелинейный элемент. Оно равно отношению малых приращений  $\Delta U$  напряжения к току  $\Delta I$  в окрестности рабочей точки:

$$R_o = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

На ВАХ нелинейного элемента сопротивление определяет наклон касательной в рабочей точке. Разные положения рабочей точки характеризуют различную величину динамического сопротивления.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с методическими рекомендациями по выполнению данной работы.
2. Изучить теоретические сведения об электрофизических явлениях в электронно-дырочных переходах, свойствах и параметрах полупроводниковых выпрямительных диодов [1–4].

3. Подготовить формуляр отчета по лабораторной работе.
4. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и подготовить его к работе.
5. Снять прямые ветви ВАХ кремниевого и германиевого диодов.
6. Снять обратные ветви ВАХ этих же диодов.
7. Построить графики полученных ВАХ.
8. Определить величины порогового напряжения, напряжения пробоя и обратного тока.
9. Рассчитать по ВАХ зависимости статического  $R_c$  и динамического  $R_d$  сопротивлений от тока диода.
10. Определить по справочнику параметры диодов и построить схемы замещения.
11. Сравнить параметры исследованных диодов со справочными данными.
12. Для цепи, состоящей из последовательно соединенных источника напряжения с величиной электродвижущей силы (ЭДС), равной  $E_0$ , нагрузочного резистора  $R_0 = 1 \text{ кОм}$  и диода, рассчитать изменение коэффициента  $\eta$  полезного действия (КПД) такой цепи при изменении  $E$  в диапазоне  $\pm 50\%$  от величины  $E_0$ . Ток диода при  $E = E_0$  принять равным 2 мА. Сравнить полученные зависимости для германиевого и кремниевого диодов и объяснить их.
13. Для цепи по п. 12 при  $E = E_0$  рассчитать и построить графики зависимостей величины  $\eta$  цепи от сопротивления резистора  $R$  в диапазоне от 500 Ом до 1,5 кОм.
14. Закончить оформление отчета и сделать выводы о степени соответствия исследованных диодов техническим условиям, сравнить свойства германиевого и кремниевого диодов и объяснить их отличия.
15. Защитить отчет.

### **Методические рекомендации**

1. При изучении теоретического материала обратить внимание на свойства полупроводников и электронно-дырочных переходов, связанных с различной шириной запрещенной зоны у разных полупроводниковых материалов. Повторить графоаналитические методы расчета режимов нелинейных цепей, а также условные обозначения элементов в электрических цепях и их буквенные обозначения по действующим ГОСТам.

2. Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде 87Л-01 «ЛУЧ». При выполнении экспериментальной части лабораторной работы необходимо использовать сменный планшет № 1. Обеспечение эксперимента: 1) генератор тока (ГТ 0-10 мА) и генератор напряжения (ГН 30-100 В), находящиеся на нижней панели стенда; 2) мультиметр в режиме миллиамперметра (АВМ1), мультиметр в режиме вольтметра (АВМ2), находящиеся на левой и правой панелях стенда; 3) кремниевый диод; 4) германиевый диод; 5) соединительные провода.

Следует обратить внимание, что конечное значение шкал приборов мультиметров соответствует численному значению положения переключателя диапазонов каждого прибора.

Определить и записать марки исследуемых приборов.

3. Прямая ветвь ВАХ снимается по схеме, приведенной на левой части планшета (рис. 4.4), обратная ветвь – по схеме на правой части. Для точного получения результатов при малых значениях измеряемых величин необходимо устанавливать переключатели приборов на как можно меньшие диапазоны измерения, не допуская тем не менее при этом зашкаливания показаний приборов.

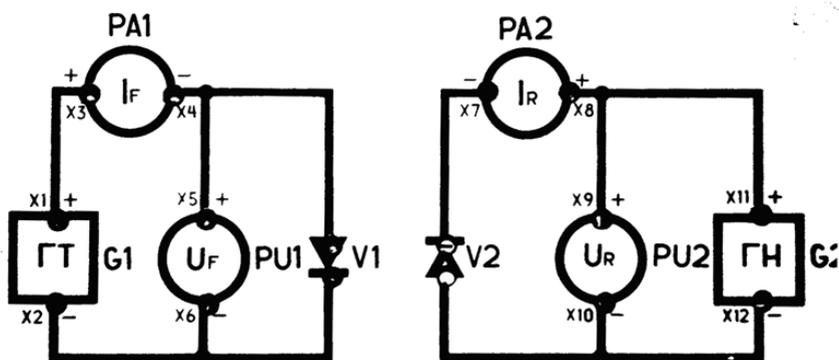


Рис. 4.4. Внешний вид планшета для снятия характеристик

4. При снятии прямых ветвей ВАХ необходимо обратить внимание на полярности источников и приборов, указанные на левой схеме планшета (рис. 4.4) и собрать схему в строгом соответствии с этими полярностями. Мультиметр АВМ1 перевести в положение «20 мА». Переключатель АВМ2 в положение «2 В». Подключить стенд к сети

220 В, 50 Гц. Установить рукоятки ГТ «ГРУБО» и «ТОЧНО» в крайнее левое положение.

После проверки собранной схемы преподавателем включить стенд, переключить клавишу в положение «I». При этом должна загореться сигнальная лампочка. Вращая рукоятки «ГРУБО» и «ТОЧНО» генератора тока, снять ВАХ по показаниям приборов АВМ1 и АВМ2 в 10–12 точках, занося очередные значения приборов в таблицу. *Следует обратить внимание*, что точки за счет нелинейности характеристик следует снимать так, чтобы их *распределение* на кривой было *близким к равномерному*. Максимальное значение задаваемого тока – 10 мА. После замены диода указанные действия повторить.

5. При снятии обратных ветвей ВАХ необходимо собрать схему на правой части планшета стенда, соблюдая указанные на ней полярности приборов и источников. Мультиметр АВМ1 перевести в положение «2 мА». Мультиметр АВМ2 перевести в положение «200 В». Установить рукоятки ГТ «ГРУБО» и «ТОЧНО» в крайнее левое положение.

6. После проверки собранной схемы преподавателем включить стенд, поставив тумблер питания в положение «СЕТЬ». При этом должна загореться сигнальная лампочка. Вращая рукоятку генератора напряжения «ГН 30–100 В», снять показания приборов АВМ1,2 в 10–12 точках, занося показания приборов в таблицу. Максимальное задаваемое напряжение – 100 В. Отключить стенд тумблером питания. Построить в первом приближении черновые графики полученных ВАХ и показать их преподавателю. Разобрать схему. Сдать соединительные провода и сменные элементы.

7. Построить точные графики полученных ВАХ. Поскольку масштабы токов и напряжений на осях графиков прямых и обратных ветвей ВАХ различны, то рекомендуется прямые и обратные ветви ВАХ строить на отдельных графиках.

8. При оформлении отчета руководствоваться требованиями ГОСТ 7.32-89 «Отчет о научно-исследовательской работе» и правилами оформления лабораторных работ на кафедре «Промышленная электроника».

### **Содержание отчета**

Отчет должен включать следующие разделы:

– цель и программа работ\$

- описание методики, принципиальную электрическую схему для определения ВАХ диодов с приведением всех используемых приборов, разъемов и их буквенных обозначений, а также таблицы со значениями экспериментальных данных;
- графики ВАХ диодов с определенными графически пороговыми напряжениями и напряжениями пробоя;
- расчет зависимостей  $R_c$  и  $R_d$  от тока диодов, графики этих зависимостей и схемы замещения диодов для номинального тока;
- справочные данные исследуемых диодов и их эскизы с указанием названия электродов;
- расчет КПД цепи по п. 12 и 13 программы работы графоаналитическим методом;
- выводы по работе;
- список литературы, использованной при проведении работы.

### **Вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы**

1. В чем заключается цель лабораторной работы?
2. Какие приборы используются при выполнении лабораторной работы?
3. Какова последовательность действий для снятия прямой ветви ВАХ диода?
4. Какова последовательность действий для снятия обратной ветви ВАХ диода?
5. Какие пределы измерения выставляются на приборах при определении прямой и обратной ветвей ВАХ диода?
6. Какой максимальный ток выставляется при определении прямой ветви ВАХ диодов и какое максимальное напряжение при определении обратной ветви ВАХ диодов?

### **Вопросы для защиты отчета по лабораторной работе**

1. В чем заключается принцип действия  $p$ - $n$ -перехода и особенности физических процессов в нем при различных смещениях?
2. Какова причина возникновения обратного тока  $p$ - $n$ -перехода и диода на его основе?
3. Чем различаются ВАХ германиевого и кремниевого диодов и почему?
4. Чем можно объяснить различия ВАХ идеализированного и реального диодов?
5. Как и почему изменяются характеристические сопротивления диодов?

6. Каковы области применения диодов и технологии их изготовления?
7. В чем заключаются методики проведения экспериментальной и расчетной частей лабораторной работы?
8. Какими параметрами характеризуются выпрямительные диоды?
9. Как диоды маркируются и обозначаются в схемах электрических цепей?
10. Каковы схемы замещения диодов?

### **Рекомендуемая литература**

1. Миловзоров, О.В. Электроника : учеб. для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 2-е изд. перераб. – М. : Высш. шк., 2005. – 288 с.
2. Электронные приборы : учеб. для вузов / В.Н. Дулин [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – С. 12–82, 97–113.
3. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982.
4. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – С. 19–50.
5. Овечкин, Ю.А. Полупроводниковые приборы / Ю.А. Овечкин. – М. : Высш. шк., 1986. – С. 8–48.

## **Лабораторная работа 2**

### **Определение свойств, параметров, вольт-амперных характеристик кремниевого стабилитрона и их анализ**

*Цели работы:* достичь глубокого и прочного понимания свойств и параметров полупроводникового кремниевого стабилитрона, приобрести навыки экспериментального определения его вольт-амперных характеристик и их использования.

*Задачи работы:*

- изучить теоретический материал по полупроводниковым кремниевым стабилитронам;
- выполнить экспериментальную часть работы в соответствии с программой и обработать результаты экспериментов;
- по результатам проведенных работ оформить отчет и защитить его.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с методическими рекомендациями по выполнению данной работы.

- Изучить теоретические сведения по электрофизическим явлениям в кремниевых полупроводниковых стабилитронах, свойствам и параметрам полупроводниковых кремниевых стабилитронов [1–4].
- Подготовить формуляр отчета по лабораторной работе.
- Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и подготовить его к работе.
- Снять прямые ветви ВАХ кремниевого стабилитрона.
- Снять его обратные ветви ВАХ.
- Построить графики полученных ВАХ.
- Определить величины порогового напряжения, напряжения стабилизации и обратного тока.
- Рассчитать по ВАХ зависимости статического  $R_c$  и динамического  $R_d$  сопротивлений от тока диода.
- Определить по справочнику параметры стабилитрона и для номинального тока построить схемы замещения.
- Сравнить параметры исследованных диодов со справочными данными.
- Для простейшего параметрического стабилизатора, состоящего из последовательно соединенных источника напряжения с величиной электродвижущей силы (ЭДС), равной  $E_0$ , нагрузочного резистора  $R_0 = 1 \text{ кОм}$  и исследованного стабилитрона, рассчитать величины коэффициентов стабилизации такого параметрического стабилизатора при изменении  $E$  в диапазоне  $\pm 50\%$  от величины  $E_0$ . Ток стабилитрона при  $E = E_0$  принять равным среднему току на рабочем участке полученной в эксперименте ВАХ.
- Для цепи по п. 12 в зависимости от  $E$  построить графики коэффициента стабилизации.
- Закончить оформление отчета и сделать выводы о степени соответствия исследованного стабилитрона техническим условиям.
- Защитить отчет.

### **Методические рекомендации**

1. При изучении теоретического материала обратить внимание на свойства полупроводникового кремниевого стабилитрона, особенности его ВАХ и методики экспериментального определения ВАХ на рабочем участке. Повторить графо-аналитические методы расчета режимов не-

линейных цепей, а также условные обозначения элементов в электрических цепях и их буквенные обозначения по действующим ГОСТам.

2. Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. При выполнении экспериментальной части лабораторной работы необходимо использовать сменный планшет №2 (рис. 4.5). Обеспечение эксперимента: 1) генератор тока ( $\Gamma\text{T}$  0–10 мА) и генератор напряжения ( $\Gamma\text{H}2$  0,5–15 В), находящиеся на нижней панели стенда; 2) мультиметр в режиме миллиамперметра (АВМ2), мультиметр в режиме вольтметра (АВМ1), находящиеся на левой и правой панелях стенда; 3) кремниевый стабилитрон (образец выдает преподаватель); 4) соединительные провода.

Конечное значение диапазона приборов соответствует численному значению, на которое указывает рукоятка переключателя диапазонов каждого прибора.

3. Прямая ветвь ВАХ снимается по схеме, приведенной на левой части планшета, обратная ветвь – по схеме на правой части. Для точного получения результатов при малых значениях измеряемых величин необходимо устанавливать переключатели приборов на как можно меньшие диапазоны измерения, не допуская тем не менее при этом переполнения диапазона приборов.

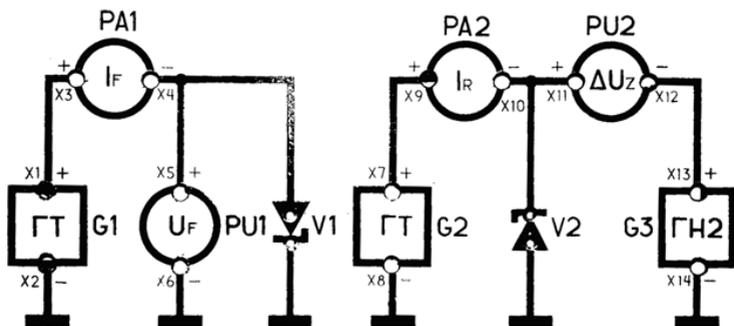


Рис. 4.5. Внешний вид планшета для снятия характеристик стабилитронов

4. При снятии прямых ветвей ВАХ необходимо обратить внимание на полярности источников и приборов, указанные на левой схеме планшета, и собрать схему в строгом соответствии с этими полярностями. Переключатель АВМ1 перевести в положение «2 В». Переключатель АВМ2 –

в положение «20 мА». Подключить стенд к сети 220 В, 50 Гц. Установить рукоятки ГТ «ГРУБО» и «ТОЧНО» в крайнее левое положение.

5. После проверки собранной схемы преподавателем включить стенд, поставить тумблер питания в положение «СЕТЬ». При этом должна загореться сигнальная лампочка. Вращая рукоятки «ГРУБО» и «ТОЧНО» генератора тока, снять показания приборов АВМ1 и АВМ2 в 10–12 точках. *Следует обратить внимание*, что точки за счет нелинейности характеристик следует снимать так, чтобы их *распределение* на кривой было *близким к равномерному*. Отключить стенд от сети, а полученные значения токов и напряжений занести в таблицу.

6. При снятии обратных ветвей ВАХ необходимо собрать схему на правой части планшета стенда, соблюдая указанные на ней полярности приборов и источников. Переключатель АВМ1 перевести в положение «20 В», переключатель АВМ2 в положение «20 мА». Гнезда Х13 и Х14 (место подключения генератора ГН2) закоротить проводником. Установить рукоятки ГТ и ГН2 «ГРУБО» и «ТОЧНО» в крайнее левое положение.

7. После проверки собранной схемы лаборантом включить стенд переключателем питания (положение «I»). При этом должна загореться сигнальная лампочка. Вращая рукоятки генератора тока «ГРУБО» и «ТОЧНО», снять показания приборов АВМ1 и АВМ2 в 10–12 точках в диапазоне от 0 до 1 мА. *Следует обратить внимание*, что точки за счет нелинейности характеристик следует снимать так, чтобы их *распределение* на кривой было *близким к равномерному*.

8. В зависимости от типа стабилизатора дальнейший эксперимент можно проводить по одной из следующих методик.

*Если увеличение тока от 1 до 10 мА приводит к заметному изменению напряжения* (превышающего погрешность вольтметра), то увеличивая ток от 1 до 10 мА с помощью рукояток генератора тока ГТ, необходимо снимать показания приборов АВМ1 и АВМ2 с интервалом по току 1 мА на рабочем участке ВАХ исследуемого стабилизатора. Занести в таблицу полученные значения токов и напряжений. Далее отключить стенд тумблером питания. Построить в первом приближении черновые графики полученных ВАХ и показать преподавателю.

*Если увеличение тока от 1 до 10 мА приводит к незаметному изменению напряжения* (сравнимому с погрешностью вольтметра) на АВМ1

при включенном минимально возможном диапазоном измерения напряжения, то в схему необходимо подключить генератор ГН2 и при установленном значении обратного тока 1 мА, вращая рукоятки «ГРУ-БО» и «ТОЧНО» генератора напряжения ГН2 (0,5–15 В), установить вольтметр АВМ1 на нулевое показание. Переключая последовательно по одной ступени переключатель АВМ1 с диапазона 20 В до диапазона 200 мВ, необходимо устанавливать АВМ1 на нулевое показание с помощью рукояток ГН2. Таким образом, можно, не допуская зашкаливания прибора, установить максимальную чувствительность измерения приращения напряжения в этом эксперименте.

Увеличивая ток от 1 до 10 мА с помощью рукояток генератора тока ГТ, снимать показания приборов АВМ1 и АВМ2 с интервалом по току 1 мА на рабочем участке ВАХ исследуемого стабилизатора. Занести в таблицу полученные значения тока и приращения напряжения. Отключить стенд тумблером питания. Построить в первом приближении черновые графики полученных ВАХ и показать их преподавателю. Разобрать схему. Сдать соединительные провода и сменные элементы лаборанту.

9. Построить точные графики полученных ВАХ. Поскольку масштабы токов и напряжений на осях графиков прямых и обратных ветвей ВАХ различны, то рекомендуется прямые и обратные ветви ВАХ строить на отдельных графиках, причем на отдельном графике необходимо отобразить рабочий участок ВАХ рабочего участка стабилизатора в виде графика зависимости приращения напряжения от тока на этом участке (участок начинается с тока 1 мА).

10. При оформлении отчета руководствоваться требованиями ГОСТ 7.32-89 «Отчет о научно-исследовательской работе» и правилами оформления лабораторных работ на кафедре «Промышленная электроника».

### **Содержание отчета**

Отчет должен включать следующие разделы:

- цель и программу работ;
- описание методики принципиальной электрической схемы для определения ВАХ стабилизатора с приведением всех используемых приборов, разъемов и их буквенных обозначений, а также таблиц со значениями экспериментальных данных;

- графики ВАХ стабилитрона с определенными графически пороговыми напряжениями и напряжениями и токами стабилизации;
- расчет зависимостей  $R_c$  и  $R_d$  от тока стабилитрона, графики этих зависимостей и схемы замещения стабилитрона для номинального тока;
- справочные данные исследуемого стабилитрона и эскизы с указанием названия электродов;
- расчет коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора по п. 12 программы работы графо-аналитическим методом;
- выводы по работе;
- список литературы, использованной при проведении работы.

### **Вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы**

1. В чем заключается цель лабораторной работы?
2. Какие приборы используются при выполнении лабораторной работы?
3. Как определяется прямая ветвь ВАХ стабилитрона?
4. Как определяется обратная ветвь ВАХ стабилитрона?
5. Какие пределы измерения выставляются на приборах при определении прямой и обратной ветвей ВАХ диода?
6. Какой максимальный ток выставляется при определении прямой ветви ВАХ диодов и какова методика определения обратной ветви ВАХ стабилитрона?

### **Вопросы для защиты лабораторной работы**

1. В чем заключается принцип действия стабилитрона и особенности физических процессов в нем при различных смещениях?
2. Какова причина возникновения участка стабилизации напряжения на обратной ветви ВАХ стабилитрона?
3. Чем различаются ВАХ германиевого, кремниевого диодов и кремниевого стабилитрона?
4. Как и почему изменяются характеристические сопротивления стабилитрона?
5. Каковы области применения стабилитронов и технологии их изготовления?
6. В чем заключаются методики проведения экспериментальной и расчетной частей лабораторной работы?
7. Какими параметрами характеризуются кремниевые стабилитроны?

8. Как стабилитроны маркируются и обозначаются в схемах электрических цепей?
9. Каковы схемы замещения диодов?
10. Что такое температурный коэффициент стабилизации?
11. Каковы способы повышения температурной стабильности параметров стабилитронов?

### **Рекомендуемая литература**

1. Миловзоров, О.В. Электроника : учеб. для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 2-е изд. перераб. – М. : Высш. шк., 2005. – 288 с.
2. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982.
3. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М. : Энергия, 1973. – 608 с.
4. Микроэлектроника : учеб. пособие для вузов / под ред. Л.А. Коледова. – Кн. 1. Физические основы функционирования изделий микроэлектроники / О.В. Митрофанов, Б.В. Смирнов, Л.А. Коледов. – М. : Высш. шк., 1987. – 168 с.

### **Лабораторная работа 3** **Исследование статического и динамического режимов работы биполярного транзистора**

*Цели работы:* получить знания и приобрести навыки исследования биполярного транзистора в статическом и рабочем режимах, экспериментального получения его основных характеристик и расчета параметров.

*Задачи работы:*

- изучить теоретический материал по биполярным транзисторам;
- выполнить экспериментальную часть работы в соответствии с программой и обработать результаты экспериментов;
- по результатам проведенных работ оформить отчет и защитить его.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с теорией и методом исследования характеристик и параметров транзистора с общим эмиттером, схемой лабораторной установки, назначением переключателей и измерительных приборов.

2. Исследовать статический режим работы транзистора:

- 1) снять семейство выходных статических характеристик;
- 2) снять семейство входных статических характеристик.
3. Исследовать динамический режим работы транзистора при различных значениях сопротивления  $R_k$  в цепи коллектора.
4. Вычислить статический коэффициент усиления по току  $\beta = I_k/I_B$  и построить зависимость  $\beta = f(I_k)$ .
5. Вычислить  $h$ -параметры транзистора.
6. Используя  $h$ -параметры, вычислить коэффициенты усиления транзистора по току  $K_i$ , напряжению  $K_u$  и входное сопротивление  $R_{вх}$ .

### Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор представляет собой трёхслойную структуру  $p$ - $n$ - $p$ - или  $n$ - $p$ - $n$ -типов с двумя электронно-дырочными переходами. Он служит для усиления, генерации и коммутации электрических сигналов. Структурно биполярный транзистор содержит три области с различными типами проводимости  $n$ - $p$ - $n$  или  $p$ - $n$ - $p$ , которые называются соответственно *эмиттером* (Э), *базой* (Б) и *коллектором* (К).  $P$ - $n$ -переход между эмиттером и базой называют *эмиттерным*, между коллектором и базой – *коллекторным*. Взаимодействие между переходами обеспечивается благодаря тому, что расстояние между ними (толщина области базы) много меньше диффузионной длины неосновных носителей в базе.

На условном графическом изображении транзисторов  $p$ - $n$ - $p$ - и  $n$ - $p$ - $n$ -типов (рис. 4.6) стрелка показывает условное (от плюса к минусу) направление тока в проводе эмиттера при прямом напряжении на эмиттерном переходе.

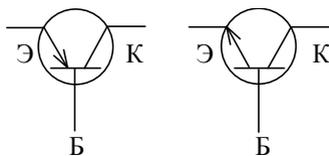


Рис. 4.6. Условное графическое изображение транзистора

Существует три основные схемы включения транзистора: схема с общим эмиттером ОЭ, с общей базой ОБ и общим коллектором ОК.

Если к эмиттерному переходу подключить источник ЭДС  $E_э$  в прямом направлении, а к коллекторному источник –  $E_к$  в обратном, то такой режим работы транзистора называется *активным*. В этом случае

сопротивление эмиттерного перехода мало и для получения тока в рабочем диапазоне в этом переходе достаточно напряжения  $E_э$  в десятые доли вольта. Сопротивление коллекторного перехода велико, поэтому напряжение  $E_к$  обычно составляет единицы или десятки вольт. Напряжения между электродами транзистора связаны зависимостью

$$U_{кэ} = U_{кб} + U_{бэ}. \quad (4.1)$$

При работе транзистора в активном режиме обычно  $U_{бэ} \ll U_{кб}$  и, следовательно,  $U_{кэ} \approx U_{кб}$ .

Рассмотрим физические процессы в активном режиме, протекающие в транзисторе  $p-n-p$ -типа, включенного по схеме с ОБ (рис. 4.7).

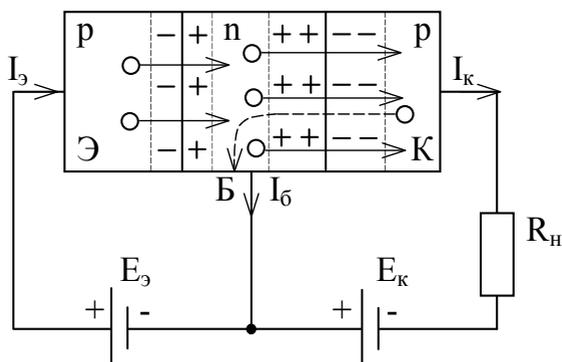


Рис. 4.7. Структура  $p-n-p$  транзистора, включенного по схеме с ОБ

При увеличении прямого входного напряжения  $U_{бэ}$  понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и, соответственно, возрастает ток через этот переход – ток эмиттера  $I_э$ . Дырки, инжектированные из эмиттера в базу, благодаря диффузии проникают сквозь базу в коллекторный переход. Так как коллекторный переход находится под обратным напряжением, то его электрическое поле способствует продвижению (экстракции) через коллекторный переход дырок, пришедших в базу из эмиттера, т. е. втягивает дырки в область коллекторного перехода, увеличивая ток коллектора  $I_к$ .

Так как толщина базы достаточно мала и концентрация электронов в ней невелика, то лишь небольшая часть дырок рекомбинирует в базе с электронами, образуя ток базы  $I_б$ . Поскольку ток коллектора получается меньше тока эмиттера, то в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B. \quad (4.2)$$

При изменении входного напряжения в такой схеме на  $\Delta U_{BX} = \Delta I_{\mathcal{E}} \times r_{\mathcal{E}B}$  ток эмиттера изменится на величину  $\Delta I_{\mathcal{E}}$ , вызывая изменения коллекторного тока на  $\Delta I_K$  и выходного напряжения на  $\Delta U_{ВВХ} = \Delta I_K \times R_H$ . Так что коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{\Delta U_{ВВХ}}{\Delta U_{BX}} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}} \cdot \frac{R_H}{r_{\mathcal{E}B}} = \alpha \cdot \frac{R_H}{r_{\mathcal{E}B}}. \quad (4.3)$$

Поскольку коэффициент усиления по току

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}}} \approx I_K / I_{\mathcal{E}} = 0,9 \div 0,995,$$

а  $R_H \gg r_{\mathcal{E}B}$ , то  $K_U \gg 1$ .

Если учесть, что  $I_K \approx I_{\mathcal{E}}$ , то коэффициент усиления по мощности для схемы с ОБ  $K_P = \frac{R_H}{r_{\mathcal{E}B}} \cdot \alpha^2 > 1$ . То есть схема ОБ обеспечивает усиление по напряжению, мощности и не усиливает по току ( $\alpha < 1$ ).

Схема с общим эмиттером (ОЭ) усиливает сигнал по напряжению, току и мощности.

Коэффициент передачи по току этой схемы

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{\mathcal{E}} - \Delta I_K} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

В схеме с общим коллектором (ОК) коэффициент передачи по току  $\gamma = \frac{\Delta I_{\mathcal{E}}}{\Delta I_B} \gg 1$ ,  $U_{ВВХ} < U_{BX}$ , а  $K_U < 1$ , имеем усиление по току, что позволяет использовать такую схему для согласования с низкоомной нагрузкой ( $Z_{ВВХ} \ll Z_{ВХ}$ ).

Следует отметить зависимость коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  от тока  $I_{\mathcal{E}}$  ( $I_K$ ). При малых значениях тока  $I_{\mathcal{E}}$  сказывается рекомбинация дырок в базе, приводящая к уменьшению  $I_K$  и коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . При значительном токе  $I_{\mathcal{E}}$  база насыщается носителями зарядов, выходной ток не увеличивается, поэтому  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  уменьшаются. Таким образом,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  имеют экстремальный характер зависимости от  $I_{\mathcal{E}}$  ( $I_K$ ).

На режим работы биполярного транзистора влияет обратный (тепловой) ток  $I_{КБ0}$  коллекторного перехода, экспоненциально увеличивающийся с увеличением температуры и не зависящий от  $U_K$  (рис. 4.7). Наибольшее влияние теплового тока сказывается в схеме с ОЭ, для которой с учетом тока  $I_{КБ0}$  ток  $I_K = \beta \cdot I_B + (1 + \beta)I_{КБ0} = \beta \cdot I_B + I_{КБ0}^*$ .

Для схемы с ОБ с учетом тока  $I_{КБ0}$  ток  $I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{КБ0}$ .

Для малых сигналов свойства транзистора определяются четырьмя параметрами, вывод которых основан на замене транзистора активным линейным четырехполюсником (рис. 4.8).

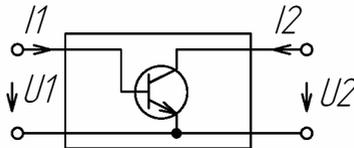


Рис. 4.8. Схема замещения транзистора активным линейным четырехполюсником

В зависимости от схемы включения транзистора величинам  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  будут соответствовать конкретные значения токов и напряжений. Так, для схемы включения с ОЭ:  $U_1 = U_{БЭ}$ ;  $U_2 = U_{КЭ}$ ;  $I_1 = I_Э$ ;  $I_2 = I_К$ .

В системе  $h$ -параметров в качестве независимых переменных принимают входной ток  $I_1$  и выходное напряжение  $U_2$ , а ток  $I_2$  и напряжение  $U_1$  выражают через независимые:  $U_1 = f_1(I_1, U_2)$ ;  $I_2 = f_2(I_1, U_2)$ . Для схемы с ОЭ будем иметь:

$$\begin{cases} \Delta U_{БЭ} = h_{11} \cdot \Delta I_Б + h_{12} \cdot \Delta U_{КЭ}; \\ \Delta I_К = h_{21} \cdot \Delta I_Б + h_{22} \Delta U_{КЭ}. \end{cases} \quad (4.4)$$

Коэффициенты  $h$  находятся по входным и выходным характеристикам транзистора:

$h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б}$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$  ( $\Delta U_{КЭ} = 0$ ) – входное сопротивление при неизменном выходном напряжении;

$h_{12} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}}$  при  $I_Б = \text{const}$  ( $\Delta I_Б = 0$ ) – коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном входном токе;

$h_{21} = \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б}$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$  ( $\Delta U_{КЭ} = 0$ ) – коэффициент передачи тока при неизменном выходном напряжении;

$h_{22} = \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}}$  при  $I_Б = \text{const}$  ( $\Delta I_Б = 0$ ) – выходная проводимость при неизменном входном токе.

Все  $h$ -параметры находятся из режимов холостого хода (х.х.) на выходе и короткого замыкания (к.з.) – на входе по переменной составляющей.

Для схемы с ОЭ  $h$ -параметры находятся из характеристических треугольников, построенных на статических характеристиках  $I_B = f(U_{БЭ})$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$  и  $I_K = f(U_{КЭ})$  при  $I_B = \text{const}$  (рис. 4.9).

Из семейства входных характеристик находим  $h$ -параметры для точки  $B$  (рис. 4.9,а):

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= \left. \frac{du_1}{di_1} \approx \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ0} = \text{const}} & \Delta U_{БЭ} &= U_{БЭ2} - U_{БЭ1} \\
 h_{12} &= \left. \frac{du_1}{du_2} \approx \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ1}} \right|_{I_{Б0} = \text{const}} & \Delta I_B &= I_{Б2} - I_{Б1} \\
 & & \Delta U_{КЭ1} &= U_{КЭ1} - U_{КЭ2}
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

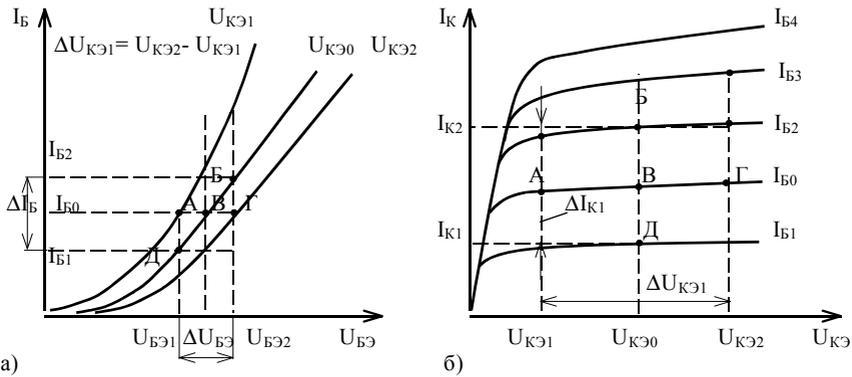


Рис. 4.9. Определение  $h$ -параметров транзистора по его входным (а) и выходным (б) характеристикам для точки  $B$

Из семейства выходных характеристик находим (рис. 4.9,б):

$$\begin{aligned}
 h_{21} &= \left. \frac{di_2}{di_1} \approx \frac{\Delta I_{К1}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ0} = \text{const}} & \Delta I_{К1} &= I_{К2} - I_{К1} \\
 h_{22} &= \left. \frac{di_2}{du_2} \approx \frac{\Delta I_{К1}}{\Delta U_{КЭ1}} \right|_{I_{Б0} = \text{const}} & &
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Все вышерассмотренные характеристики и параметры транзисторов относились к статическому режиму.

В рабочем режиме в цепь коллектора подключается нагрузка, поэтому ток в выходной цепи определяется как изменением входных тока и напряжения, так и напряжением коллектор – эмиттер  $U_{КЭ}$ . В связи с этим  $U_{КЭ} = E_K - I_K \times R_H$ . Это уравнение называется *выходной нагрузочной характеристикой*, которую строят по двум точкам  $A$  и  $B$  (рис. 4.10,б) в координатах  $(I_K, U_{КЭ})$  при заданных  $R_K$  и  $E_K$ . Из режима х.х.:  $I_K = 0$ . Тогда

$U_{кэ} = E_k$  (точка А). Из режима к.з.:  $U_{кэ} = 0$ ,  $I_k = E_k / R_H$  (точка В). Полученная таким образом нагрузочная характеристика АВ (рис. 4.10,б) отражает зависимость тока  $I_k$  коллектора от изменяющихся тока базы  $I_B$  и находящегося с ним в зависимости напряжения на коллекторе  $U_{кэ}$  при условиях  $E_k = \text{const}$  и  $R_H = \text{const}$ . Точки пересечения линии АВ со статическими выходными характеристиками определяют значения тока коллектора  $I_k$  при заданном токе  $I_B$  базы. Так, при  $I_B = I_{B2}$  ток  $I_k = I_{k2}$ , а  $I_{k2} \times R_k = E_k - U_{кэ2}$ .

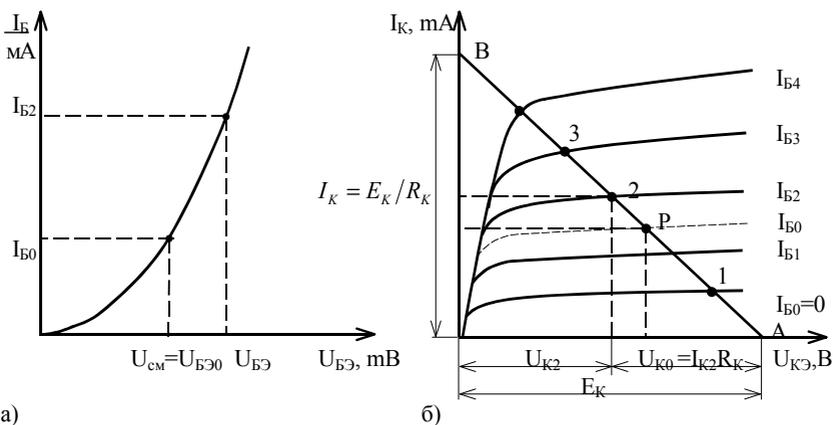


Рис. 4.10. Входная (а) и выходная (б) нагрузочные характеристики транзистора

Входная нагрузочная характеристика транзистора связывает входное напряжение  $U_{БЭ}$  с входным током  $I_B$  при неизменных  $E_k$  и  $R_H$  (рис. 4.10,а). Для ее построения необходимо произвести ряд действий:

- построить нагрузочную характеристику;
- по точкам пересечения линии нагрузки АВ со статическими характеристиками определить  $I_B$  и  $U_{кэ}$ ;
- перенести их на семейство статических входных характеристик;
- полученные точки соединить плавной кривой.

При напряжениях  $U_{кэ} > 0,5$  В динамическая входная характеристика практически совпадает со статической.

На динамической выходной характеристике задается точка покоя  $P$  (рис. 4.10,б) транзистора. При отсутствии входного сигнала ее координаты  $(I_{к0}, U_{к0})$  определяются параметрами коллекторной цепи, зависящими от сопротивления нагрузки, а также цепями смещения,

устанавливаемыми во входную цепь (на рисунках не показаны). Для смещения точки покоя  $P$  изменяют ток  $I_{Б0}$  и напряжение  $U_{БЭ0}$  смещения во входной цепи.

Работа транзистора может происходить в трех режимах (рис. 4.10, б), каждый из которых определяется полярностью напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах:

1) активный режим (1-Б), используемый для усиления и генерации сигналов; его получают, когда эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный – в обратном направлениях;

2) инверсный режим (на рисунке не показан, так как находится в третьем квадранте выходных характеристик), противоположный активному, при этом эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный – в прямом;

3) режим отсечки (А-1) – транзистор заперт; этот режим, используемый для коммутации электрических цепей, получают, когда оба  $p-n$ -перехода смещены в обратном направлении, а в цепи коллектора протекает тепловой (обратный) ток  $I_0$ ;

4) режим насыщения (точка Б); оба перехода смещены в прямом направлении, через транзистор протекает ток насыщения, ограничиваемый только сопротивлением  $R_K$ , а падение напряжения на транзисторе минимальное.

Последние два режима используются для работы транзистора в импульсном переключающем режиме.

Если транзистор представить в виде четырехполюсника (рис. 4.11), то для схемы с ОЭ можно записать:

$$\begin{cases} u_{вх} = h_{11}i_{вх} + h_{12}u_{вых}, \\ i_{вых} = h_{21}i_{вх} + h_{22}u_{вых}. \end{cases} \quad (4.7)$$

где  $u_{вх} = e_{г} - i_{вх}R_{г}$ ;  $u_{вых} = -i_{вых}R_{н}$ .

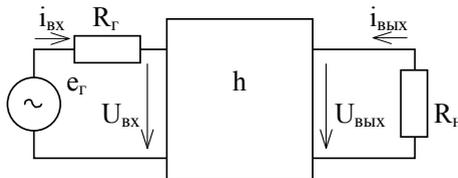


Рис. 4.11. Схема замещения транзистора четырехполюсником

Полученные уравнения позволяют определить коэффициенты усиления по току  $K_i$ , напряжению  $K_u$  и входное сопротивление  $R_{вх}$ :

$$\begin{aligned}
 K_i &= \frac{i_{вых}}{i_{вх}} = \frac{h_{21э}}{1 + h_{22э} \cdot R_H} \\
 K_u &= K_i \cdot \frac{R_H}{R_{вх}} = \frac{h_{21э} \cdot R_H}{h_{11э} + D_{hэ} \cdot R_H}, \\
 R_{вх} &= \frac{u_{вх}}{i_{вх}} = \frac{h_{11э} + D_{hэ} \cdot R_H}{1 + h_{22э} \cdot R_H}
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

где  $D_{hэ} = h_{11э} \cdot h_{22э} - h_{12э} \cdot h_{21э}$ .

### Методические рекомендации

#### Описание лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рис. 4.12. Объектом исследования является транзистор VT  $p-n-p$  или  $n-p-n$  типа, включенный по схеме с общим эмиттером. Элементами схемы также являются сопротивления R1 и R2, с помощью R1 задается режим работы и он также выполняет токоограничительную функцию тока коллектора.

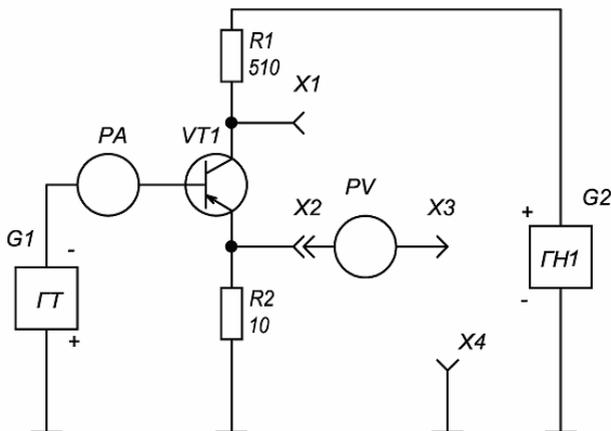


Рис. 4.12. Принципиальная схема исследования семейства ВАХ транзистора ( $p-n-p$  типа) с ОЭ статическим методом

Для исследования транзистора в схеме с ОЭ можно использовать стандартный планшет, предназначенный для исследования усилительного каскада с ОЭ (рис. 4.13). Он содержит достаточное количество

гнезд для того, чтобы собрать исходную схему измерения характеристик транзистора (рис. 4.13).

Снимать характеристики транзистора, учитывая оборудование стенда, можно двумя методами:

- 1) статическим – с помощью мультиметров, измеряющих ток и напряжения на транзисторе;
- 2) автоматизированным – с помощью генератора переменного сигнала (см. п. 2.2.2), задающего изменения одной из переменных семейства характеристик и осциллографа в режиме измерений XY Plot, т. е. характериографа, когда осциллограф строит ВАХ, координаты каждой точки у которых снимаются в виде напряжений одновременно с обоих каналов осциллографа.

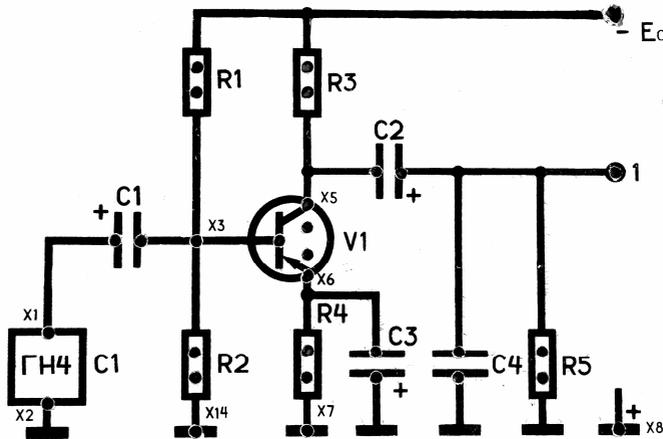


Рис. 4.13. Внешний вид планшета, предназначенного для исследования линейного усилителя каскада в схеме с общим эмиттером

Преимущества второго метода в том, что точки каждой кривой из семейства характеристик (входных или выходных) за счет высокой скорости сканирования генератором снимаются практически при одной температуре переходов транзистора, что является важным условием снятия корректных статических характеристик.

При снятии входных характеристик входной ток базы  $I_b$  в случае статического метода можно задавать генератором ГТ и измерять его мультиметром РА в режиме амперметра (расположен слева стенда), включаемым последовательно с базовой цепью транзистора (рис. 4.12).

В автоматизированном методе ток  $I_B$  нужно задавать переменным генератором напряжения ГФ (рис. 4.14), работающим в однополярном режиме, а также последовательно включаемым с ним резистором  $R1 = 5,1 \text{ кОм}$ , устанавливаемым по месту в гнезда конденсатора С1 на планшете (рис. 4.13). Итоговая схема для снятия входных ВАХ автоматизированным методом приведена на рис. 4.14.

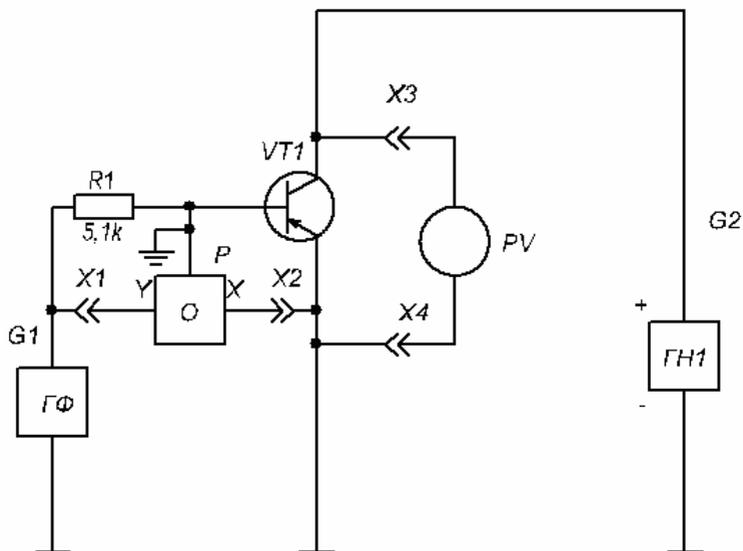


Рис. 4.14. Принципиальная схема исследования семейства входных ВАХ транзистора с ОЭ автоматизированным методом

Выходной ток  $I_k$  ограничивается транзистором VT1 и определяется источником ГН1 (рис. 4.13) при статическом методе или подключенным в те же гнезда генератором ГФ (рис. 4.15) напряжения в случае автоматизированного метода, работающим в однополярном режиме. Измерение этого тока можно произвести косвенным образом, по напряжению на резисторе R2 при статическом методе (рис. 4.12) или на R1 (рис. 4.15) при автоматизированном. В качестве прибора, измеряющего напряжения, можно использовать в режиме постоянного вольтметра мультиметр PV, расположенный справа на стенде, или при автоматизированном методе – осциллограф P. Так как  $I_{\text{э}} = I_k + I_{\text{б}}$ , то  $I_k$  определяется как  $I_k = I_{\text{э}} - I_{\text{б}}$ .

Выходное напряжение  $U_{кэ}$  измеряется правым мультиметром в режиме вольтметра путем перепоключения разъема X3 в X1 (рис. 4.13) при статическом методе или прямым подключением канала осциллографа между коллектором и эмиттером транзистора (рис. 4.15) при автоматизированном методе.

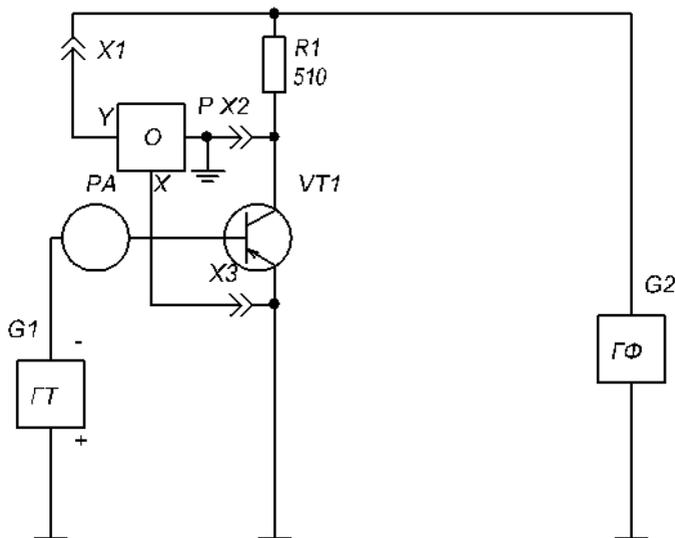


Рис. 4.15. Принципиальная схема исследования семейства выходных ВАХ транзистора с ОЭ автоматизированным методом

### Указания к выполнению работы

Подать питающее напряжение 220 В, 50 Гц на стенд клавишей «Сеть».

**Снятие выходных характеристик  $I_k = f(U_{кэ})$  при  $I_b = const$  транзистора в схеме ОЭ**

- *Статический способ*

Собрать на стенде схему в соответствии с рис. 4.12 (включение для *p-n-p* транзистора). Подключить источник тока ГТ к гнездам X1 и X2 на планшете в соответствии с рис. 4.12 или в обратной полярности для *n-p-n* транзистора, в гнезда конденсатора С1 установить амперметр.

Источник напряжения ГН1 подключить клеммой к гнездам X8, -Ес полярностью, соответствующей рис. 4.12, или в обратной полярности для *n-p-n* транзистора.

С помощью ручки ГТ по показаниям РА установить ток базы  $I_b = 0,050$  мА. Вращая рукоятку потенциометра ГН1 и дискретно изменяя напряжение источника питания от 0 до максимума в соответствии с табл. 4.1, снять зависимость тока  $I_k$  коллектора транзистора от напряжения  $U_{кэ}$  коллектор-эмиттер при  $I_b = \text{const}$  через ток  $I_g$ , переподключая вывод Х3 вольтметра с разъема Х4 на Х1.

Измерение тока  $I_g$  производить косвенным образом, т. е. после измерения напряжения на  $U_{R2}$  его значение определить по формуле

$$I_g = U_{R2} / R2.$$

Произвести аналогичные измерения тока коллектора  $I_g$  при остальных указанных в таблице токах базы, результаты занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Статические характеристики транзистора  $I_g$ , мА

Ток базы $I_b$ , мА	Напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ , В							
	0	0,1	0,2	0,3	1	3	4	5
0,05								
0,10								
0,15								
0,20								

Данные таблицы пересчитать в ток  $I_k$  по формуле

$$I_k = I_g - I_b,$$

где  $I_b$  – текущий ток в базе.

По результатам вычислений заполнить табл. 4.2.

Таблица 4.2

Статические выходные характеристики транзистора  $I_k$ , мА

Ток базы $I_b$ , мА	Напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ , В							
	0	0,1	0,2	0,3	1	3	4	5
0,05								
0,10								
0,15								
0,20								

По данным табл. 4.2 построить выходные статические характеристики.

• *Автоматизированный способ*

Собрать принципиальную схему в соответствии с рис. 4.15. Источник тока ГТ подключить клеммой «—» к гнезду X1 на планшете, а клеммой «+» к гнезду X2 в случае *p-n-p* транзистора и, наоборот, в случае *n-p-n* в гнезда конденсатора C1 установить амперметр. В гнезда R3 установить резистор сопротивлением 510 Ом.

Красный вывод генератора необходимо установить в гнездо -Ес на планшете, черный вывод — в одно из гнезд «⊥». Между гнездами R4 на планшете установить перемычку. Красный вывод первого канала осциллографа — в верхнее гнездо R1 на планшете, красный вывод второго канала осциллографа — в гнездо X6 на планшете. Черный вывод одного из каналов осциллографа установить в гнездо X5 на планшете.

**ВНИМАНИЕ!** Второй черный провод осциллографа оставить свободным, т. е. неподключенным к схеме.

Установить рукоятками ГТ ток  $I_b = 0,05$  мА.

Включить компьютер и загрузить программное обеспечение PC-Lab для работы с осциллографом и генератором. В меню генератора (см. п. 2.2.2) настроить:

- генерируемый сигнал — режим синусоидальных колебаний;
- Frequency = 1000 Гц;
- Offset = -5 В в случае *p-n-p* транзистора или Offset = 5 В в случае *n-p-n*;
- Amplitude = 10 В.

После этого на картинке генератора должен появиться полностью отрицательный в случае *p-n-p* (положительный в случае *n-p-n*) синусоидально пульсирующий сигнал синего цвета с перепадом напряжения 10 В.

Настроить на запись сигналы с обоих каналов осциллографа в соответствии с п. 2.2.3.

Для начала настройки осциллографа можно воспользоваться автонастройкой каждого из каналов — AUTOSET. После получения четких графиков обоих сигналов, занимающих по максимуму область сетки осциллографа, необходимо перевести работу осциллографа в режим XY Plot с помощью меню Math. В этом случае на экране должна появиться ВАХ зависимости напряжения первого канала (ось Y) от напряжения второго канала (ось X), т. е. напряжения на R1 в зависимости от напряжения

на Укэ. Поскольку напряжение на R1 можно пересчитать в ток коллектора  $ik = i_{R1} = U_{R1}/R1$ , то полученная характеристика является выходной характеристикой транзистора при заданном токе  $I_B$ . *Обратить внимание* на то, что направления осей XY могут не совпадать с принятыми и характеристика получится симметрично отраженной относительно них.

Полученный результат необходимо сохранить в виде файла данных через меню File (см. п. 2.2.4) при помощи опций Save DSO Data. В результате получится файл в формате txt, содержащий координаты дискретных точек снятого графика выходной характеристики (напряжения записаны во втором и третьем столбце в файле, в первом записано время). Эти данные при оформлении графиков необходимо дополнительно математически обработать (например, в пакете Excel, MathCad и т. д.), усреднить каждую зависимость напряжения (координаты точки) от времени, затем напряжение с первого канала преобразовать в ток (см. выше), и потом построить зависимость, контролируя четкость линии выходной ВАХ.

Далее последовательно и дискретно изменяя ток  $I_B$ , согласно табл. 4.1 получить оставшиеся характеристики в соответствии с методикой данного пункта.

#### ***Снятие входных характеристик $I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{кэ} = const$***

##### **• Статический способ**

Для транзистора *p-n-p* собрать схему рис. 4.12. Источник тока ГТ подключить клеммой «—» к гнезду X1 на планшете, а клеммой «+» к гнезду X2, в гнезда конденсатора C1 установить амперметр.

Источник напряжения ГН1 подключить клеммой «+» к гнезду X8 на планшете, а клеммой «—» к гнезду -Ес. Установить оставшиеся резисторы в схему. В случае *n-p-n* транзистора полярности источников поменять на противоположные.

Ручкой источника ГТ установить ток базы  $I_b = 0,02$  мА. Изменяя напряжение источника питания ГН1, устанавливать напряжение  $U_{кэ}$  последовательно сначала  $U_{кэ} = 0,1$  В, далее в соответствии с табл. 4.3, измеряя при этом соответствующее значение напряжения базы-эмиттера  $U_{БЭ}$ , далее эти значения необходимо занести в таблицу. Повторить измерения для других токов базы в соответствии с таблицей. Полученные зависимости представляют входные характеристики  $I_B = f(U_{БЭ})$  при  $U_{кэ} = const$ .

**ВНИМАНИЕ!** Снятие точек ВАХ при увеличении  $U_{кэ}$  проводить достаточно быстро, не допуская перегрева транзистора, после увеличения  $U_{кэ}$  до максимального дать транзистору остыть.

Таблица 4.3

Входные статические характеристики транзистора.

Напряжение база-эмиттер  $U_{бэ}$ , мВ

Напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ , В	Ток базы $I_{б}$ , мА					
	0,02	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20
0,1						
1						
3						
4						
5						

По данным табл. 4.3 построить входные статические характеристики.

• *Автоматизированный способ*

Собрать принципиальную схему в соответствии с рис. 4.14.

Красный вывод генератора устанавливать в X1, а его черный вывод в X2 на планшете. Красный вывод первого канала подключить к красному «крокодильчику» генератора, черный в гнездо X3 планшета. Красный вывод второго канала осциллографа подключить в гнездо X6 на планшете.

Источник напряжения ГН1 подключить клеммой «-» к верхней обкладке С3 на планшете, а клеммой «+» в гнездо X5 планшета. В случае *n-p-n* транзистора заменить полярности источников на противоположные.

В левое гнездо С2 и X7 на планшете установить вольтметр. Гнезда R4 закоротить перемычкой.

В гнезда емкости С1 установить резистор 5,1 кОм.

**ВНИМАНИЕ!** Второй черный вывод осциллографа оставить свободным, т. е. неподключенным к схеме.

Установить рукоятками ГН1 напряжение  $U_{кэ} = 0,1$  В.

В меню генератора (см. п. 2.2.2) настроить:

- генерируемый сигнал – режим синусоидальных колебаний;
- Frequency = 1000 Гц;

- Offset = -2,5 В в случае  $p-n-p$  транзистора или Offset = 2,5 В в случае  $n-p-n$ ;
- Amplitude = 5 В.

После этого на картинке должен появиться полностью отрицательный в случае  $p-n-p$  транзистора или положительный в случае  $n-p-n$  транзистора синий синусоидально пульсирующий сигнал с перепадом напряжения 5 В.

Настроить на запись сигналы с обоих каналов осциллографа в соответствии с п. 2.2.3.

Для начала настройки осциллографа можно воспользоваться автонастройкой каждого из каналов – AUTOSET. После получения четких графиков обоих сигналов, занимающих максимум экрана осциллографа, необходимо перевести работу осциллографа в режим XY Plot с помощью меню Math. В этом случае на экране должна появиться ВАХ зависимости напряжения первого канала (ось  $Y$ ) от напряжения второго канала (ось  $X$ ), т. е. напряжения на  $R_1 = 5,1$  кОм в зависимости от напряжения  $U_{БЭ}$ . Поскольку напряжение на  $R_1$  можно пересчитать в ток  $i_{R_1} = U_{R_1}/R_1$ , то полученная характеристика является входной характеристикой транзистора при заданном токе  $I_B$ .

Полученный результат необходимо сохранить в виде файла данных через меню File (см. п. 2.2.4) при помощи опций Save DSO Data. В результате получится файл в формате txt, содержащий координаты дискретных точек снятого графика входной характеристики (напряжения записаны во втором и третьем столбцах в файле, в первом записано время). Эти данные при оформлении графиков следует дополнительно математически обработать (например, в пакете Excel, MathCad и т. д.), усреднить зависимость напряжения (координаты точки) от времени, затем необходимо напряжение с первого канала преобразовать в ток (см. выше), и потом построить зависимость, контролируя четкость линии выходной ВАХ.

Далее последовательно и дискретно изменяя напряжение  $U_{КЭ}$ , по табл. 4.3 получить оставшиеся характеристики в соответствии с методикой данного пункта.

#### ***Снятие динамических характеристик транзистора в схеме с ОЭ***

Собрать установку, как для исследования входных характеристик (рис. 4.12).

Установить на источнике ГН2 напряжение  $E_K = 7 \text{ В}$ , рукояткой ГТ установить входной ток  $I_6 = 0,02 \text{ мА}$ , далее измерить вольтметром  $PV - U_{кэ}, U_{бэ}$ , этим же вольтметром определить  $U_{R2}$  и ток по  $I_э = U_{R2}/R2$ . Прodelать аналогичные действия для других токов  $I_6$ . Данные эксперимента занести в табл. 4.4.

По данным табл. 4.4 на семействе выходных характеристик построить выходные динамические характеристики транзистора для сопротивлений  $R1$  и  $R2$ , на отдельных графиках построить входные нагрузочные характеристики, полученные для  $R1$  и  $R2$ .

Таблица 4.4

Динамические характеристики транзистора

$I_Б, \text{ мА}$		0,04	0,06	0,10	0,15	0,20
$R1 = 510 \text{ Ом}$	$U_{Бэ}, \text{ мВ}$					
	$U_{кэ}, \text{ В}$					
	$I_э, \text{ мА}$					
	$I_к, \text{ мА}$					
$R1 = 1 \text{ кОм}$	$U_{Бэ}, \text{ мВ}$					
	$U_{кэ}, \text{ В}$					
	$I_э, \text{ мА}$					
	$I_к, \text{ мА}$					

По данным измерений (табл. 4.2) вычислить статические коэффициенты усиления по току  $\beta = I_к/I_Б$  для напряжения  $U_{кэ} = 3 \text{ В}$  и  $U_{кэ} = 1 \text{ В}$ , построить эти характеристики  $\beta = f(I_к)$ .

Для статического режима в рабочей точке  $U_{кэ} = 2 \text{ В}$ ,  $I_6 = 0,1 \text{ мА}$  по данным табл. 4.2, 4.3 вычислить  $h$ -параметры исследуемого транзистора по формулам (4.5; 4.6), расчеты должны сопровождаться построениями на графиках статических характеристик. Полученные данные сравнить со справочными.

Используя значения  $h$ -параметров, по формулам (4.8) вычислить коэффициенты усиления по току  $K_i$  и напряжению  $K_u$ , входное сопротивление  $R_{вх}$ , приняв  $R_n = 1 \text{ кОм}$ .

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- наименование, цель и программу работы;

- принципиальную схему лабораторной установки;
- таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
- графики входных и выходных статических и динамических характеристик транзистора;
- график зависимости коэффициента усиления по току  $\beta$  от тока коллектора;
- результаты отдельных измерений и расчетов, не сведенные в таблицы;
- анализы полученных результатов и сравнение их со справочными данными, оформленные в виде выводов по работе.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Объяснить принцип работы транзистора.
2. Пояснить особенности схем включения транзисторов.
3. Как зависят основные коэффициенты передачи и усиления транзистора от токов  $I_{\text{Э}}$  ( $I_{\text{К}}$ )? Почему?
4. Объяснить характер статических характеристик. Для каких целей их используют?
5. Что такое коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , какова взаимосвязь между ними?
6. Что такое обратный ток коллектора?
7. Чем отличается динамический режим работы транзистора от статического?
8. Что такое точка покоя и как она задается?
9. Пояснить особенности режимов работы транзистора.
10. Как определяются основные параметры транзистора в динамическом режиме по известным статическим параметрам?
11. Рассказать, где и для чего используются транзисторы.

### **Рекомендуемая литература**

1. Миловзоров, О.В. Электроника : учеб. для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 2-е изд. перераб. – М. : Высш. шк., 2005. – 288 с.
2. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982.
4. Тугов, Н.М. Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов. – М. : Энергоатомиздат.

5. Расчет электронных схем. Примеры и задачи / Изъюрова Г.И. [и др.]. – М. : Высш. шк., 1987. – С. 65–68.
6. Электронные приборы : учеб. для вузов / В.Н. Дулин [и др.] ; под ред. Г.Г. Шишкина. – М. : Энергоатомиздат, 1989 – С. 172–173.

## **Лабораторная работа 4**

### **Исследование однокаскадного усилителя с емкостной связью**

*Цели работы:* изучить схемы и исследовать характеристики и свойства усилительного каскада, выполненного на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

*Задачи работы:*

- изучить теоретический материал по усилителю в схеме с общим эмиттером (ОЭ);
- выполнить экспериментальную часть работы в соответствии с программой и обработать результаты экспериментов;
- по результатам проведенных работ оформить отчет и защитить его.

#### **Программа работы**

1. Исследовать работу усилительного каскада по постоянному току:
  - 1) установить режим работы, соответствующий классу  $A$ , и измерить напряжения на элементах каскада;
  - 2) рассчитать токи покоя и статический коэффициент усиления транзистора.
2. Исследовать усилительные свойства каскада в области средних частот:
  - 1) снять амплитудную характеристику усилительного каскада;
  - 2) оценить влияние сопротивления коллекторной нагрузки и емкости цепи температурной стабилизации на коэффициент усиления по напряжению.
3. Исследовать частотные свойства усилительного каскада:
  - 1) снять амплитудно-частотные характеристики каскада при различных величинах емкостей разделительного конденсатора, конденсаторов в цепях температурной стабилизации и нагрузки;
  - 2) для одной из характеристик определить полосу пропускания каскада, рассчитать частотные искажения на границах полосы пропускания и сравнить их с экспериментальными данными.

## Краткие теоретические сведения

Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном с общим эмиттером (ОЭ), приведена на рис. 4.16.

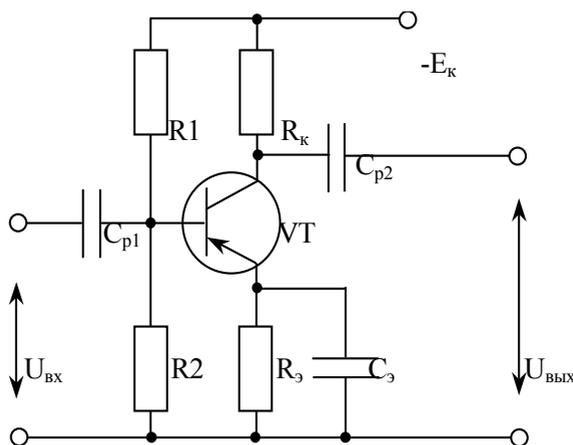


Рис. 4.16. Усилительный каскад с общим эмиттером

Основными элементами являются источник питания  $E_K$ , транзистор  $VT$  и резистор  $R_K$ , являющийся коллекторной нагрузкой транзистора. Транзистор, управляемый током базы, и резистор  $R_K$  обеспечивают формирование переменного выходного напряжения каскада при подаче на него переменного сигнала.

Разделительный конденсатор  $C_{p1}$  предотвращает протекание постоянного тока, созданного источником  $E_K$ , через источник входного сигнала и позволяет обеспечить независимость режима задания рабочей точки транзистора  $VT$  от внутреннего сопротивления источника входного сигнала.

Разделительный конденсатор  $C_{p2}$  не пропускает в цепь нагрузки постоянную составляющую напряжения. В результате выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  каскада является знакопеременным.

Резисторы  $R1$  и  $R2$  задают рабочую точку транзистора, а резистор  $R_3$  осуществляет его температурную стабилизацию. Конденсатор  $C_3$  шунтирует резистор  $R_3$  отрицательной обратной связи, тем самым предотвращая снижение коэффициента усиления каскада.

Принцип работы усилительного каскада заключается в следующем. При  $U_{\text{вх}} = 0$  транзистор находится в состоянии покоя: в цепи его базы течет постоянный ток  $I_{\text{б}0}$ , в цепи коллектора – постоянный ток  $I_{\text{к}0}$ , напряжение на выходе транзистора  $U_{\text{кэ}0}$  также постоянно, ток нагрузки и выходное напряжение каскада равны нулю. Переменное входное напряжение  $U_{\text{вх}}$ , прикладываемое к транзистору, вызывает появление переменной составляющей тока базы  $i_{\text{б}} \sim$ , что приводит к появлению переменной составляющей тока коллектора  $i_{\text{к}} \sim$ . За счет последней на резисторе  $R_{\text{к}}$  создается переменное падение напряжения  $U_{R_{\text{к}}} = R_{\text{к}} \times i_{\text{к}} \sim$ , которое через конденсатор  $C_{\text{п}2}$  передается на выход каскада. В цепи нагрузки появляется переменный ток.

Усилительные свойства каскада зависят от амплитуды и частоты входного сигнала. Влияние амплитуды входного сигнала на амплитуду выходного отражает амплитудная характеристика усилителя. Она снимается при постоянной частоте, соответствующей диапазону средних частот, и синусоидальной форме входного сигнала. Примерный вид амплитудной характеристики показан на рис. 4.17.

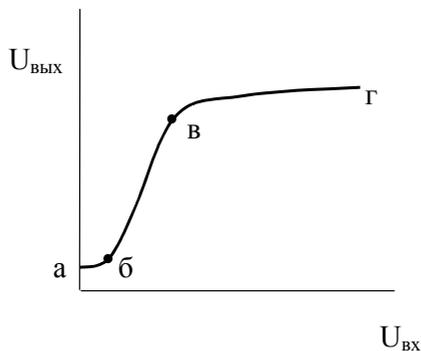


Рис. 4.17. Амплитудная характеристика

На амплитуде выделен рабочий участок  $бв$ , в пределах которого выходной сигнал также имеет синусоидальную форму, а его амплитуда пропорциональна амплитуде входного сигнала. На участке  $аб$  выходной сигнал плохо различим на фоне собственных шумов усилителя. На участке  $вг$  выходной сигнал усилителя несинусоидален, так как режим работы транзистора становится нелинейным, при этом полуволна выходного сигнала ограничивается по уровню. Такое искажение формы

выходного сигнала усилителем называют нелинейным. Причинами нелинейных искажений являются отсечка и насыщение транзистора.

Влияние частоты входного сигнала на амплитуду выходного сигнала отражает *амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)* усилителя. Под АЧХ понимается зависимость модуля коэффициента  $K_U$  усиления по напряжению от частоты синусоидального входного сигнала неизменной амплитуды. Примерный вид АЧХ показан на рис. 4.18 (форма графика приведена при логарифмических масштабах по обоим осям). На амплитуде можно выделить полосу средних частот (участок  $ab$ ), где коэффициент усиления примерно постоянен и равен  $K_{U0}$ , полосу низких частот (участок  $0a$ ) и полосу высоких частот (участок  $b\theta$ ).

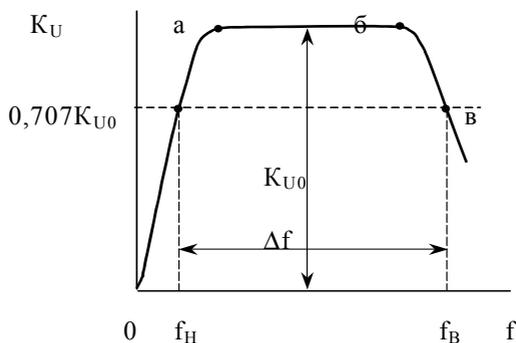


Рис. 4.18. Амплитудно-частотная характеристика

Снижение коэффициента усиления в полосе низких частот обусловлено влиянием конденсаторов  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  и  $C_3$ , а снижение коэффициента усиления в полосе высоких частот обусловлено частотными свойствами транзистора (снижением его коэффициента передачи тока с ростом частоты) и шунтирующим влиянием емкости коллекторного перехода транзистора по отношению к выходной цепи.

Если входной сигнал содержит гармонические составляющие, частоты которых лежат в различных полосах АЧХ усилителя, то они усиливаются по-разному, из-за чего форма выходного сигнала отличается от формы входного. Такие искажения формы выходного сигнала усилителя называют частотными. Количественной характеристикой частотных искажений является *коэффициент частотных искажений  $M$* , определяемый по формуле

$$M(f) = \frac{K_{U0}}{K_U(f)}, \quad (4.9)$$

где  $K_U(f)$  и  $M(f)$  – коэффициенты усиления и частотных искажений на произвольной частоте  $f$ .

Частотные свойства усилителя характеризует также его *полоса пропускания*  $\Delta f$ , лежащая между нижней  $f_n$  и верхней  $f_v$  граничными частотами (рис. 4.18). В качестве последних принимают частоты, на которых коэффициент частотных искажений равен  $\sqrt{2}$ . Значения граничных частот и ширина полосы пропускания зависят от емкостей конденсаторов усилителя и параметров его транзистора.

### **Методические рекомендации**

#### ***Описание лабораторной установки***

Планшет для исследования схемы усилителя с ОЭ и принципиальная схема лабораторной установки представлены на рис. 4.19.

Объектом исследования является усилительный каскад с емкостной связью, собранный на транзисторе VT1 марки МП40 со структурой  $p-n-p$  типа. Цепь из резисторов R1 R2 служит для задания режима транзистора по постоянному току (рабочей точки), элемент R4 обеспечивает температурную стабилизацию режима по постоянному току, C3 шунтирует переменную составляющую, его наличие способствует увеличению коэффициента усиления каскада, резистор R3 является коллекторной нагрузкой, задающей усилительный режим работы по напряжению, конденсатор C1 осуществляет связь каскада с источником входных сигналов, снимаемых с выхода генератора УГ через внешний делитель 1:10 (на рис. 4.19 не показан), а конденсатор C2 – с нагрузкой каскада, представленной в виде резистора R5 и конденсатора C4.

Режим работы усилительного каскада по постоянному току может изменяться с помощью переменного резистора R1.

Для питания каскада используется источник напряжения ГН2. Осциллографом  $O$  измеряются входные и выходные напряжения, частота сигналов, а также контроль за их формой. Измерение напряжений, определяющих режим по постоянному току, производится мультиметром АВМ2.

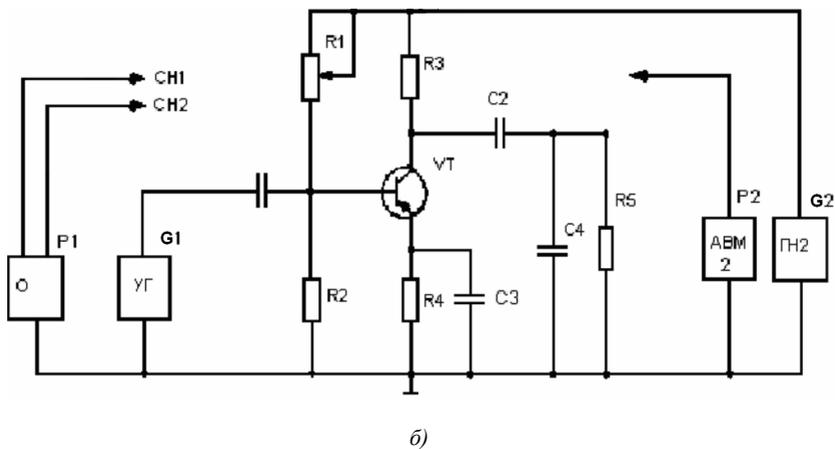
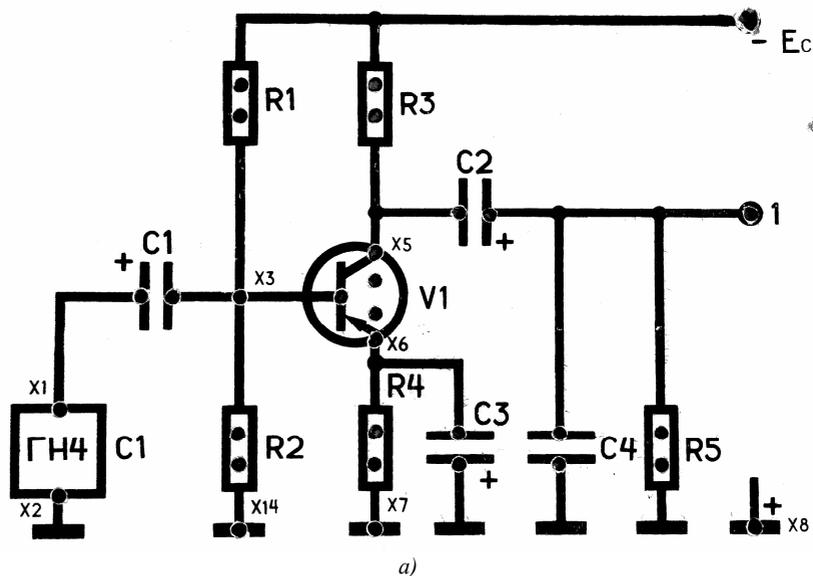


Рис. 4.19. Внешний вид планшета (а) и принципиальная схема (б) лабораторной установки для исследования линейного каскада с общим эмиттером

### Указания к выполнению работы

1. На сменной панели установить элементы исследуемого каскада в соответствии с табл. 4.5.

Номинальные значения элементов схемы

R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, Ом	R5, кОм	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, нФ
10 (переменный)	1,2	1	200	5,1	10	10	50	10

Подключить усилительный каскад к источнику G2 и измерительным приборам PV2, PV3. Установить напряжение источника питания G2 равным  $E_k = -15$  В и, изменяя величину резистора ручкой резистора R1, добиться, чтобы напряжение коллектора относительно общей точки было  $U_{k0} = E_k/2$ .

Прибором АВМ2 измерить точные значения напряжений относительно общей точки на коллекторе  $U_{k0}$ , эмиттере  $U_{э0}$  и на резисторе R2 ( $U_{R2}$ ). Подключив резистор R1 ко входу мультиметра АВ1, измерить величину его сопротивления. С помощью мультиметра в режиме hFE измерить статический коэффициент усиления по току для транзистора МП40.

По результатам измерений рассчитать:

- ток покоя коллектора  $I_{k0} = \frac{E_k - U_{k0}}{R3}$ ;
  - ток покоя базы  $I_{б0} = \frac{I_{k0}}{\beta}$ ;
  - статический коэффициент усиления транзистора  $\beta = \frac{I_{k0}}{\frac{E_k - U_{R2}}{R1} - \frac{U_{R2}}{R2}}$
- и сравнить его с измеренным значением.

2. Подключить вход усилительного каскада к выходу УГ. Установить частоту усиливаемых сигналов  $f_c = 10$  кГц. Снять амплитудную характеристику  $U_{вых} = f(U_{вх})$  каскада, занести результаты измерений в табл. 4.6 и оценить по ним величину коэффициента усиления по напряжению  $K_u$ . Диапазон изменения напряжения  $U_{вх}$  задать самостоятельно, главное требование при этом – наличие не менее 4–5 точек на линейном участке.

Удобно для этих измерений использовать осциллограф в режиме измерителя параметров сигналов, выбор режима производится в меню View/Waveform Parameters. Форму напряжения усиленных сигналов необходимо контролировать осциллографом. Входное напряжение изме-

няется от нуля до четкого насыщения транзистора, что определяется искажением выходного сигнала (сигнал становится несинусоидальным).

Таблица 4.6

Амплитудные характеристики усилителя

Режимы и параметры усилителя		U <sub>вх</sub> , В							
С СЗ	U <sub>вых</sub> , В								
	K <sub>u</sub>								
Без СЗ	U <sub>вых</sub> , В								
	K <sub>u</sub>								

Затем убрать с панели конденсатор СЗ и снова снять амплитудную характеристику.

Изменить сопротивление коллекторной нагрузки на R<sub>3</sub> = 2 кОм, резистором R1 подрегулировать U<sub>к0</sub> = Eп/2, измерить коэффициент усиления по напряжению и сравнить его с коэффициентом усиления, полученным при R<sub>3</sub> = 1 кОм. По величине коэффициента усиления, измеренного при R<sub>3</sub> = 1 кОм, рассчитать полное входное сопротивление каскада:

$$R_{вх.полн} = \frac{\beta \cdot R_H}{K_U},$$

где  $R_H = \frac{R_3 R_5}{R_3 + R_5}$ .

3. Установить входное напряжение каскада, соответствующее середине линейного участка амплитудной характеристики. Изменяя частоту входных сигналов от 20 Гц до 2 МГц, снять амплитудно-частотные характеристики K<sub>u</sub> = F(fc) в соответствии с данными табл. 4.7 при R<sub>3</sub> = 1 кОм.

Таблица 4.7

Амплитудно-частотные характеристики при различных емкостях в связях усилителя

Вариант	Величина С, мкФ	Параметр	20 Гц	...							...	2 МГц
			1	С1 = 10 С2 = 10 С3 = отсутст.	U <sub>вых</sub> , В							
K <sub>u</sub>												

Вариант	Величина С, мкФ	Параметр	20 Гц											2 МГц
2	C1 = 10	U <sub>ВЫХ</sub> , В												
	C2 = 10 C3 = 20	Ku												
3	C1 = 10	U <sub>ВЫХ</sub> , В												
	C2 = 0,1 C3 = 20	Ku												
4	C1 = 50	U <sub>ВЫХ</sub> , В												
	C2 = 10 C3 = 20	Ku												

Построение АЧХ удобно производить в режиме снятия Боде диаграмм, для его активизации необходимо в меню генератора выбрать Bode Plotter. Рекомендуется по осям использовать в логарифмическом масштабе.

При построении АЧХ целесообразно по оси частот и напряжений использовать логарифмический масштаб, по оси откладывать Ku. По результатам измерений определить полосу пропускания при коэффициенте частот искажений  $M_H = M_B = 1,41$ . Для нижней и верхней границ полосы пропускания  $f_H$  и  $f_B$  рассчитать коэффициенты частоты искажений и сравнить их с 1,41.

$$M_H = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot \tau_H}\right)^2},$$

где  $\frac{1}{\tau_H} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3}$ ,  $\tau_1 = C_1 \cdot R_{\text{ВХ.ПОЛН}}$ ;  $\tau_2 = C_2(R_3 + R_5)$ ;  $\tau_3 = C_3 \cdot R_9$ ;

$$R_9 = \frac{0,026}{I_{30}}; I_{30} = I_{K0} + I_{B0}.$$

$$M_B = \sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot \tau_B)^2},$$

где  $\tau_B = C_4 R_H$ .

Здесь  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  – постоянные времени для входной, выходной и эмиттерной цепи в области нижних частот;  $\tau_B$  – постоянная времени выходной цепи в области высоких частот.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- цель и программу работы;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- табл. 4.6 и 4.7 с экспериментальными данными и результаты других измерений;

- графики амплитудных и амплитудно-частотных характеристик;
- результаты расчетов;
- анализ результатов, оформленный в виде кратких выводов.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чем заключается цель работы?
2. Какова программа исследований, какие характеристики необходимо снять?
3. Каково назначение измерительных приборов PV1, PV2, PV3, осциллографа?
4. Нарисовать принципиальную схему усилительного каскада.
5. Нарисовать схемы замещения каскада в области средних, высоких и низких частот.
6. Что является причиной нелинейности амплитудной характеристики?
7. Какие элементы схемы определяют уменьшение коэффициента усиления на низких и высоких частотах?
8. Почему при отключенном СЗ в цепи эмиттера коэффициент усиления уменьшается?
9. Как задается режим постоянного тока (рабочая точка)?
10. Объяснить назначение элементов исследуемой схемы.
11. Каким образом происходит термостабилизация рабочей точки?
12. Что необходимо изменить в схеме, чтобы повысить коэффициент усиления?
13. Что такое нагрузочная прямая и как она строится по постоянному и переменному токам?

### **Рекомендуемая литература**

1. Руденко, В.С. Основы промышленной электроники / В.С. Руденко, В.Н. Сенько, В.В. Трифонюк. – Киев : Вища школа, 1985. – С. 105, 109–117.
2. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982. – С. 88–99.
3. Гусев, В.Г. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М. : Энергия, 1977. – С. 162–170.
4. Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко. – М. : Энергия, 1977. – С. 317–342.

## Библиографический список

1. Чернявский, Н.И. Твердотельная электроника : метод. пособие по лабораторному практикуму по дисциплинам «Твердотельная электроника» и «Полупроводниковые приборы» / Н.И. Чернявский. – Тольятти : ТГУ, 2003. – 63 с.
2. Миловзоров, О.В. Электроника : учеб. для вузов / О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. – 2-е изд. перераб. – М. : Высш. шк., 2005. – 288 с.
3. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника : учеб для вузов / Ю.С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982. – 496 с.
4. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА.....	4
1.1. Состав лабораторного стенда.....	4
1.2. Описание электрических источников.....	5
1.3. Описание измерительной системы сбора данных и универсальный генератор.....	8
1.4. Описание элементов монтажной части стенда.....	11
2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ.....	12
2.1. Работа с мультиметрами.....	12
2.2. Работа с универсальным генератором и осциллографом в среде PC-Lab.....	14
3. ОРГАНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА.....	23
4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.....	25
Лабораторная работа 1. Определение свойств, параметров, вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов и степени их соответствия техническим условиям.....	25
Лабораторная работа 2. Определение свойств, параметров, вольт-амперных характеристик кремниевого стабилитрона и их анализ.....	39
Лабораторная работа 3. Исследование статического и динамического режимов работы биполярного транзистора.....	45
Лабораторная работа 4. Исследование однокаскадного усилителя с емкостной связью.....	64
Библиографический список.....	74

Учебное издание

*Позднов Максим Владимирович*

ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Технический редактор *З.М. Малявина*

Корректор *Г.В. Данилова*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 24.01.2012. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 4,42.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-02-11.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14