

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Е.С. Люминарская, А.В. Ситников

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО
ТРАНЗИСТОРА**

Учебно - методическое пособие

**Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2026**

УДК 621.3

ББК 31.2

Исследование статических характеристик биполярного транзистора: учебно-методическое пособие (методические указания к выполнению лабораторной работы) по дисциплине «Промышленная электроника». Е.С. Люминарская, А.В. Ситников – М.: Изд. – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 – ,16 с.

В теоретической части учебно-методического пособия изложены основные сведения о биполярных транзисторах: приведены характеристики транзисторов и схемы включения, описаны режимы работы. В практической части пособия дано задание на выполнение лабораторной работы, указаны порядок проведения и вопросы для самоконтроля.

Для студентов 2 курса МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по программе бакалавриата и изучающих дисциплину «Промышленная электроника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника»

© Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное высшее техническое образование придает особое значение развитию практических исследовательских навыков студентов в сфере электроники и электротехники. Для успешного освоения профессии выпускнику недостаточно иметь только теоретические знания — важно также уметь синтезировать электронные схемы и уверенно ориентироваться в работе с компонентами современной электронной техники. Лабораторная работа «Исследование статических характеристик биполярного транзистора» представляет собой одну из ключевых лабораторных практик курса «Промышленная электроника», которая направлена именно на формирование необходимых профессиональных компетенций будущих инженеров.

Целью выполнения лабораторной работы является ознакомление с устройством и принципом действия биполярных транзисторов, экспериментальное определение их статических характеристик. Данная работа позволяет студентам приобрести навыки самостоятельной оценки ключевых свойств биполярных транзисторов, развить умения экспериментально определять параметры электронных компонентов и эффективно пользоваться измерительным оборудованием для анализа характеристик электронных устройств.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Принцип действия биполярных транзисторов

Биполярные транзисторы (БТ) – это электронные элементы, имеющие три слоя полупроводника ($p-n-p$ или $n-p-n$) и два $p-n$ -перехода. На каждый слой полупроводника напыляется металлический электрод для монтажа элемента в электрическую цепь. Транзистор помещается в герметичный корпус с тремя выводами. Структура биполярных транзисторов $n-p-n$ и $p-n-p$ типа, а также их символическое обозначение и внешний вид (транзистор КТ503Г) изображены на рис. 1.1.

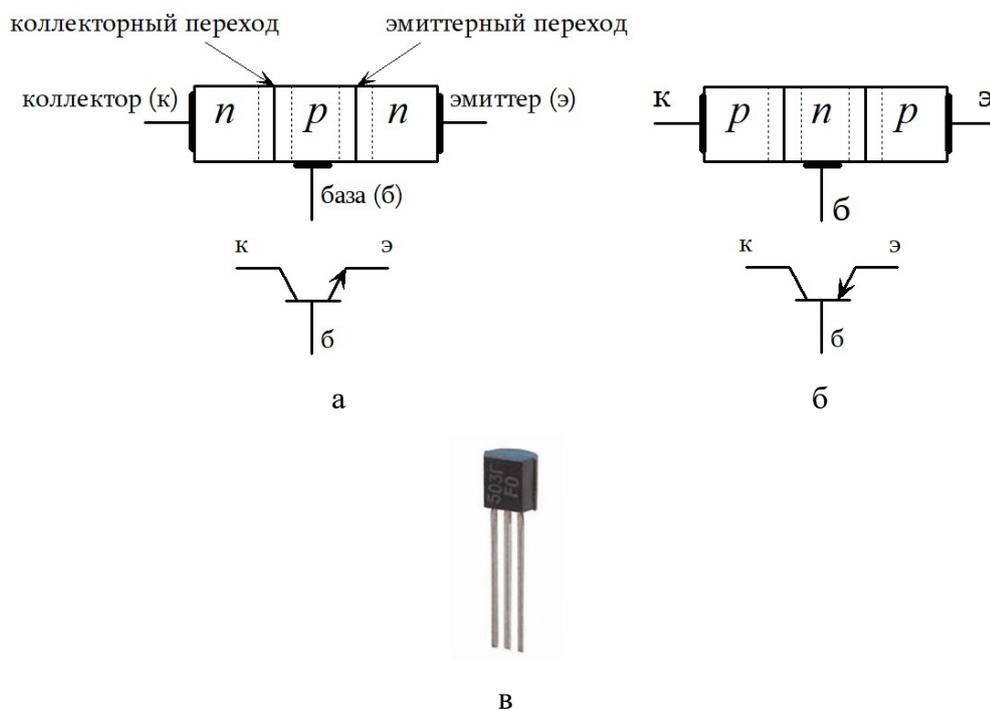


Рис. 1.1. Структура, обозначение и внешний вид биполярного транзистора: а – $n-p-n$; б – $p-n-p$; в – транзистор КТ503Г ($n-p-n$)

В биполярных транзисторах, как правило, эмиттер легируется сильнее коллектора, и электрод базы смещается в сторону эмиттера. База выполняется тоньше эмиттера и коллектора (от толщины базы зависит быстродействие транзистора). На практике чаще применяются $n-p-n$ транзисторы, т.к. основными носителями в них являются электроны, которые в 2-3 раза подвижнее дырок.

1.1.1. Режимы работы биполярного транзистора.

В работе биполярных транзисторов выделяют четыре режима: линейный режим (режим активной работы, усилительный режим), режим насыщения, режим отсечки и инверсный режим.

1.1.1.1. Линейный (усилительный) режим работы биполярного транзистора.

В линейном режиме на эмиттерный и коллекторный переход подаются напряжения от внешних источников питания ($E_{эб}$ и $E_{бк}$ рис. 1.2) такой полярности, чтобы эмиттерный переход был смещен в прямом направлении, т.е. открыт для основных носителей, а коллекторный – смещен в обратном направлении, т.е. закрыт для основных носителей, но открыт для неосновных (рис. 1.2).

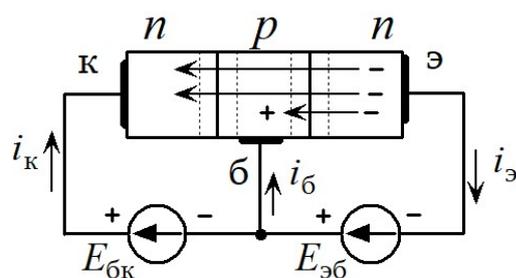


Рис. 1.2. Усилительный режим работы биполярного $n-p-n$ транзистора

Т.к. эмиттерный переход открыт для основных носителей, то через него будет протекать ток $i_э$ (рис. 1.2). Электроны, преодолевая $p-n$ -переход и попадая в базу (инжекция основных носителей), становятся в ней неосновными носителями. Инжекция дырок из базы в эмиттер при этом будет незначительной, т.к. дырки малоподвижны и база легирована гораздо меньше, чем эмиттер. Некоторое число электронов в базе рекомбинирует с дырками, но большая часть электронов проскакивает ее и достигает базно-коллекторного перехода. Электроны в базе $n-p-n$ транзистора являются неосновными носителями, следовательно, при обратном смещении коллекторного перехода, они захватываются его электрическим полем и переносятся в коллектор.

Убыль дырок в базе в результате рекомбинации компенсируется протеканием тока базы $i_б$ от источника $E_{эб}$ (рис. 1.2). Т.к. число рекомбинирующих электронов в базе невелико, то и эмиттерный ток больше тока базы примерно на два порядка ($i_э \gg i_б$).

По первому закону Кирхгофа можно записать, что $i_э = i_б + i_к$, следовательно, ток коллектора лишь немногим ниже эмиттерного, т.е. можно считать, что $i_к \approx i_э$. Более точное выражение для коллекторного тока имеет вид: $i_к = \alpha i_э + I_{к0}$, где α – коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера ($\alpha = 0.9 \dots 0.999$); $I_{к0}$ – обратный ток коллектора (ток неосновных носителей заряда).

В линейном режиме ток коллектора не зависит от напряжения коллектор-база, напряжение база-эмиттер не зависит от напряжения коллектор-база. Биполярный транзистор можно считать источником тока (в коллекторной цепи), управляемым током базы: $I_к = \beta I_б$, где β – коэффициент усиления по току, $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ (при $\alpha = 0.98$ $\beta = 45$). Т.к. сопротивление эмиттер-коллектор зависит от тока базы, то можно также назвать биполярный транзистор электронно-управляемым нелинейным резистором.

При создании электронных устройств используют три основных способа включения биполярных транзисторов: схема с общей базой (ОБ) (рис. 1.3, а), схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 1.3, б), схема с общим коллектором (ОК) (рис. 1.3, в).

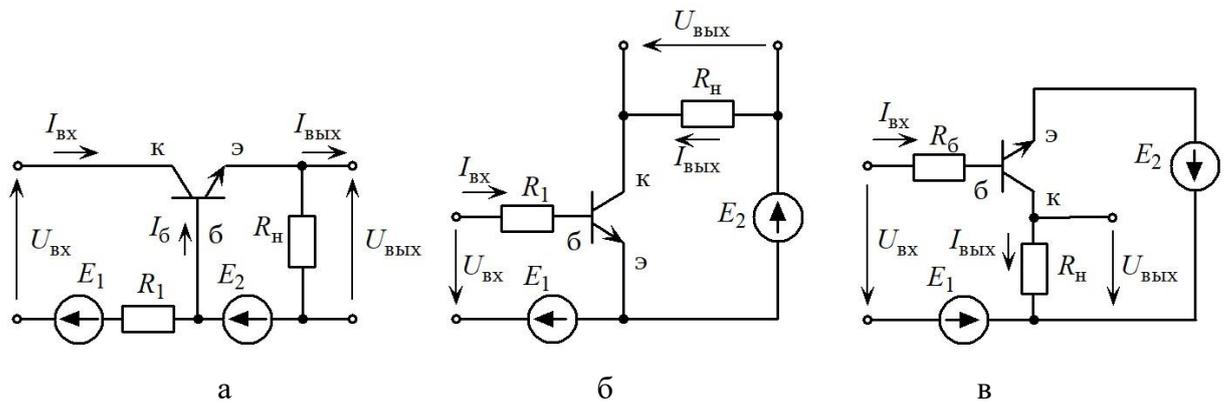


Рис. 1.3. Схемы включения БТ: а – с общей базой; б – общим эмиттером; в – общим коллектором

В схеме с общей базой (рис. 1.3, а) характерно низкое входное сопротивление (порядка 30 Ом) при $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВХ}}$, следовательно, нет усиления по току, а есть усиление только по напряжению. Чаще всего такие схемы используются для усиления сигналов от источников с низким сопротивлением (микрофон, антенна).

В схеме с общим эмиттером (рис. 1.3, б) входное сопротивление существенно больше (единицы килоом) при $I_{\text{ВЫХ}} \gg I_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}} \gg U_{\text{ВХ}}$, т.е. усиление происходит и по току, и по напряжению.

В схеме с общим коллектором (рис. 1.3, в) $I_{\text{ВЫХ}} \gg I_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$, т.е. усиление происходит только по току, усиления по напряжению нет. Такие схемы называются эмиттерным повторителем и используются, например, как усилители мощности. Входное сопротивление схемы с общим коллектором довольно высокое (десятки килоом), а выходное – сравнительно небольшое.

1.1.1.2. Режим насыщения биполярного транзистора.

Для перевода транзистора в режим насыщения, необходимо увеличить величину напряжений, приложенных к эмиттерному и коллекторному *p-n*-переходам, до уровня, при котором электрическое сопротивление переходов станет минимальным. Т.е. увеличить ток базы $I_{\text{Б}}$ до уровня, при котором напряжение между эмиттером и коллектором $U_{\text{ЭК}}$ станет близким нулю.

Можно считать транзистор, работающий в режиме насыщения (открытый транзистор), коротким замыканием между коллектором и эмиттером. Коллекторный ток при этом практически ничем не ограничен.

1.1.1.3. Режим отсечки биполярного транзистора.

В режиме отсечки оба *p-n*-перехода транзистора находятся в закрытом состоянии, через них протекают только малые и неуправляемые тепловые токи неосновных

носителей заряда. Можно считать, что транзистор, работающий в режиме отсечки, представляет собой разрыв цепи эмиттер-коллектор.

Работа биполярного транзистора в режимах насыщения и отсечки эквивалентна работе коммутирующего элемента, т.е. электронного ключа.

Ключевой режим работы транзистора – самый экономичный режим. Т.к. в режиме отсечки ток, протекающий между эмиттером и коллектором, практически равен нулю $I_{э\text{ отс}} = I_{к\text{ отс}} = 0$, следовательно, мощность $P = U_{кэ\text{ отс}} I_{к\text{ отс}} = 0$, а в режиме насыщения $U_{кэ\text{ нас}} = 0$, и соответственно мощность также равна 0 ($P = U_{кэ\text{ нас}} I_{к\text{ нас}} = 0$). Переключение транзистора из режима отсечки в режим насыщения и обратно происходит не мгновенно, но нахождение транзистора в усилительном режиме, т.е. когда $U_{кэ} \neq 0$ и $I_{к} \neq 0$, на несколько порядков меньше, чем время работы в режимах насыщения и отсечки. Следовательно, потребляемая транзистором мощность будет минимальной, поэтому КПД транзистора в ключевом режиме очень высок (более 90%).

1.1.1.4. Инверсный режим работы биполярного транзистора.

В инверсном режиме эмиттерный переход транзистора смещается в обратном направлении, а коллекторный – в прямом. Для симметричных транзисторов это означает, что эмиттер и коллектор меняются местами. Для несимметричных транзисторов (у большинства типов биполярных транзисторов электрод базы смещен в сторону эмиттера) это приводит еще и к снижению коэффициента усиления.

Инверсный режим работы транзисторов используется для создания двунаправленных электронных ключей.

ВАЖНО: Нельзя забывать, что ток, протекающий через открытый транзистор, практически, ничем не ограничен и может вывести элемент из строя! Чтобы этого не произошло в цепь коллектора ставят токоограничивающий резистор.

1.1.2. Вольт-амперные статические характеристики биполярного транзистора.

Чаще всего свойства биполярного транзистора представляют семействами входных и выходных характеристик. Эти характеристики изображают по-разному для различных схем включения транзистора. Например, для схемы включения с общей базой входной характеристикой называют зависимости тока эмиттера от напряжения эмиттер-база $i_э = f(U_{бэ})$, выходной – зависимость коллекторного тока от напряжения эмиттер-база или коллектор-база $i_к = f(u_{эб})$ или $i_к = f(u_{кб})$.

Для схемы с общим эмиттером входной характеристикой называют зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер $i_б = f(U_{бэ})$, выходной – зависимость коллекторного тока от напряжения коллектор-эмиттер $i_к = f(u_{кэ})$.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, представлены на рис. 1.4.

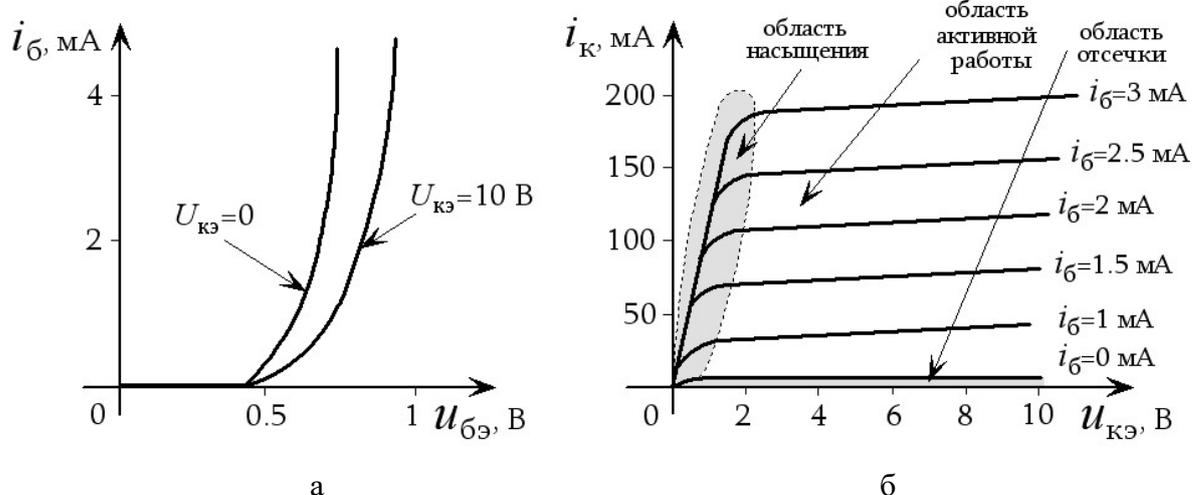


Рис. 1.4. ВАХ биполярного транзистора при включении с общим эмиттером:
а – входные; б – выходные

Нетрудно увидеть, что входная характеристика представляет собой прямую ветвь ВАХ эмиттерного *p-n*-перехода, а выходная – обратную ветвь коллекторного.

2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Задание на проведение лабораторной работы

Схема для исследования входной и выходной характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, изображена на рис. 2.1.

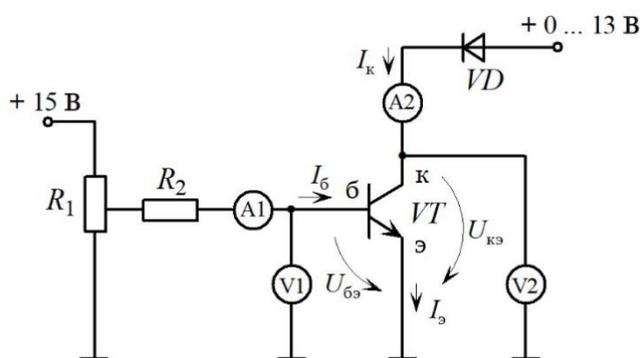


Рис. 2.1. Биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером

Для представленной схемы необходимо снять и построить зависимость тока базы транзистора от напряжения база-эмиттер $i_б = f(U_{бэ})$ (входная характеристика) и

зависимость коллекторного тока от напряжения коллектор-эмиттер $i_k = f(u_{кэ})$ (выходная характеристика).

Измерения нужно проводить с помощью мультиметров, включенных в режиме измерения напряжения (рис. 2.2, а) и в режиме измерения тока (рис. 2.2, б) с учетом полярности включения.

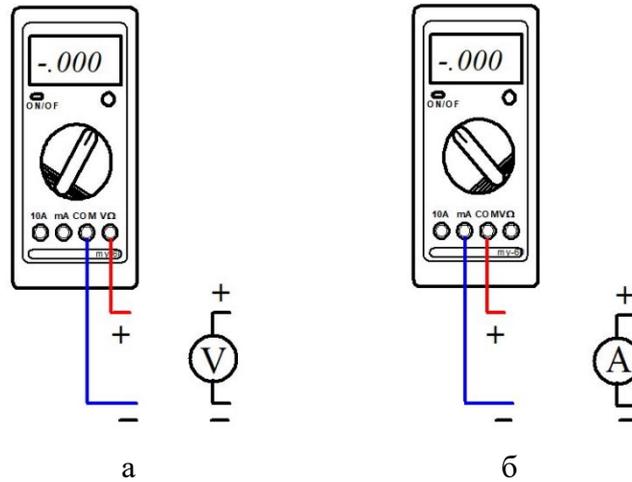


Рис. 2.2. Мультиметры: а – в режиме вольтметра; б - в режиме амперметра

2.2. Порядок выполнения работы

2.2.1. Монтаж экспериментальной установки

Поместите миниблоки на наборное поле так, как показано на рис.2.3.

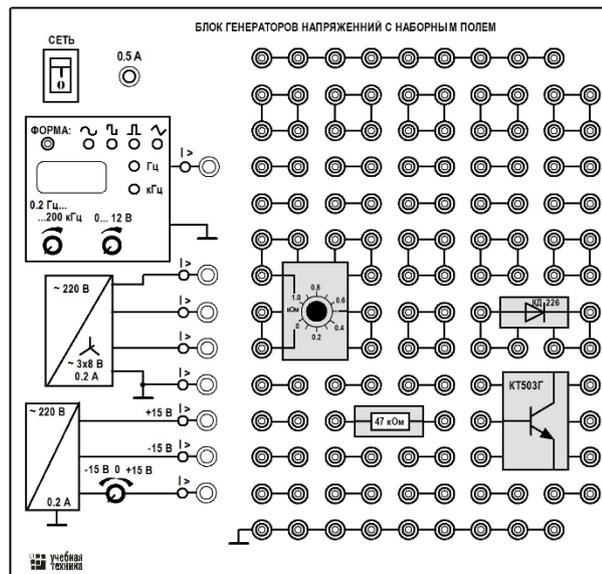


Рис. 2.3. Монтажная схема установки миниблоков

Соберите схему включения транзистора с общим эмиттером (рис. 2.4).

ВНИМАНИЕ! Монтаж схемы проводится при выключенном тумблере «СЕТЬ» на блоке генераторов.

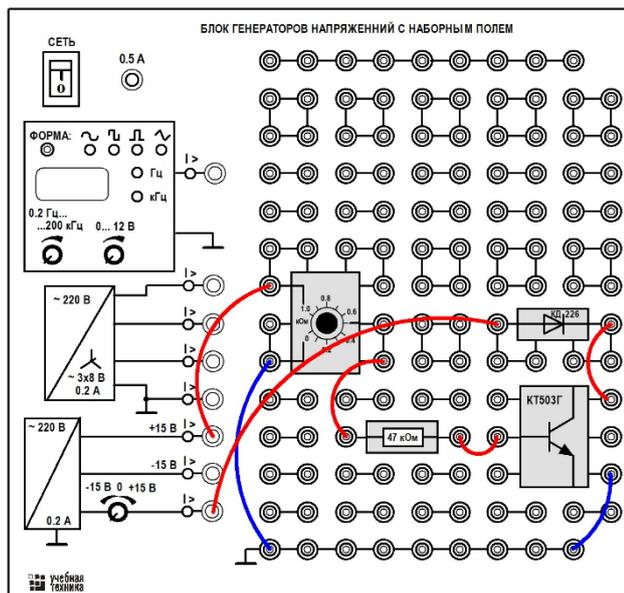


Рис. 2.4. Монтажная схема установки со схемой включения транзистора с общим эмиттером

Выходная цепь биполярного транзистора (цепь коллектора) подключается к источнику постоянного напряжения $E_k = 13$ В. Источник $E_k = 13$ В является регулируемым в диапазоне от -13 В до +13 В. Во избежание подачи отрицательного напряжения на коллектор $n-p-n$ транзистора, в коллекторную цепь введен диод VD (рис. 2.1). Регулятор напряжения источника E_k необходимо перевести в крайнее положение по часовой стрелке, что соответствует +13 В.

Включите в схему измерительные приборы так, как показано на рис.2.5.

ВНИМАНИЕ! Перед подключением измерительных приборов убедитесь, что переключатель режимов мультиметров установлен на значения постоянного тока – при измерении тока «A=», при измерении напряжения «V=».

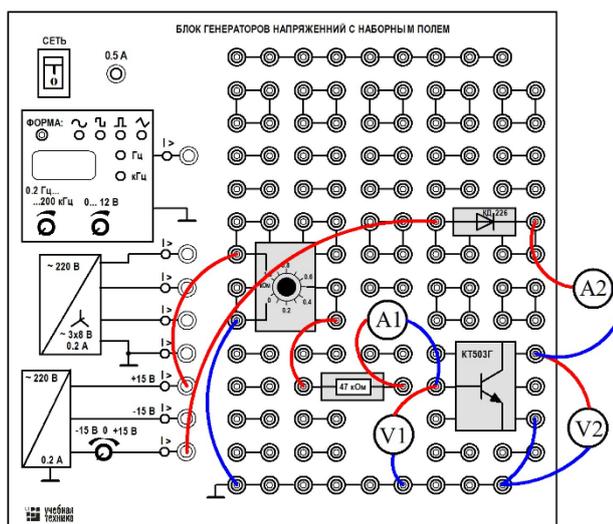


Рис. 2.5. Монтажная схема экспериментальной установки

Потенциометр (переменный резистор R_1 на рис. 2.1) установленный в базовую цепь транзистора образует регулируемый резистивный делитель. Смещение движка потенциометра позволяет изменять напряжение, подаваемое на базу транзистора.

2.2.2. Исследование входных характеристик биполярного транзистора

Чтобы снять входную характеристику транзистора, необходимо подать на коллектор постоянное напряжение и, изменяя напряжение на базе, зафиксировать значения базового тока.

- 1) Поверните движок потенциометра по часовой стрелке до упора. Убедитесь, что регулятор напряжения, подаваемого на коллекторную цепь транзистора, находится в крайнем положении по часовой стрелке.
- 2) Включите питание стенда. Включите тумблер «СЕТЬ» на блоке генераторов. Включите блоки мультиметров и сами мультиметры.
- 3) Меняя положение потенциометра, установите значение напряжения $U_{бэ}$ равным 0.1 В, контролируйте значение $U_{бэ}$ вольтметром V1.
- 4) Проведите измерение тока базы I_b , соответствующее напряжению база-эмиттер $U_{бэ} = 0.1$ В, с помощью амперметра A1. Значения I_b и $U_{бэ}$ занесите в таблицу 1.

Таблица 1.

$U_{кэ} = 13$ В						
$U_{бэ}$, В рекомендованное	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$U_{бэ}$, В установленное						
I_b , мкА измеренное						

- 5) Изменяя значения $U_{бэ}$ от 0.1 В до 0.6 В и измеряя ток $I_б$, заполните таблицу 1.
- 6) Постройте входную характеристику биполярного транзистора $i_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = 13$ В.
- 7) Установите напряжение $U_{кэ} = 10$ В, повернув ручку регулируемого источника напряжения, контролируя значение $U_{кэ}$ вольтметром V2.
- 8) Повторите пункты 3-5, заполните таблицу 2.

Таблица 2.

U _{кэ} =10 В						
U _{бэ} , В рекомендованное	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
U _{бэ} , В установленное						
I _б , мкА измеренное						

- 9) Постройте входную характеристику биполярного транзистора при $U_{кэ} = 10$ В в той же системе координат, что и для $U_{кэ} = 13$ В.

2.2.3. Исследование выходных характеристик биполярного транзистора

Чтобы снять выходную характеристику транзистора, необходимо подать на базу постоянное напряжение (постоянный ток $I_б$) и, изменяя напряжение на коллекторе, зафиксировать значения коллекторного тока.

- 1) Поверните движок потенциометра до положения, когда ток базы $I_б$ будет равен нулю (показания амперметра А1).
- 2) Установите значение напряжения $U_{кэ}$ равным 0 В (вольтметр V2), контролируйте значение $U_{бэ}$ вольтметром V1.
- 3) Проведите измерение тока коллектора ($I_к$), соответствующее напряжению коллектор-эмиттер $U_{кэ} = 0$ В, с помощью амперметра А2. Значения $I_к$ и $U_{кэ}$ занесите в таблицу 3.

Таблица 3.

I _б = 0 мкА								
U _{кэ} , В рекомендованное	0	1	2	4	6	8	10	12
U _{кэ} , В установленное								
I _к , мА измеренное								

- 4) Изменяя значения $U_{кэ}$ от 0 В до 12 В и измеряя ток $I_к$, заполните таблицу 3.

- 5) С помощью потенциометра установите ток $I_6 = 0.1$ мкА, контролируя значения I_6 амперметром А1. Установите с помощью регулируемого источника напряжения $U_{кэ} = 0$ В. Контролируйте $U_{кэ}$ по вольтметру V2.
- 6) Проведите измерение тока коллектора ($I_к$), соответствующее напряжению коллектор-эмиттер $U_{кэ} = 0$ В, с помощью амперметра А2. Значения $I_к$ и $U_{кэ}$ занесите в таблицу 4.
- 7) Изменяя значения $U_{кэ}$ от 0 В до 12 В и измеряя ток $I_к$, заполните таблицу 4

Таблица 4.

$I_6 = 0.1$ мкА								
$U_{кэ}$, В рекомендованное	0	1	2	4	6	8	10	12
$U_{кэ}$, В установленное								
$I_к$, мА измеренное								

- 8) Постройте выходную характеристику биполярного транзистора $i_к = f(U_{кэ})$ при $I_6 = 0.1$ мкА в той же системе координат, что и для $I_6 = 0$ мкА.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные характеристики биполярного транзистора.
2. Чем определяется величина коллекторного тока в схеме с общей базой?
3. В каком режиме работы транзистора напряжение между коллектором и эмиттером близко к нулю?
4. В каком режиме работы транзистора его потребляемая мощность минимальна?
5. В какой схеме включения транзистора (ОБ, ОЭ или ОК) входное сопротивление транзистора максимальное?
6. Что такое входная характеристика биполярного транзистора?
7. Какой ветви ВАХ p - n -перехода соответствует выходная характеристика транзистора?

ЛИТЕРАТУРА

Ситников А.В., Ситников И.А. Прикладная электроника: Учебник / А.В. Ситников, И.А. Ситников – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2017. 272 с.

Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций / В.А. Прянишников. – СПб.: Корона-принт, 1998. – 400с.

Лагин В.И., Савелов Н.С. Электроника / В.И. Лагин, Н.С. Савелов. – Ростов-на-Дону.: Феникс, 2002 – 572 с.