

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Задача № 60

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Работу поставили
доценты: Авксентьев Ю.И., Антипов С.Д., Горюнов Г.Е.

Москва 2017 г.

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА.

1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора (БПТ).

БПТ состоит из трех областей, которые образуют два $p-n$ перехода. Одна из крайних областей вместе с выводом носит название *эмиттера* (Э), другая крайняя область вместе с выводом называется *коллектором* (К), а средняя область вместе с выводом - *базой* (Б). Происхождение названия областей соответствует их функциональным действиям при приложении к ним внешних напряжений. Поскольку средняя область является основной, управляющей областью, основой для построения двух $n-p$ переходов, она названа базой (называют ее также "*основанием*", "*основным электродом*", "*управляющим электродом*"). Транзисторы бывают типа $p-n-p$ и $n-p-n$. Рассмотрим схему транзистора $p-n-p$. Нижняя p -область (рис.1), примыкающая к базе, является в схеме источником носителей тока. Она инжектирует подвижные заряды в базу, поэтому ее называют эмиттером.

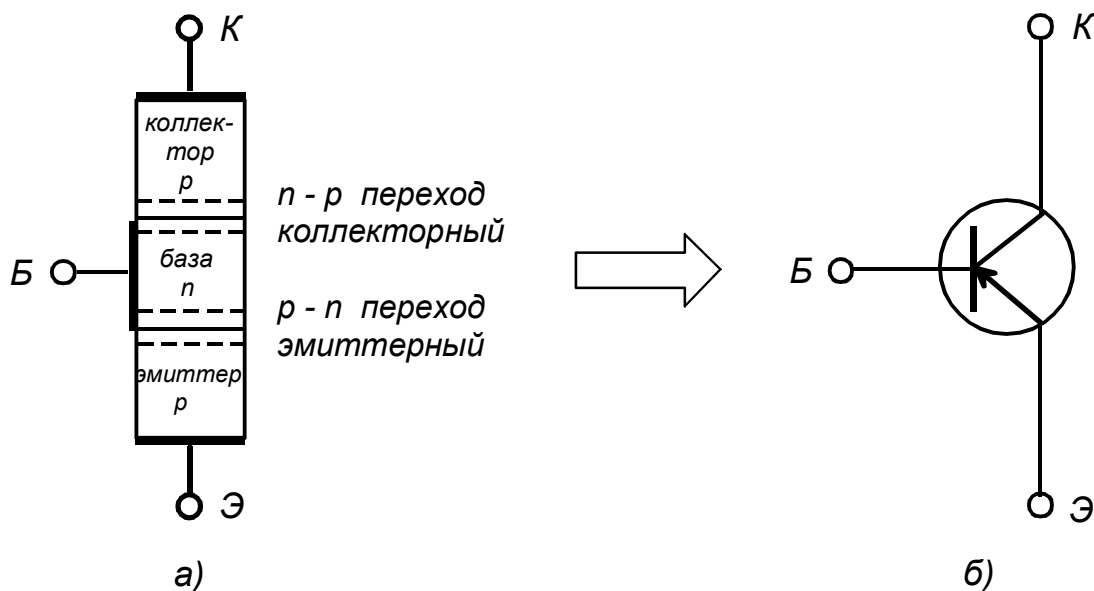


Схема б.т. типа $p-n-p$

Условное обозначение транзистора типа $p-n-p$

Рис. 1

Инжекцией называется введение носителей тока в область, где они являются неосновными носителями. В случае БПТ типа $p-n-p$ эмиттер инжектирует в базу дырки, где они оказываются неосновными носителями. Верхняя p -область, примыкающая к базе, в схеме "*собирает*" носители заряда, вышедшие из эмиттера, поэтому эта область получила название коллектора.

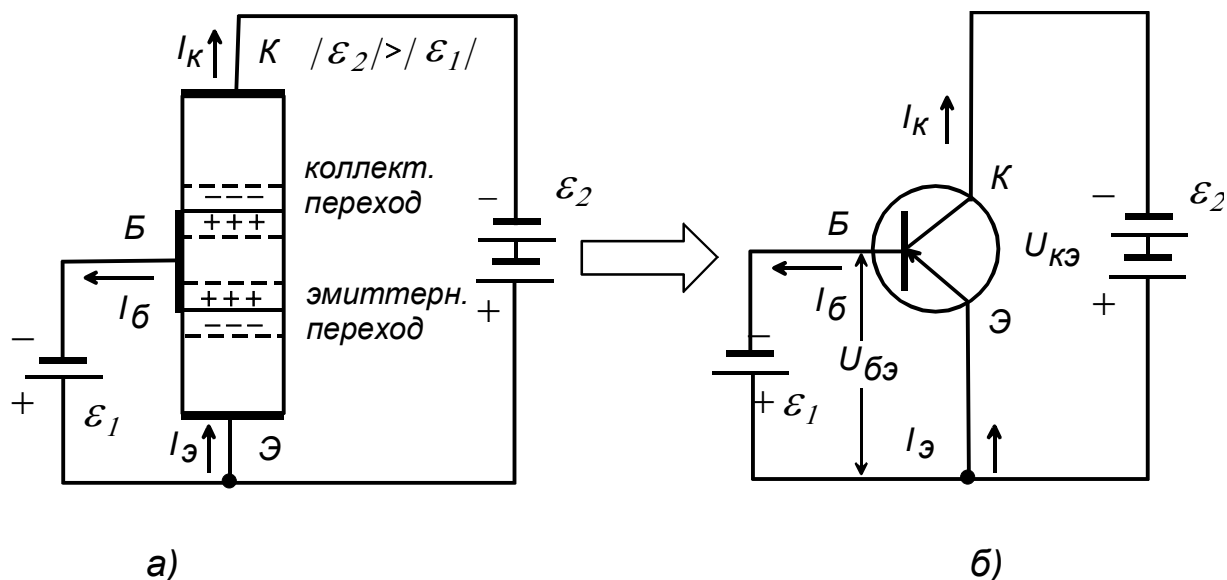
Переход между эмиттером и базой (*p-n*-переход) называется *эмиттерным переходом*. Переход между базой и коллектором (*n-p* переход) называется *коллекторным переходом* (рис.1).

Режим работы транзистора, его функциональные свойства определяются соотношениями потенциалов на его электродах, а также схемой включения его электродов.

Рассмотрим обычный режим транзистора, когда он работает в качестве усилителя. Усиление определяется как процесс, при котором небольшой ток или напряжение управляет большим током или напряжением. В идеальном случае на выходе транзистора будет получен сигнал, воспроизводящий форму меньшего входного, но превосходящий его по амплитуде.

При включении *БПТ* в электрическую схему два его электрода служат для введения *входного сигнала* и два электрода - для выведения *выходного сигнала*. Поскольку *БПТ* имеет три электрода, то один из них обязательно используется дважды и оказывается общим для входных и выходных цепей. Когда общим для входа и выхода является эмиттер (база, коллектор), такая схема носит название *схемы с общим эмиттером - ОЭ* (с *общей базой - ОБ*, с *общим коллектором - ОК*).

Рассмотрим схему с *ОЭ*. Она находит широкое применение, так как



Включение б.т. в схеме с общим эмиттером

Рис. 2.

характеризуется большим *коэффициентом усиления* по току и по напряжению. В этой схеме включения:

а) к эмиттерному *p-n* переходу напряжение источника питания подается в прямом направлении, а к коллекторному *n-p* переходу - в обратном направлении,

т.е. цепи база-эмиттер и база-коллектор работают как диоды, диод база-эмиттер открыт и диод база-коллектор смещен в обратном направлении (рис.2, а,б);

б) коллектор имеет более отрицательный потенциал, чем база и эмиттер, а база имеет немного более отрицательный потенциал, чем эмиттер (рис.2, а,б). Для *БПТ* типа *n-p-n* полярность источников питания противоположна. Для таких транзисторов коллектор положителен как относительно базы, так и относительно эмиттера, а база имеет небольшой положительный потенциал относительно эмиттера.

Ток базы $I_{\text{б}}$, ток в цепи коллектора $I_{\text{к}}$ и ток в цепи эмиттера $I_{\text{э}}$ подчиняются 1-му закону Кирхгофа:

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

Из опыта известно, что приращение тока $I_{\text{к}}$ прямо пропорционально приращению тока $I_{\text{б}}$, т.е.

$$\Delta I_{\text{к}} = \beta \Delta I_{\text{б}},$$

где β - коэффициент пропорциональности, его называют коэффициентом усиления по току *БПТ*, включенного в схеме с *ОЭ*.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в *БПТ* типа *p-n-p*, включенном в схеме с *ОЭ*.

К эмиттерному *p-n* переходу напряжение \mathcal{E}_1 подается в прямом направлении. Это означает, что под влиянием приложенного напряжения \mathcal{E}_1 потенциальный барьер на границе *p-n* перехода уменьшается и начинается движение дырок из эмиттера в базу, а электронов - из базы в эмиттер, т.е. через эмиттерный переход начинает протекать ток. Желательно добиться максимального перехода дырок из эмиттера на базу, а обратный переход электронов из базы на эмиттер свести к минимуму. Для такой односторонней инжекции дырок в базу концентрацию дырок в эмиттере делают в 10^2 - 10^3 раз больше концентрации электронов в базе. Поэтому встречный поток электронов из базы в эмиттер можно не учитывать и переход дырок из эмиттера в базу создает ток эмиттера $I_{\text{э}}$, т.е. $I_{\text{э}} \approx I_{\text{дырок}}$. При этом уменьшение количества дырок в эмиттере компенсируется уходом из него во внешнюю цепь такого же количества электронов.

Так как коллекторный переход включен в обратном направлении, сопротивление его значительно превышает сопротивление материала базы. Поэтому падение напряжения на базе оказывается пренебрежимо малым. Это означает практически полное отсутствие электрического поля в базе. Следовательно, дырки, вышедшие в базу из эмиттера, далее перемещаются по базе лишь за счет диффузии. Если ширина базы W мала по сравнению со средней длиной пробега дырки до места ее рекомбинации l_0 , то большая часть дырок достигает коллекторного перехода. Обычно это условие в *БПТ* всегда выполняется. Так, в *Ge* $l_0 \cong (0,3-0,5)$ мм, и чтобы уменьшить вероятность рекомбинации дырок, толщина базы берется не более 0,25 мм.

Вблизи коллекторного перехода, включенного в обратном направлении, поток дырок попадает под действие захватывающего их электрического поля. Это поле вызывает быстрый дрейф дырок через коллекторный переход в область коллектора, где дырки становятся основными носителями и беспрепятственно доходят до вывода коллектора. В месте контакта коллекторной области с металлическим выводом эти дырки рекомбинируют с поступающими из внешней цепи свободными электронами и тем самым обеспечивают протекание тока I_K в цепи коллектора.

Следует отметить, что не все дырки, прошедшие через эмиттерный переход, доходят до коллекторного перехода. Часть дырок, вошедших в базу и перемещающихся по ней, все же успевают рекомбинировать с электронами. Рекомбинация дырок в базе вызывает соответствующий приток электронов по базовому выводу от источника питания \mathcal{E}_1 и следовательно, появление тока базы $I_{\bar{b}}$. Поэтому коллекторный ток I_K оказывается меньше эмиттерного тока $I_{\bar{e}}$ на величину $I_{\bar{b}}$, т.е.

$$I_K = I_{\bar{e}} - I_{\bar{b}}.$$

В электронной технике напряжения обычно измеряют относительно общей точки для входных и выходных цепей. Поскольку в схеме с $ОЭ$ общей точкой является эмиттер, то все напряжения рассматриваются относительно эмиттера (см.рис.2).

Обычно напряжение между базой и эмиттером обозначают $U_{\bar{b}\bar{e}}$ (см. рис.2), а напряжение между коллектором и эмиттером – $U_{к\bar{e}}$.

2. Статические вольтамперные характеристики (входные и выходные) биполярного транзистора в схеме с $ОЭ$.

По своей сути $БПТ$ является усилителем тока, так как небольшой по величине ток базы $I_{\bar{e}}$ управляет значительно большим током коллектора I_K . Однако $БПТ$ можно также использовать и в качестве усилителя напряжения. Для этого в цепи коллектора $БПТ$ подключается сопротивление (резистор) нагрузки R_K .

Режим работы $БПТ$, когда отсутствует сопротивление нагрузки R_K в цепи коллектора, называют статическим. При анализе и расчете транзисторных схем используются характеристики транзисторов в статическом режиме. Характеристиками транзистора обычно называют графически представленные зависимости между токами и напряжениями в его входных и выходных цепях. Статическими характеристиками называют характеристики $БПТ$, снятые в статическом режиме. В справочниках обычно приводятся статические входные характеристики и статические выходные характеристики, которые являются наиболее важными для $БПТ$.

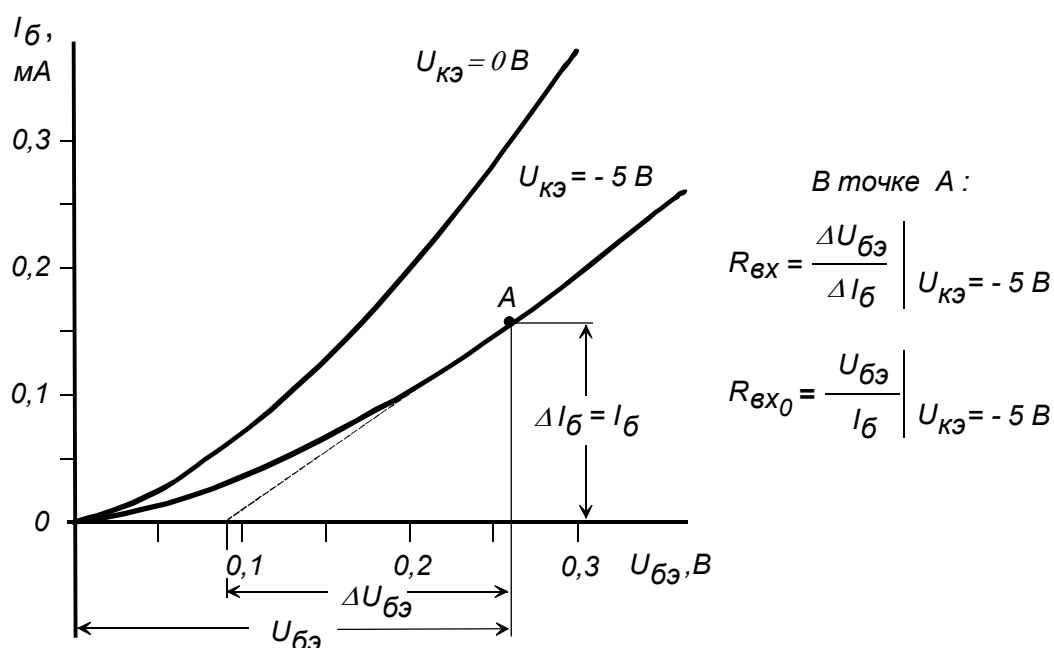
а) Входные вольтамперные характеристики. Статической входной характеристикой транзистора называется график зависимости величины входного тока $I_{вх}$ от величины входного напряжения $U_{вх}$ при постоянном значении выходного напряжения $U_{вых}$:

$$I_{вх} = f(U_{вх}) |_{U_{вых} = const.}$$

Статической выходной характеристикой транзистора называется график зависимости выходного тока $I_{вых}$ от выходного напряжения $U_{вых}$ при постоянном значении входного тока $I_{вх}$:

$$I_{вых} = f(U_{вых}) |_{I_{вх} = const.}$$

Рассмотрим схему с *ОЭ* (см. рис. 2, б). Входной ток здесь - ток базы $I_{б}$,



Входные вольт-амперные характеристики б.т. в схеме с ОЭ

Рис. 3

входное напряжение - $U_{бэ}$.

Напряжение $U_{бэ}$ задается источником питания \mathcal{E}_1 . Напряжение $U_{кэ}$ - источником питания \mathcal{E}_2 .

На рис.3 для примера представлены две входные характеристики транзистора в схеме с *ОЭ*: $I_{б} = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = 0 В$ и $U_{кэ} = -5 В$.

Особенностью входных характеристик является зависимость их наклона от величины коллекторного напряжения $U_{кэ}$. При уменьшении отрицательного напряжения $U_{кэ}$ наклон характеристик в сторону оси напряжений $U_{бэ}$ заметно уменьшается. В справочниках обычно указывают входные характеристики при $U_{кэ} = 0 В$ и $U_{кэ} = -5 В$.

Величина входного сопротивления R_{ex} транзистора в схеме с $OЭ$ определяется выражением

$$R_{ex} = \Delta U_{ex} / \Delta I_{ex} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_{б} |_{U_{кэ} = const}.$$

Эта величина определяется по статической входной характеристике. Пусть точка A на характеристике $I_{б} (U_{бэ})$ при $U_{кэ} = - 5 В$ (см. рис.3) является рабочей, т.е. изменения напряжения $\Delta U_{бэ}$ отсчитываются в ту или иную сторону от данного напряжения $U_{бэ}$. Найдем величину R_{ex} в точке A . Для этого проводим касательную к входной характеристике в точке A (штриховая линия на рис.3) до пересечения ее с осью абсцисс. Таким образом, величина R_{ex} в точке A определяется величиной котангенса угла наклона касательной в рабочей точке к оси напряжений $U_{бэ}$.

Отношение постоянного напряжения на входе U_{ex} к входному току I_{ex} транзистора называется входным сопротивлением транзистора по постоянному току и обозначается R_{ex0} .

Для схемы с $OЭ$ имеем для любой произвольной точки A на входной статической характеристике

$$R_{ex0} = U_{бэ} / I_{б} |_{U_{кэ} = const},$$

т.е. R_{ex0} равно отношению координат точки A .

б) Выходные вольтамперные характеристики. Выходным током в схеме с $OЭ$ является коллекторный ток $I_{к}$, выходным напряжением $U_{вых}$ - напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. Зависимость коллекторного тока $I_{к}$ от напряжения $U_{эк}$ при различных значениях тока $I_{б}$ представляет собой семейство статических выходных характеристик транзистора в схеме с $OЭ$:

$$I_{к} = f(U_{кэ}) |_{I_{б} = const}.$$

На рис.4 представлено семейство выходных статических характеристик в схеме с $OЭ$. Графическую зависимость можно разбить на две области:

а) начальную, где наблюдается резкий рост $I_{к}$ при небольшом росте $U_{кэ}$ (при достижении $|U_{эк}| = |U_{бэ}|$ рост $I_{к}$ резко уменьшается);

б) основную, где наблюдается слабый рост $I_{к}$ при увеличении $U_{кэ}$.

Небольшая величина угла наклона основного участка (активной области) выходной характеристики свидетельствует о слабой зависимости коллекторного тока $I_{к}$ от величины коллекторного напряжения $U_{кэ}$.

Определим β в точке A . Для этого проводится перпендикуляр к оси напряжений $U_{кэ}$ через точку A (вертикальная штриховая линия на рис.4). Из точек пересечения этого перпендикуляра с двумя ближайшими характеристиками над точкой A и под ней (точки B и C) проводятся прямые (горизонтальные штриховые линии), параллельные оси напряжений. Находим

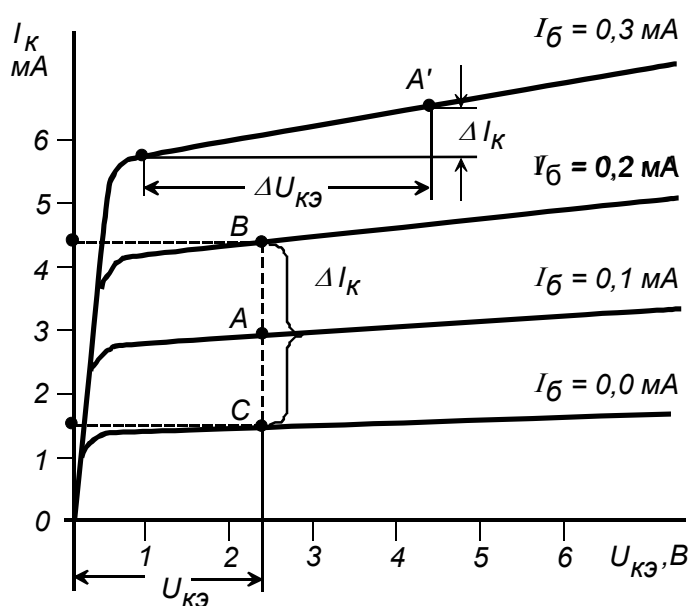
$\Delta I_K = 2,8 \text{ мА}$. Изменение ΔI_B равно разности значений тока базы для двух ближайших характеристик, проходящих через точки B и C : $\Delta I_B = 0,2 \text{ мА}$. Отсюда получаем, что в точке A

$$\beta_A = \Delta I_K / \Delta I_B |_{U_{кэ} = const} = 2.8 / 0.2 = 14.$$

По выходной характеристике транзистора определяется также величина выходного сопротивления

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_K |_{I_B = const}.$$

равного котангенсу угла наклона характеристики к оси напряжений. Графический способ определения $R_{вых}$ транзистора по выходной характеристике в точке A' в схеме с $OЭ$ представлен на рис.4.



В точке A :

$$\Delta I_K = 2,8 \text{ мА},$$

$$\Delta I_B = 0,2 \text{ мА}.$$

В точке A' :

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_K} \Big|_{I_K = const}.$$

Выходные вольт-амперные характеристики б.т. в схеме с $OЭ$

Рис. 4

Характеристики транзисторов имеют рабочую область, которая выделяется рядом ограничений: ограничение по величине коллекторного тока: $I_K \leq I_{к.доп.}$ (коллекторный ток должен быть меньше допустимого, обусловленного перегревом эмиттерного перехода); ограничение по величине коллекторного напряжения:

$|U_{кэ}| \leq |U_{кэ.доп.}|$ так как при большой величине $|U_{кэ}| > |U_{кэ.доп.}|$ может произойти пробой коллекторного перехода.

3. Экспериментальная часть.

Приборы и принадлежности: Принципиальная схема установка для измерения статических характеристик биполярного транзистора представлена

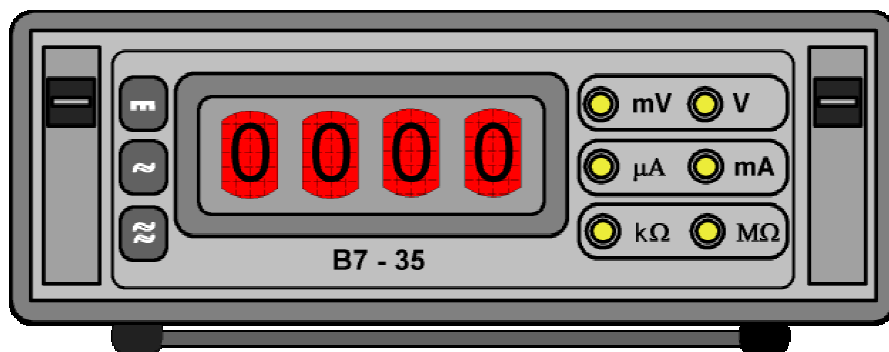


Рис. 7

Аналоговые приборы *M 2007 (В)* и *M 253 (мА)* (рис.8) и (рис. 9) служат для измерения напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ и тока коллектора $I_{к}$.



Рис. 8



Рис. 9

Источник питания *B5-47*, (рис. 10), обеспечивает схему стабилизированным постоянным напряжением.



Рис. 10

Изучаемый транзистор *МП40* и переключатели T_1 и T_3 расположены на панели управления (рис.11).

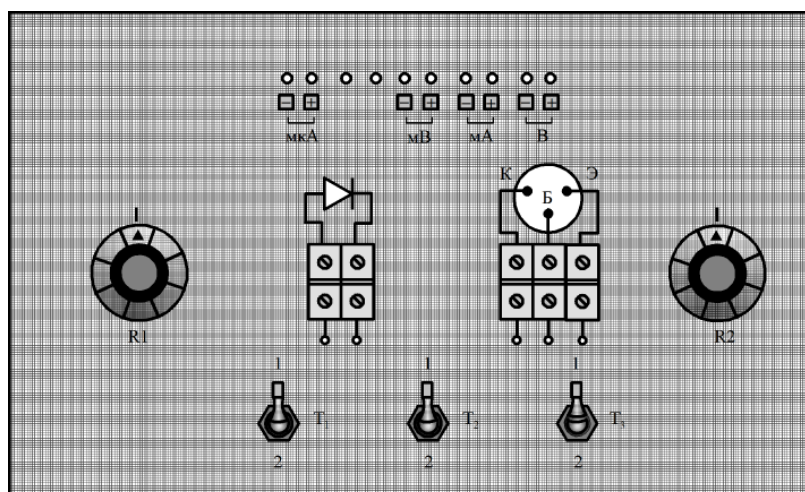


Рис. 11

Переключатель T_2 в этой работе не используется и может находиться в произвольном положении.

Подготовка установки к работе. Перед включением установки необходимо:

- а. Установить переключатели выходного напряжения и тока в источнике питания *Б5-47* равными соответственно 9 В и $2,55\text{ А}$.

б. Переключатель диапазона измерений микроамперметра *Щ300* установить в положение *1 мА*.

в. Переключатели выбора режима измерения милливольтметра

B7-35  (по левую и правую сторону лицевой панели, см. рис. 7)

установить в положения - постоянное напряжение



г. Установить переключатели диапазонов измерений вольтметра *M2007* и миллиамперметра *M253* в положения *7.5 В* и *7.5 мА* соответственно. Множители шкал этих приборов - в положение 2.

д. Установить переключатели T_1 и T_3 на панели управления (рис. 10) в положение 2. Ручки потенциометров R_1 и R_2 повернуть до упора против часовой стрелки. Как было сказано выше переключатель T_2 может находиться в произвольном положении.

Включение установки. Перед включением установки убедитесь в том, что на схему будет подано напряжение нужной полярности. Указатели полярности на вилке и розетке, однополюсных вилках и выходных клеммах *B5-47* должны совпадать. Включить источник питания *B5-47* и измерительные приборы *Щ300* и *B7-35*. Сетевые выключатели у первых двух приборов расположены на лицевых панелях, в приборе *B7-35* - справа на задней панели (это ползунок, который надо передвинуть вверх). После выполнения указанных операций и пятиминутного прогрева установка готова к измерениям.

4. Проведение измерений

Упражнение 1.

Измерение семейства входных статических характеристик транзистора *МП 40* в схеме с $\theta Э$, $I_{\theta} = f(U_{\theta э})|_{U_{кэ}=\text{const}}$.

а. Измерение первой входной характеристики при постоянном напряжении на коллекторе, $U_{кэ} = 0$.

Убедитесь в том, что напряжение $U_{кэ}=0В$. Далее, с помощью потенциометра R_1 установите первое значение I_{θ} из колонки (I_{θ} , $U_{к}$) *Таблицы данных 1* (см. Приложение). Результат измерения $U_{\theta э}$ запишите в соответствующую колонку той же таблицы. Аналогичные измерения выполните для всех значений I_{θ} . При установке тока базы необязательно добиваться целых значений, указанных в таблице. Если выставлено дробное

значение тока, внесите корректировку в таблицу данных у себя в тетради. После окончания измерений потенциометр R_1 верните в первоначальное положение.

б. Измерение второй входной статической характеристики при постоянном напряжении на коллекторе, $U_{кэ} = -5В$. Измерение входной характеристики при значениях $U_{кэ}$, отличных от нуля, осложняется тем, что необходимо поддерживать величину напряжения $U_{кэ}$ постоянной, так как при изменении $I_б$ изменяется и $U_{кэ}$. Напряжение $U_{кэ} = -5 В$ устанавливается с помощью потенциометра R_2 и в дальнейшем при изменении $I_б$ оно с помощью того же потенциометра поддерживается постоянным. Значения токов базы $I_б$, при которых проводятся измерения $U_{бэ}$, указаны в *Таблице данных 1*. Измерения и запись результатов проводятся так же как и при снятии первой входной характеристики.

После окончания измерений потенциометры R_1 и R_2 верните в первоначальное положение.

Упражнение 2

Измерение семейства выходных характеристик транзистора МП40 в схеме с ОЭ, $I_к = f(U_{кэ}) | I_б = const$.

Величину выходного напряжения $U_{кэ}$ устанавливают с помощью потенциометра R_2 . Величину входного тока базы $I_б$ устанавливают и поддерживают постоянной с помощью потенциометра R_1 . Величина $I_б$ является постоянным параметром выходной характеристики.

а. Измерение выходной характеристики $I_к = f(U_{кэ}) | I_б = 100 \text{ мкА}$.

Установите с помощью потенциометра R_1 величину тока базы $I_б = 100 \text{ мкА}$. Напряжения на коллекторе ($U_{кэ}$) устанавливайте согласно *Таблице данных 2*. Измеренные значения тока коллектора ($I_к$) запишите в *Таблицу данных 2* у себя в тетради.

б. Измерение выходной характеристики $I_к = f(U_{кэ}) | I_б = 200 \text{ мкА}$.

Установите с помощью потенциометра R_1 значение тока базы $I_б = 200 \text{ мкА}$. Напряжения на коллекторе ($U_{кэ}$) устанавливайте согласно *Таблице данных 2*. Измеренные значения тока коллектора ($I_к$) запишите в *Таблицу данных 2*.

После окончания измерений потенциометры R_1 и R_2 верните в первоначальное положение и выключите установку. В первую очередь выключают приборы ШЗ00 и В7-35, затем В5-47.

5. Обработка результатов измерений

Упражнение 1. Экспериментальные данные таблицы 1 используйте для построения графических зависимостей $I_{\bar{o}} = f(U_{\bar{o}\bar{э}})$ для коллекторных напряжений $U_{кэ} = 0В$ и $U_{кэ} = -5В$.

Графики к упражнению 1а и 1б постройте на одном листе миллиметровой бумаги.

Для тока $I_{\bar{o}} = 80 \text{ мкА}$ вычислите входное сопротивление транзистора $R_{вх}$ и входное сопротивление транзистора по постоянному току $R_{вх0}$, см. рис 3.

$$R_{вх} = \Delta U_{\bar{o}\bar{э}} / \Delta I_{\bar{o}} \Big|_{U_{кэ} = 0 В},$$

$$R_{вх} = \Delta U_{\bar{o}\bar{э}} / \Delta I_{\bar{o}} \Big|_{U_{кэ} = -5 В},$$

$$R_{вх0} = U_{\bar{o}\bar{э}} / I_{\bar{o}} \Big|_{I_{\bar{o}} = 80 \text{ мкА}}.$$

Упражнение 2. Экспериментальные данные таблицы 2 используйте для построения графических зависимостей $I_{к} = f(U_{кэ})$ для токов базы $I_{\bar{o}} = 100 \text{ мкА}$ и $I_{\bar{o}} = 200 \text{ мкА}$.

Графики к упражнению 2а и 2б постройте на одном листе миллиметровой бумаги.

Вычислите коэффициент усиления транзистора по току β_A в схеме с общим эмиттером при напряжении $U_{кэ} = -5В$, см. рис 4.

$$\beta_A = \Delta I_{к} / \Delta I_{\bar{o}} \Big|_{U_{кэ} = -5В}.$$

В точке В вычислите величину выходного сопротивления транзистора в схеме с общим эмиттером, см. рис 4.

$$R_{вых} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_{к} \Big|_{I_{\bar{o}} = 200 \text{ мкА}}.$$

6. Примечание.

При наличии времени по согласованию с преподавателем обработку результатов измерений можно провести в лаборатории на компьютере.

Обработка данных на компьютере позволяет:

а) отобразить результаты упражнений 1 и 2 в виде графиков,

б) для данных из упражнения 1 найти наилучшее представление их в аналитическом виде (в виде формулы)

$$I = A \cdot \exp(U / t),$$

где A и t константы представления.

в) Рассчитать входное сопротивление транзистора $R_{вх}$ по формуле

$$R_{вх} = dU/dI = t / (A \cdot \exp(U / t)).$$

г. Входное сопротивление транзистора по постоянному току $R_{вх0}$,

коэффициент усиления транзистора по току β_A и величина выходного сопротивления транзистора $R_{вых}$ вычисляются по формулам, приведенным в пункте 5 описания.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица данных 1

№	$I_{\bar{6}}$, мкА $U_{\kappa} = 0$ В	$U_{\bar{6}\bar{9}}$, мВ	
1	0	...	
2	10	...	
3	20	...	
4	40	...	
5	60	...	
6	80	...	
7	100	...	
8	150	...	
9	200	...	
10	250	...	
11	300	...	
	$I_{\bar{6}}$, мкА $U_{\kappa} = -5$ В		$U_{\bar{6}\bar{9}}$, мВ
1	0		...
2	10		...
3	20		...
4	40		...
5	60		...
6	80		...
7	100		...
8	150		...
9	200		...
10	230		...
11			

Таблица данных

2

№	$U_{кэ}, В$	I_k, mA $I_6 = 100 \mu A$	
1	0	...	
2	1	...	
3	2	...	
4	3	...	
5	4	...	
6	5	...	
7	6	...	
8	7	...	
9	8	...	
10	9	...	
	$U_{кэ}, В$		I_k, mA $I_6 = 200 \mu A$
1	0		...
2	1		...
3	2		...
4	3		...
5	4		...
6	5		...
7	6		...
8	7		...
9	8		...
10	9		...

ЛИТЕРАТУРА.

САВЕЛЬЕВ И.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие в 5 кн. Кн.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц - 4-е изд., перераб.- М.:Наука. Физматлит. 1998. - 368 с.

Глава 8. Электропроводность металлов и полупроводников.

§ 8.6. Электропроводность полупроводников.

Глава 9. Контактные и термоэлектрические явления.

§ 9.5. Полупроводниковые диоды и триоды.