

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 60

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Работу поставил доцент Антипов С.Д.

Москва 2012 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 внешних напряжений к БПТ. 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 называют ее эмиттером.

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

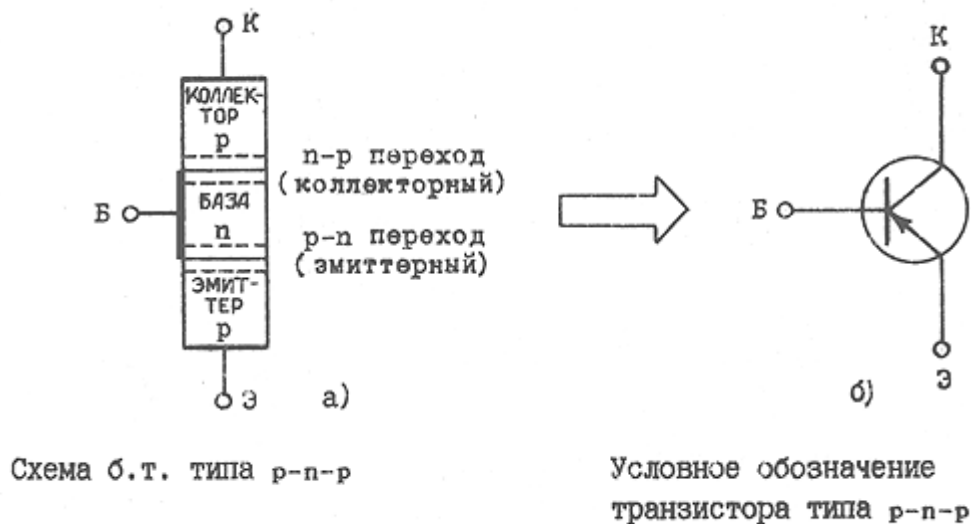


Рис. I

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* (см.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 тока или напряжения, воспроизводящий форму меньшего входного сигнала тока или напряжения, 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*.

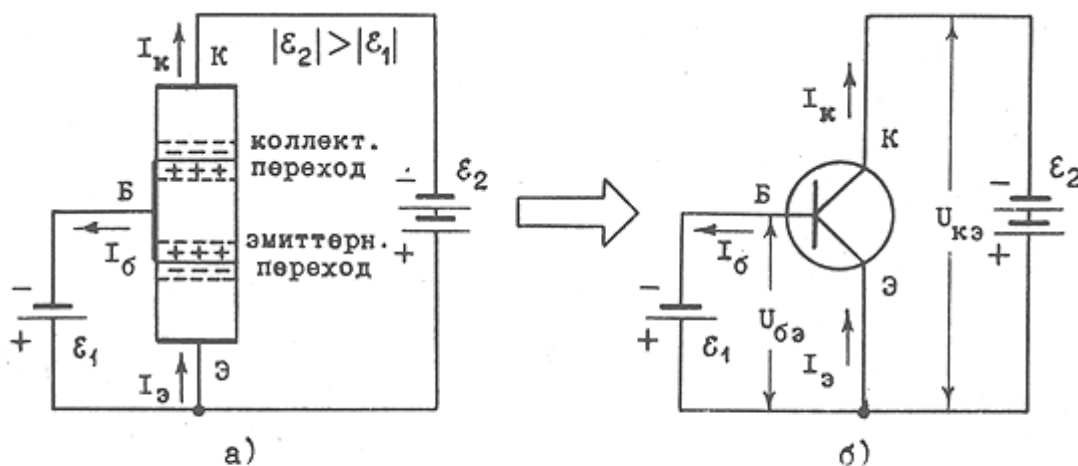


Рис.2 а,б. Схема включения б.т. с ОЭ и способ получения нужных потенциалов для электродов типа *р-п-р*: $|E_2| > |E_1|$.

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

а) к эмиттерному *р-п* переходу напряжение источника питания подается в прямом направлении, а к коллекторному *п-р* 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 *п-р-п* 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_σ , ток в цепи коллектора I_K и ток в цепи эмиттера I_Σ подчиняются 1-му

закону Кирхгофа:

$$I_{\Sigma} = I_{\delta} + I_K.$$

Из опыта известно, что приращение тока I_K прямо пропорционально приращению тока I_{δ} , т.е.

$$\Delta I_K = \beta \Delta I_{\delta},$$

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 E_1 подается в прямом направлении. Это означает, что под влиянием приложенного напряжения 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_{Σ} , т.е. $I_{\Sigma} \approx I_{\text{дырок}}$. 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 $l_0 \approx (0,3-0,5)$ 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 успевает рекомбинировать с электронами.

Рекомбинация дырок в базе вызывает соответствующий приток электронов по базовому выводу от источника питания E_I и следовательно, появление тока базы I_{δ} . Поэтому коллекторный ток I_K оказывается меньше эмиттерного тока I_{ϵ} на величину I_{δ} , т.е.

$$I_K = I_{\epsilon} - I_{\delta}.$$

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 $U_{\delta\epsilon}$ (см. рис.2), а напряжение между коллектором и эмиттером – $U_{K\epsilon}$.

2. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ 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_{δ} 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 вольт-амперные характеристики. Статической входной характеристикой транзистора называется график зависимости величины входного тока I_{BX} от величины входного напряжения U_{ex} при постоянном значении выходного напряжения $U_{\epsilon bx}$:

$$I_{ex} = f(U_{ex}) / U_{\epsilon bx} = const.$$

Статической выходной характеристикой транзистора называется график зависимости выходного тока $I_{\epsilon bx}$ от выходного напряжения $U_{\epsilon bx}$ при постоянном значении входного тока I_{ex} :

$$I_{\epsilon bx} = f(U_{\epsilon bx}) / I_{ex} = const.$$

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

напряжение - $U_{бэ}$.

Напряжение $U_{бэ}$ задается потенциометром R_1 , включенным в цепь источника питания \mathcal{E}_1 . Напряжение $U_{кэ}$ определяется потенциометром R_2 , включенным в цепь источника \mathcal{E}_2 .

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

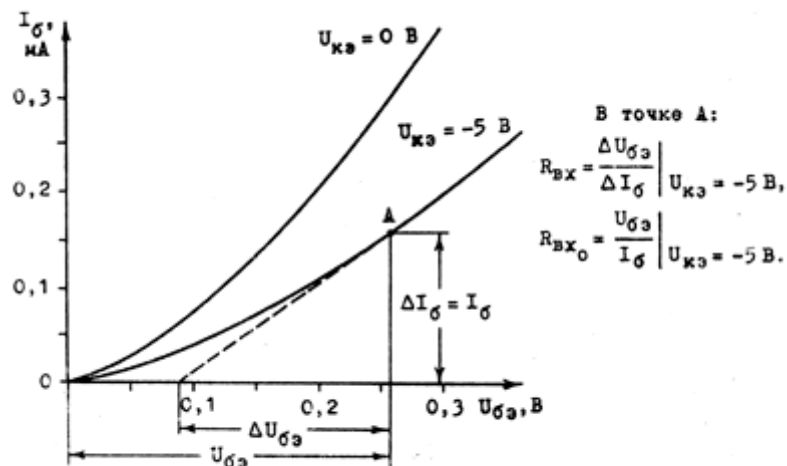


Рис. 3 Входные вольт-амперные характеристики б.т. в схеме с ОЭ

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 $U_{кэ} = 0 \text{ В}$ и $U_{кэ} = -5 \text{ В}$.

Величина входного сопротивления $R_{вх}$ транзистора в схеме с ОЭ определяется выражением

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

Эта величина определяется по статической входной характеристике. Пусть точка A на характеристике $I_{бэ}(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = -5 \text{ В}$ (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 $R_{вх}$ в точке A . Для этого проводим касательную к входной характеристике в данной точке A (штриховая линия на рис.3) до пересечения ее с осью абсцисс. Таким образом, величина $R_{вх}$ в точке A определяется величиной котангенса угла наклона касательной в рабочей точке к оси напряжений $U_{бэ}$.

Отношение постоянного напряжения на входе $U_{вх}$ к входному току $I_{вх}$ транзистора называется входным сопротивлением транзистора по постоянному току и обозначается $R_{вх0}$.

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

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

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

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

$$I_K = f(U_{кэ}) \big|_{I_{бэ} = const}.$$

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_K при небольшом росте $U_{кэ}$ (при достижении $|U_{кэ}| = |U_{бэ}|$ рост I_K резко уменьшается);

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

Небольшая величина угла наклона основного участка (активной области) выходной характеристики свидетельствует о слабой зависимости коллекторного тока I_K 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

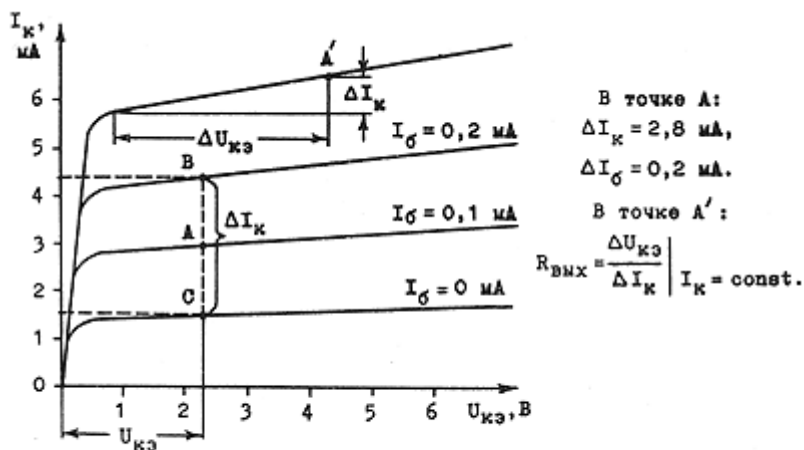


Рис. 4 Выходные вольт-амперные характеристики б.т. в схеме с $OЭ$

ней (точки B и C) проводятся прямые (горизонтальные штриховые линии), параллельные оси напряжений. Находим $\Delta I_K = 2,8 \text{ мА}$. Изменение $\Delta I_{бэ}$ равно разности значений тока базы для двух ближайших характеристик, проходящих через точки B и C : $\Delta I_{бэ} = 0,2 \text{ мА}$. Отсюда получаем, что в точке A

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

По выходной характеристике транзистора определяется также величина выходного сопротивления

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_K \big|_{I_{бэ} = const},$$

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

Характеристики транзисторов имеют рабочую область, которая выделяется рядом ограничений: ограничение по величине коллекторного тока: $I_K \leq I_{K, доп.}$ (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: Измерительный стенд с транзистором МП 40; измерительные приборы, присоединяемые к клеммам измерительного стенда: микроамперметр, милливольтметр, миллиамперметр, вольтметр.

Упражнение 1

СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА ВХОДНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА МП-40 В СХЕМЕ С ОЭ-

$$I_{бэ} = f(U_{бэ}) / U_{кэ} = const$$

Собирается установка по схеме, представленной на рис.5.

Входной ток базы I_b измеряется микроамперметром (мкА), включенным между точками 1 и 2. Входное напряжение $U_{бэ}$ определяется милливольтметром

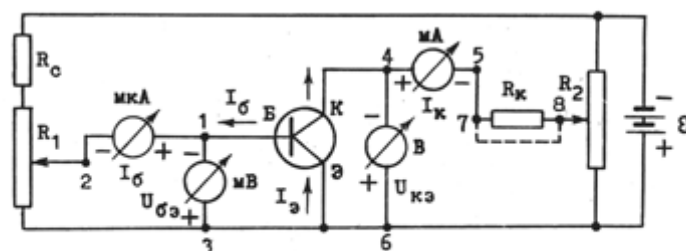


Рис. 5 Схема экспериментальной установки для снятия входных и выходных вольт-амперных характеристик

(мВ), подсоединенным к точкам 1 и 3. Величину входного напряжения изменяют с помощью потенциометра R_1 . Величина тока I_b здесь не должна превышать 1 мА, для чего служит ограничительное сопротивление R_0 .

Входной ток коллектора I_K измеряется миллиамперметром (мА) (между точками 4 и 5). Выходное напряжение $U_{кэ}$ определяется вольтметром (В) (между точками 4 и 6). Величина напряжения $U_{кэ}$ изменяется с помощью потенциометра

R_2 . Сопротивление R_k , при снятии статических характеристик “закорачивается”, т.е. точки 7 и 8 соединяются коротким проводником. В исходном состоянии ручки потенциометров R_1 и R_2 должны быть повернуты в нулевое положение.

З а д а н и е

а. Снимите первую входную характеристику $I_{\delta} = f(U_{\delta\epsilon}) / U_{K\epsilon} = 0 \text{ В}$, (здесь $U_{K\epsilon}$ - параметр характеристики).

С помощью потенциометра R_2 установите значение $U_{K\epsilon} = 0 \text{ В}$. Изменяя с помощью R_1 величину $U_{\delta\epsilon}$ (при значениях $U_{\delta\epsilon}$ от 0 мВ до 180 мВ через 20 мВ , отсчитываемых по милливольтметру мВ) снимите отсчеты I_{δ} по микроамперметру (мкА).

б. Снимите вторую входную статическую характеристику при $U_{K\epsilon} = -5 \text{ В}$. Снятие входной характеристики при значениях $U_{K\epsilon}$, отличных от нуля, осложняется тем, что необходимо поддерживать величину напряжения $U_{K\epsilon}$ постоянной, так как при изменении $U_{\delta\epsilon}$ изменяется и $U_{K\epsilon}$. Поэтому с помощью потенциометра R_2 устанавливается $U_{K\epsilon} = -5 \text{ В}$ и в дальнейшем при изменении $U_{\delta\epsilon}$ оно поддерживается постоянным. Отсчеты I_{δ} проводите при значениях $U_{\delta\epsilon}$ от 0 мВ до 200 мВ через 20 мВ . Обе зависимости следует занести в табл.1. Графики обеих характеристик необходимо построить на миллиметровой бумаге на одном чертеже.

Таблица 1

$U_{K\epsilon} = 0 \text{ В}$		$U_{K\epsilon} = -5 \text{ В}$	
$U_{\delta\epsilon} (\text{мВ})$	$I_{\delta} (\text{мкА})$	$U_{\delta\epsilon} (\text{мВ})$	$I_{\delta} (\text{мкА})$
0		0	
20		20	
...		...	

В. Определите графически величину входных сопротивлений транзистора по построенным характеристикам, пользуясь соотношениями:

$$R_{ex} = \Delta U_{ex} / \Delta I_{ex} = \Delta U_{\delta\epsilon} / \Delta I_{\delta} / U_{K\epsilon} = 0 \text{ В},$$

$$R_{ex} = \Delta U_{ex} / \Delta I_{ex} = \Delta U_{\delta\epsilon} / \Delta I_{\delta} / U_{K\epsilon} = -5 \text{ В},$$

$$R_{ex0} = U_{\delta\epsilon} / I_{\delta} / U_{K\epsilon} = \text{const}$$

при $I_{\delta} = 50, 100, 150, 200, 250 \text{ мкА}$.

Упражнение 2

СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА МП-40 В СХЕМЕ С ОЭ ,

$$I_K = f(U_{KЭ}) / I_Б = const$$

Величину выходного напряжения устанавливают с помощью выходного потенциометра R_2 , которое измеряют вольтметром (B). Соответствующие значения коллекторного тока отсчитывают по миллиамперметру (mA). Величину входного базового тока $I_Б$ поддерживают постоянной с помощью потенциометра R_1 . Величина $I_Б$ является постоянным параметром выходной характеристики.

З а д а н и е

а. Снимите выходную характеристику

$$I_K = f(U_{KЭ}) / I_Б = 100 \text{ мкА}.$$

Установите с помощью потенциометра R_1 величину тока базы $I_Б = 100 \text{ мкА}$. Для каждого значения $U_{KЭ}$ запишите соответствующие значения I_K (mA). В начальной области точки для $U_{KЭ}$ берите через $0,1 - 0,2 \text{ В}$, а после $U_{KЭ} = 1 \text{ В}$ - через интервал в 1 В до значения $U_{KЭ} = 10 \text{ В}$. Постройте на миллиметровке по полученным значениям $U_{KЭ}$ и I_K выходную характеристику

$$I_K = f(U_{KЭ}) / I_Б = 100 \text{ мкА} ,$$

а. Установив с помощью потенциометра R_1 значение тока базы $I_Б = 300 \text{ мкА}$, снимите следующую выходную статическую характеристику

$$I_K = f(U_{KЭ}) / I_Б = 300 \text{ мкА} .$$

Значения $I_Б$ поддерживайте постоянными с помощью потенциометра R_1 . Данные запишите в табл.2.

Таблица 2

$I_Б = 100 \text{ мкА}$		$I_Б = 300 \text{ мкА}$	
$U_{KЭ} \text{ (мВ)}$	$I_K \text{ (мкА)}$	$U_{KЭ} \text{ (мВ)}$	$I_K \text{ (мкА)}$
0		0	
0,1		0,1	
...		...	

Постройте обе выходные характеристики на одном чертеже.

в. Определите коэффициенты усиления по току в схеме с ОЭ по точкам пересечения выходных характеристик с прямой $U_{KЭ} = -5 \text{ В}$ используя формулу

$$\beta_A = \Delta I_K / \Delta I_Б / U_{KЭ} = const$$

для $I_Б = 100 \text{ мкА}$ и 300 мкА .

г. Определите величины выходных сопротивлений транзистора в схеме с ОЭ по выходным статическим характеристикам (см.рис.4), используя соотношение

$$R_{вых} = \Delta U_{КЭ} / \Delta I_{к} / I_{б} = const$$

для $I_{б} = 100 \text{ мкА}$ и 300 мкА .

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.