

Лабораторная работа 3

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Цель работы

Снятие и анализ входных и выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером и определение по ним его h -параметров

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Транзистор — это полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов в широком диапазоне частот (от постоянного тока до десяти гигагерц) и мощности (от десятков милливатт до сотен ватт).

Различают биполярные транзисторы, в которых используются кристаллы n - и p -типа, и полевые (униполярные) транзисторы, изготовленные на кристалле германия или кремния с одним типом проводимости.

1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярные транзисторы — это полупроводниковые приборы, выполненные на кристаллах со структурой p - n - p -типа (*а*) или n - p - n -типа (*б*) с тремя выводами, связанными с тремя слоями (областями): коллектор (K), база (B) и эмиттер (\mathcal{E}) (рис. 1*а* и *б*). Ток в таком транзисторе определяется движением зарядов двух типов: электронов и дырок. Отсюда его название — *биполярный транзистор*.

Физические процессы в транзисторах p - n - p -типа и n - p - n -типа одинаковы. Отличие их в том, что токи в базах транзисторов p - n - p -типа переносятся основными носите-

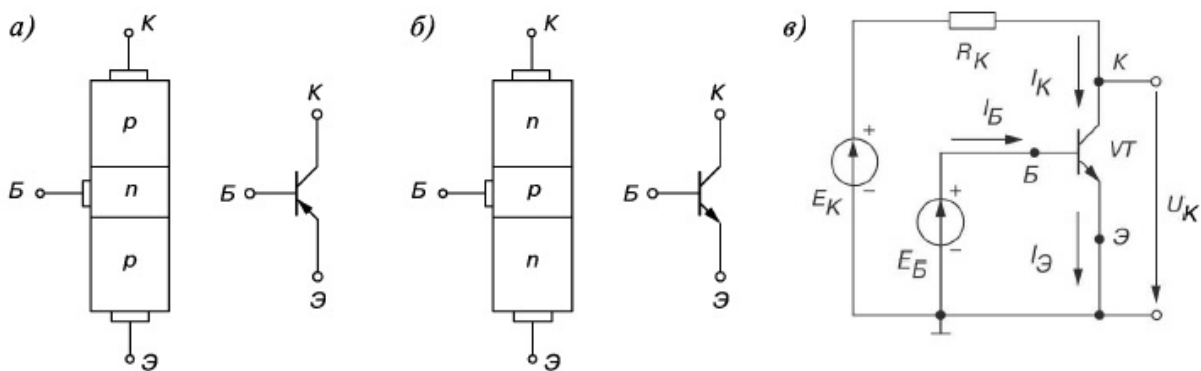


Рис. 1

лями зарядов — дырками, а в транзисторах $n-p-n$ -типа — электронами. Каждый из переходов транзистора — эмиттерный ($B-E$) и коллекторный ($B-K$) — можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

- режим *отсечки* — оба $p-n$ -перехода закрыты, при этом через транзистор протекает сравнительно небольшой ток I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов;
- режим *насыщения* — оба $p-n$ -перехода открыты;
- *активный* (усилительный) режим — один из $p-n$ -переходов открыт, а другой закрыт.

В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует. В активном режиме транзистор выполняет функцию *активного элемента* электрических схем усиления сигналов, генерирования колебаний, переключения и т. п.

Подав положительный потенциал ЭДС источника E_K на коллектор и отрицательный на эмиттер (рис. 1.6) в схеме включения транзистора $n-p-n$ -типа с общим эмиттером (с ОЭ), мы тем самым открыли эмиттерный переход $E-B$ и закрыли коллекторный $B-K$, при этом ток коллектора $I_{K0} = I_{E0} = I_0$ мал, он определяется концентрацией неосновных носителей (дырок в данном случае) в коллекторе и базе.

Если между эмиттером и базой приложить небольшое напряжение (0,3—0,5 В) в прямом направлении $p-n$ -перехода $E-B$, то происходит *инжекция* электронов из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера I_E . В базе электроны частично рекомбинируют со свободными дырками, но одновременно от внешнего источника напряжения ($E_B < E_K$) в базу приходят новые дырки, образуя ток базы I_B .

Так как база в транзисторе выполняется в виде тонкого слоя, то только незначительная часть электронов рекомбинирует с дырками базы, а основная их часть достигает коллекторного перехода. Эти электроны захватываются электрическим полем коллекторного перехода, являющегося ускоряющим для электронов. Ток электронов, попавших из эмиттера в коллектор, замыкается через резистор R_K и источник напряжения с ЭДС E_K , образуя ток коллектора I_K во внешней цепи.

Токи транзистора в схеме включения с ОЭ (см. рис. 1.6), работающего в активном режиме, связаны уравнением

$$I_E = I_K + I_B$$

Отношение тока коллектора к току эмиттера называют *коэффициентом передачи тока*

$$\alpha \approx I_K / I_E | U_{BE} = \text{const} = 0,96 - 0,995 < 1,$$

откуда ток базы

$$I_B = I_E - I_K = (1 - \alpha)I_E - I_{K0} \ll I_E,$$

где $I_{K0} = 0,1-10$ мкА у кремниевых и $I_{K0} = 10-100$ мкА у германиевых транзисторов.

Схема включения транзистора с ОЭ является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Транзистор может работать на постоянном токе, малом переменном сигнале, большом переменном сигнале и в ключевом (импульсном) режиме.

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным их влиянием друг на друга. На рис. 2 представлены семейства входных $I_B=f(U_B)|U_K=const(a)$ и выходных $I_K=f(U_K)|U_B=const(b)$ статических характеристик транзистора в схеме с ОЭ. Они могут быть получены в результате эксперимента или расчета.



Рис. 2

Семейства характеристик, которые связывают напряжения и токи на выходе с токами и напряжениями на входе, называют *характеристиками передачи*, или *управляющими характеристиками*. В качестве примера на рис. 2а приведена управляющая характеристика по току транзистора (коэффициент передачи тока) при напряжении $U_K=const$, то есть

$$I_K = f(I_B) |_{U_K=const}.$$

Входные и выходные характеристики транзистора обычно приводятся в справочниках (каталогах) транзисторов, которые широко используют для анализа работы транзисторов и расчета схем при больших сигналах.

В режиме усиления *малых сигналов* транзистор в схеме с ОЭ часто представляют в виде линейного четырехполюсника, входные и выходные параметры которого связаны следующими уравнениями:

$$\Delta U_B = h_{11Э} \Delta I_B + h_{12Э} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21Э} \Delta I_B + h_{22Э} \Delta U_K,$$

где $h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K=const}$ ($\Delta U_K = 0$) - входное динамическое сопротивление транзистора

($h_{11Э} = 100 - 1000 \text{ Ом}$);

$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_K} \right|_{I_B=const}$ ($\Delta I_B = 0$) - безразмерный коэффициент

внутренней обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах 0,002—0,0002 (при расчетах им часто пренебрегают, то есть полагают равным нулю);

$$h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = \text{const}} \quad (\Delta U_K = 0) \text{ — коэффициент передачи (усиления) тока при постоянном}$$

напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10\text{—}200$;

$$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_K} \right|_{I_B = \text{const}} \quad (\Delta I_B = 0) \text{ — выходная проводимость транзистора при постоянном}$$

токе базы ($h_{22Э} = 10^{-4} - 10^{-6}$).

Параметры схемы замещения транзистора с ОЭ в h -форме определяют по его входным и выходным характеристикам (см. рис. 2).

2. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ

Входные и выходные вольтамперные характеристики транзисторов обычно снимают на постоянном токе (по точкам) или с помощью специальных приборов — характериографов, позволяющих избежать сильного нагрева приборов. Полученные ВАХ используют для расчета цепей смещения и стабилизации режимов работы, расчета конечных состояний ключевых схем (режимов отсечки и насыщения).

Входные характеристики $I_B(U_B)$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ биполярных транзисторов, включенных по схеме с ОЭ (см. рис. 2а), имеют вид, аналогичный характеристикам диодов: ток базы экспоненциально возрастает с увеличением напряжения база-эмиттер при заданном напряжении на коллекторе. Ввиду ничтожно малых токов затвора I_3 полевых транзисторов, включенных по схеме с ОИ, их входные ВАХ, как правило, не снимают.

Как отмечалось, выходные характеристики биполярных транзисторов $I_K(U_K)$ при $I_B = \text{const}$, включенных по схеме с ОЭ (см. рис. 2б), определяют зависимость выходного тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при заданных значениях тока базы, а выходные характеристики полевых транзисторов $I_C(U_C)$ при $U_3 = \text{const}$, включенных по схеме с ОИ, определяют зависимость тока стока от напряжения между стоком и истоком при фиксированном напряжении затвора.

УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1. Запустить среду **EWB**. На рабочем поле среды **EWB** собрать схему для снятия ВАХ биполярных транзисторов с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3а).

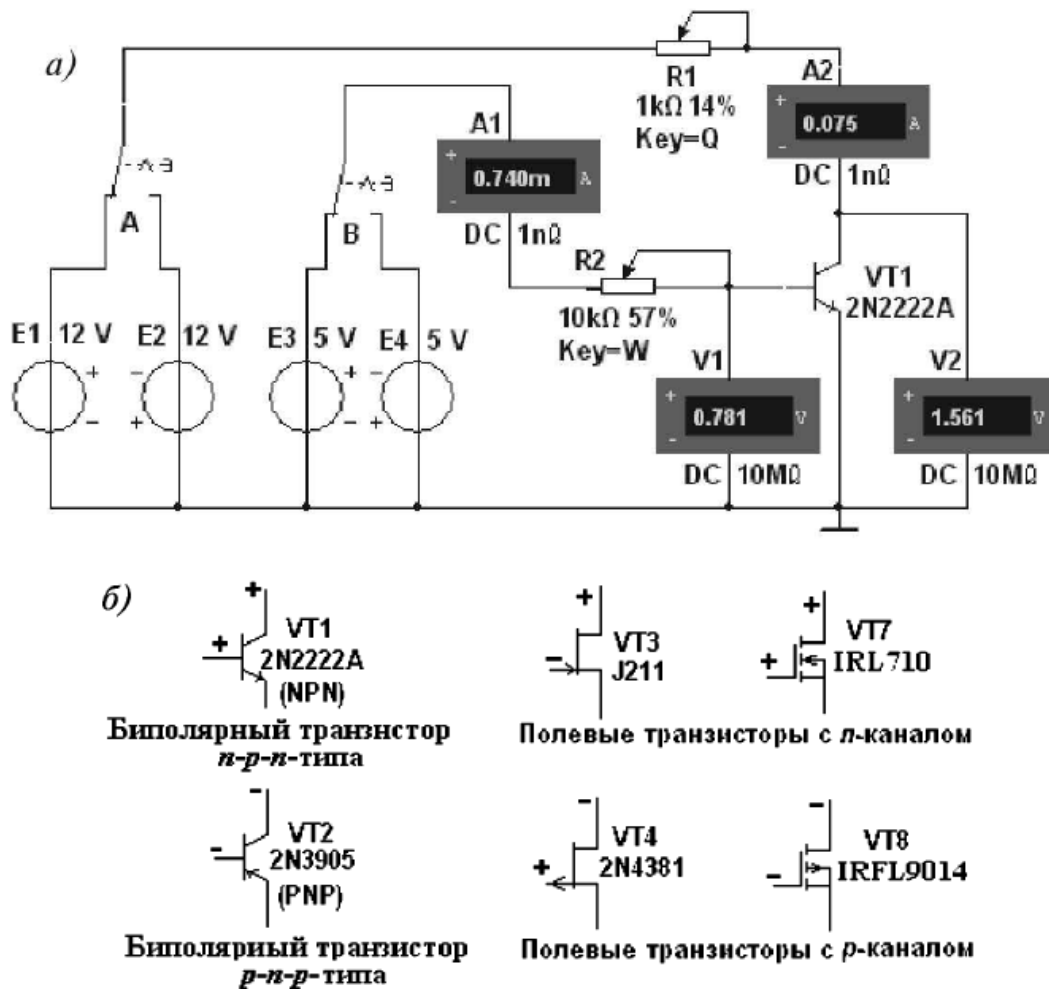


Рис. 3

В схему **включить** следующие компоненты:

- источники **E1** и **E2** постоянного напряжения, к одному из которых с помощью переключателя **A** подключается коллектор биполярного транзистора. Выбор источника питания зависит от знака полярности коллектора (стока) соответствующего транзистора (см. рис. 3б);
- источники **E3** и **E4** постоянного напряжения для включения с помощью переключателя **B** одного из них в цепь базы (затвора) соответствующего транзистора;
- два потенциометра **R1** и **R2** для задания токов в цепях транзисторов;
- два амперметра **A1** и **A2** и два вольтметра **V1** и **V2** для измерения токов и напряжений на электродах исследуемого транзистора.

Основные параметры транзисторов, предлагаемых для испытания в работе, даны в табл. 1.

Задание 2. Снять и построить (по точкам) семейство входных $I_B(U_B)$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ семейство выходных $I_K(U_K)$ при $I_B = \text{const}$ ВАХ соответствующего биполярного транзистора (см. табл. 1).

Для этого:

- **заменить** транзистор в схеме испытания на рекомендованный тип;

Таблица 1

Номер записи фамилии N	Тип транзистора	$U_{К.маx}$ ($U_{C.маx}$), В	$I_{К.маx}$ ($I_{C.маx}$), А	$h_{21Э}$	S , мА/В	U_{30} ($U_{3.пор}$), В	$f_{маx}$, МГц	$P_K(P_C)$, Вт
Нечетные	2N2222A	10	0,077	30-300	-	-	300	1,5
Четные	2N3906	40	0,2	30-300	-	-	250	0,625

- в соответствии со знаком полярности коллектора и базы исследуемого транзистора **выбрать** источники напряжения, **задать** их ЭДС и **установить** переключатели **А** и **В** в соответствующие положения;
- изменяя сопротивления потенциометров **R1** и **R2** и, при необходимости, ЭДС источников **E1, ..., E4**, **вносить** показания приборов в табл. 2 и 3;
- по данным измерений **построить** графики семейств входных и выходных **ВАХ** (см. рис. 2а и б);
- **скопировать** изображение схемы с показаниями приборов (для одного из режимов работы при снятии выходной ВАХ) на страницу отчета;
- воспользовавшись графиками семейств входных и выходных ВАХ, **определить** h -параметры биполярного транзистора.

Таблица 2

Ток базы I_B , мкА		50	100	200	300	400	500
Напряжение $U_{БЭ}$, В при $U_{КЭ}$, В	0						
	5						

Таблица 3

Напряжение $U_{КЭ}$, В		0,1	0,5	1	5	8	12
Ток коллектора I_K , мА при I_B , мкА	50						
	100						
	200						
	300						
	400						
	500						

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.

2. Перечень приборов, использованных в экспериментах, с их краткими характеристиками.
3. Таблицы результатов измерений и расчетов h -параметров биполярного транзистора.
4. Изображения электрических схем испытания биполярного транзистора и семейств входных и выходных ВАХ транзисторов.
5. Выводы по работе.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАБОТЕ 3

1. Назовите **режимы** работы биполярного транзистора и дайте им краткую характеристику.
2. Укажите, какой **формулой** описывается коэффициент передачи по току $h_{21Э}$ биполярного транзистора:
 $h_{21Э} = \Delta U_{КЭ} / \Delta I_{К} | I_{Б} = const$; $h_{21Э} = (\alpha - 1) / \alpha$;
 $h_{21Э} = \Delta I_{К} / \Delta I_{Э}$; $h_{21Э} = \Delta I_{К} / \Delta I_{Б} | U_{КЭ} = const$.
3. Укажите, в какой **схеме включения** биполярного транзистора:
 а) *максимальное входное сопротивление:*
 в схеме с ОЭ; в схеме с ОБ; в схеме с ОК;
 б) *максимальный коэффициент усиления по мощности:*
 в схеме с ОЭ; в схеме с ОБ; в схеме с ОК.
4. Каков **физический смысл** h -параметров и при каких условиях их определяют?
5. Укажите, какая **схема включения** биполярного транзистора наиболее распространена:
 схема с ОЭ; схема с ОК; схема с ОБ.

Расшифровка параметров транзисторов из библиотек EWB

Таблица 4

Наименование параметра	Обозначение и значение параметра в EWB	Обозначение и значение параметра в описании
Обратный ток коллекторного перехода	IS = 0,2046 pA	$I_{K0} = 0,2046$ пА
Идеальный максимальный коэффициент усиления ток в схеме с ОЭ	BF = 296,5	$H_{21Э} = \beta = 296,5$
Напряжение, близкое к максимальному напряжению коллектора	VAF = 10V	$U_{К,max} = 10$ В
Обратный ток эмиттерного перехода	ISE = 0,1451 pA	$I_{Э0} = 0,1451$ пА
Максимальный ток коллектора	IKF = 77,25 mA	$I_{К,max} = 77,25$ мА
Объемное сопротивление базы	RB = 4 Ω	$R_{Б} = 4$ Ом
Объемное сопротивление эмиттера	RE = 85,73 m Ω	$R_{Э} = 85,73$ мОм
Объемное сопротивление коллектора	RC = 0,4286 Ω	$R_{К} = 0,4283$ Ом
Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	VJE = 0,95 V	$E_{БЭ} = 0,95$ В
Контактная разность потенциалов перехода база-	VJC = 0,4 V	$E_{БК} = 0,4$ В

коллектор		
Емкость эмиттерного перехода при нулевом напряжении	$C_{JE} = 11 \text{ pF}$	$C_{Э} = 11 \text{ пФ}$
Емкость коллекторного перехода при нулевом напряжении	$C_{JC} = 32 \text{ pF}$	$C_{К} = 32 \text{ пФ}$
Время переноса заряда через базу	$T_F = 0,3 \text{ nsec}$	$F_{\text{пер}} = 0,3 \text{ нс}$