

Лабораторная работа №2

1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярные транзисторы представляют собой два встречноключенных взаимодействующих р-п-перехода. Взаимодействие переходов происходит через тонкую область базы, ширина которой в современных транзисторах составляет менее 1 мкм. На рис. 1 приведены условные графические обозначения биполярных транзисторов п-р-п-типа проводимости (рис. 1,а) и р-п-р-типа проводимости (рис. 1,б).

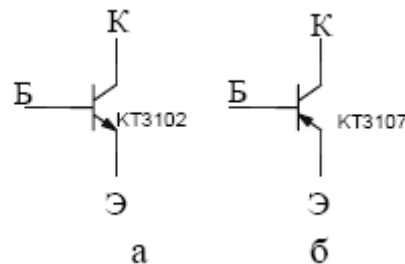


Рис. 1

Для расчета схем на биполярных транзисторах используются различные эквивалентные схемы транзисторов. Приближенные расчеты производятся с помощью Т-образной эквивалентной схемы. Малосигнальная эквивалентная схема транзистора при включении с общей базой (ОБ) приведена на рис. 2.

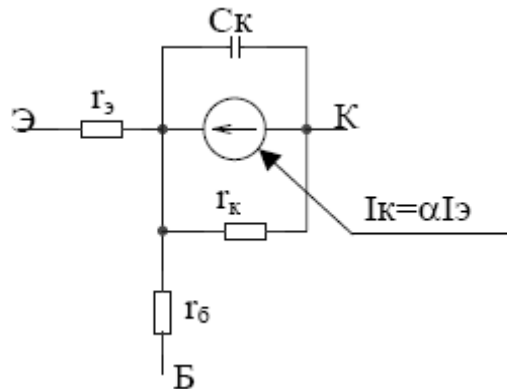


Рис. 2

На рис. 2 обозначено: r_Σ – дифференциальное сопротивление прямосмещенного эмиттерно-базового перехода; α – коэффициент усиления по току в схеме с ОБ; r_K – выходное дифференциальное сопротивление транзистора в схеме с ОБ; C_K – емкость обратносмещенного коллекторно-базового перехода; r_δ – объемное сопротивление области базы.

В программах схемотехнического моделирования используются более сложные эквивалентные схемы, обеспечивающие высокую точность расчетов. К таким схемам относятся модель Гуммеля-Пуна (интегральная зарядовая модель) и более простая модель Эберса-Молла.

1.1. Измерение параметров биполярных транзисторов

Биполярные транзисторы характеризуются рядом физических параметров, на основе которых рассчитываются параметры математических моделей транзисторов, используемых в программах схемотехнического моделирования аналоговых и цифро-аналоговых схем. Расчет производится с помощью программ Parts, Model Editor, входящих в состав некоторых программ схемотехнического моделирования. Ниже рассматриваются методы измерения параметров транзисторов, вводимых в программы расчета параметров математических моделей транзисторов.

В схемах приняты следующие обозначения:

- PA – амперметр;
- PV – вольтметр;
- PA_{пост} , PV_{пост} – приборы для измерения постоянных токов и напряжений;
- PV_{пер} , PA_{пер} – приборы для измерения переменных токов и напряжений.

1.1.1. Измерение характеристик $U_{бэ\text{ нас}}=f(I_k)$, $U_{кэ\text{ нас}}=f(I_k)$

Измерение характеристик производится в статическом режиме при постоянном отношении $I_k/I_b=10$. Измерительная схема приведена на рис. 3.

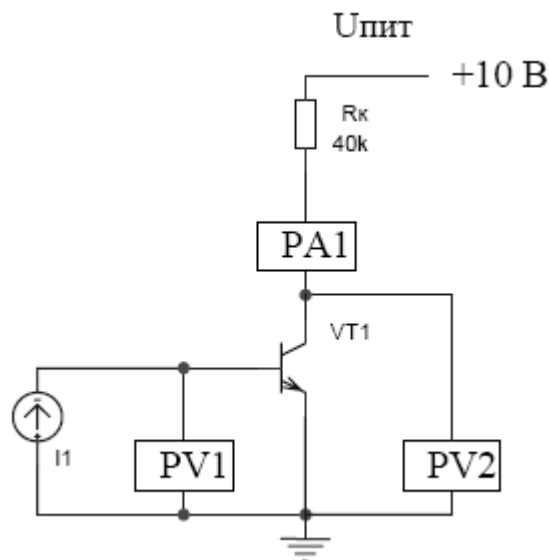


Рис. 3

Ток коллектора в режиме насыщения равен:

$$I_{k\text{ нас}} = (U_{\text{пит}} - U_{кэ\text{ нас}}) / R_k \approx U_{\text{пит}} / R_k,$$

где $U_{кэ\text{ нас}}$ – напряжение насыщения транзистора VT1.

Генератор тока I_1 задает ток в базу транзистора VT1. Величина тока базы выбирается равной $0,1I_{K_{нас}}$. Вольтметры PV1 и PV2 измеряют напряжение эмиттер-база и коллектор-база транзистора VT1 в режиме насыщения. Ток коллектора измеряется амперметром PA1. Изменяя сопротивление резистора R_k от 1кОм до 40кОм и задавая ток базы $0,1I_{K_{нас}}$, снимаем зависимости $U_{бэ_{нас}}$ и $U_{кэ_{нас}}$ как функцию от тока коллектора I_k при постоянном отношении $I_k/I_b=10$. Результаты измерений заносятся в табл. 1.

Таблица 1

$I_k, \text{мА}$	$I_b, \text{мкА}$	$U_{бэ \text{ нас}}, \text{В}$	$U_{кэ \text{ нас}}, \text{В}$

1.1.2. Измерение выходного сопротивления транзистора

Измерение выходного сопротивления $R_{вых}$ в схеме с общим эмиттером (ОЭ) производится в статическом режиме с использованием выходной вольтамперной характеристики транзистора (рис. 4).

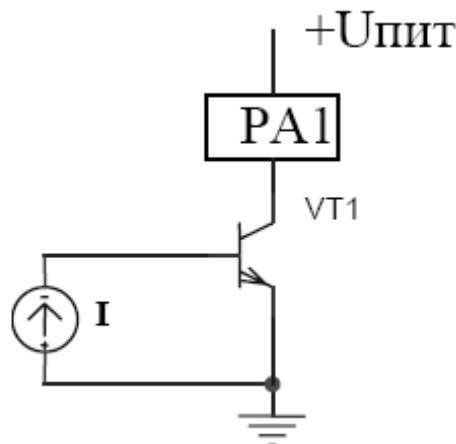


Рис. 4

Ток базы транзистора VT1 задается постоянной величины. Выбираются такие значения тока базы, чтобы ток коллектора лежал в пределах от $0,1$ до 10 мА . Выходная характеристика транзистора приведена на рис. 5.

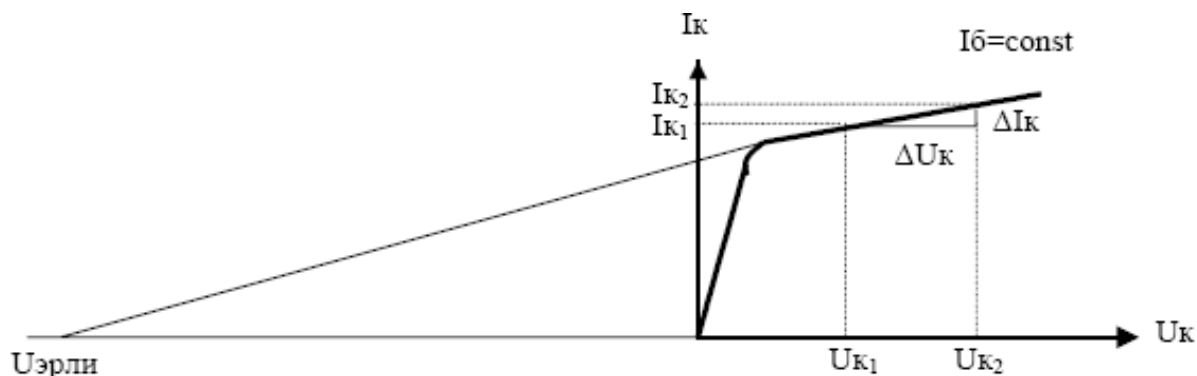


Рис. 5

Увеличивая напряжение питания, например, от 5 до 6 В ($\Delta U_K = U_{K2} - U_{K1} = 1\text{В}$), измеряем приращение тока коллектора $\Delta I_K = I_{K2} - I_{K1}$.

Выходное сопротивление транзистора рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{вых}} = \Delta U_K / \Delta I_K.$$

Выходные характеристики транзистора, продленные в левую полуплоскость, сходятся на оси U_K в одну точку, которая определяет напряжение Эрли.

Напряжение Эрли можно рассчитать по формуле:

$$U_{\text{Эрли}} \approx I_{K1} R_{\text{вых}}.$$

Измерения проводятся при токах коллектора от 0,1 до 10 мА.

1.1.3. Измерение коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером в статическом режиме

Схема, с помощью которой измеряется интегральный коэффициент усиления по току биполярного транзистора **В**, приведена на рис. 6.

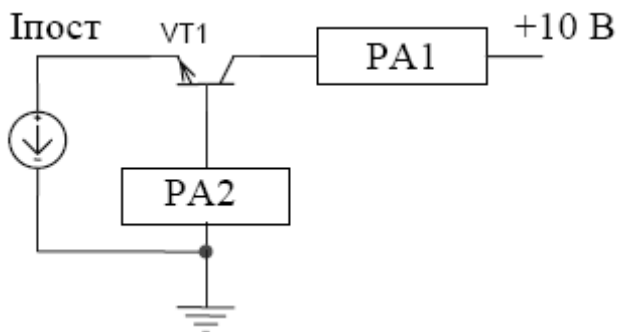


Рис. 6

В цепь эмиттера включен источник тока, задающий ток в статическом режиме. Амперметрами измеряются постоянные токи в цепях базы и коллектора I_B и I_K . Коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером в статическом режиме (интегральная характеристика)

рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{B} = I_k / I_0.$$

Величины **B** измеряются при различных значениях постоянного тока эмиттера (от 0.1 до 50 мА). Строится зависимость $\mathbf{B} = f(I_k)$ (рис. 7), из которой определяется максимальное значение **B** для статического режима.

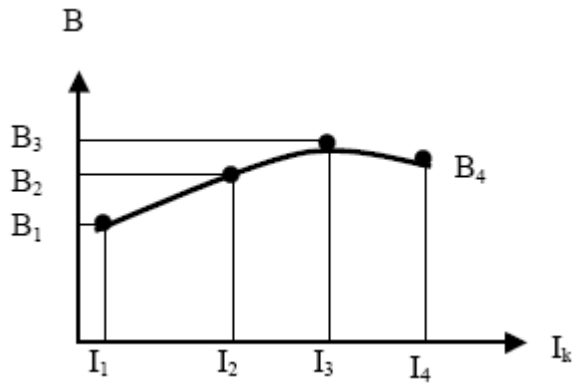


Рис. 7

1.1.4. Измерение емкости обратносмещенного коллекторно-базового перехода C_k

Измерительная схема приведена на рис. 8.

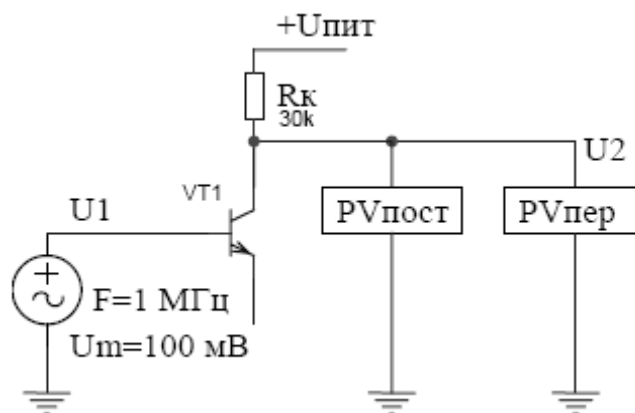


Рис. 8

Емкость обратно-смещенного коллекторно-базового перехода C_k образует с сопротивлением резистора R_k делитель напряжения. Измерив значения переменных напряжений U_1 и U_2 , можно рассчитать емкость C_k по формуле:

$$C_k = \frac{U_2}{2\pi F R_k (U_1 - U_2)},$$

где F – частота источника синусоидального напряжения.

Для повышения точности определения емкости C_k сопротивление

R_k подбирается таким, чтобы $U_2 \approx 0,5U_1$. Измерения производятся при различных значениях постоянного напряжения коллектор-база путем изменения напряжения питания от 1 до 10 В. Строится зависимость $S_k=f(U_{кб})$. Аналогично может быть измерена емкость обратно-смещенного эмиттерно- базового перехода.

1.1.5. Измерение времени рассасывания

Экспериментально время рассасывания накопленного в транзисторе заряда определяется по схеме рис. 9.

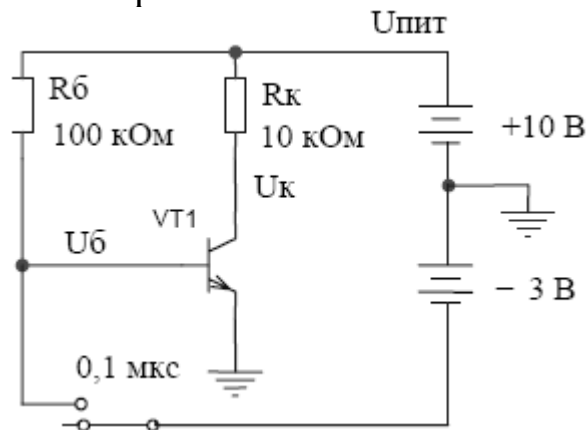


Рис. 9

Токи коллектора и базы в режиме насыщения рассчитываются по формулам:

$$I_{k_{\text{нас}}} \approx \frac{U_{\text{пит}}}{R_k}; \quad I_{б_{\text{нас}}} \approx \frac{U_{\text{пит}} - 0,7\text{В}}{R_6}.$$

Отношение токов $I_{k_{\text{нас}}}/I_{б_{\text{нас}}}$ выбрано равным 10.

В исходном состоянии транзистор VT1 находится в режиме насыщения. Затем на вход схемы через реле времени подается запирающее напряжение -3 В. При этом ток базы скачкообразно изменяется от $I_{б1}$ до $-I_{б2}$. Далее выполняется команда Analysis/Transient, в диалоговом окне устанавливается конечное время моделирования (0,2 мкс), номера узлов $U_б$ и $U_к$ и нажимается кнопка Simulate. (Для определения номеров узлов необходимо сделать их видимыми по команде Circuit/Schematic Options/Show и простановкой галочки в строке Show nodes). В окне Analysis Graphs с помощью двух курсоров измеряется время рассасывания $t_{\text{рас}}$ (рис. 10).

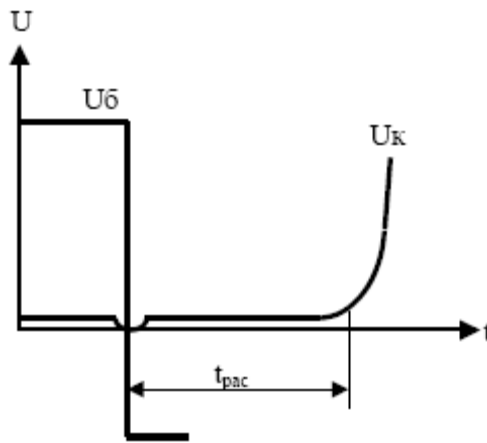


Рис. 10

1.1.6. Измерение граничной частоты транзистора

Измерение граничной частоты $f_{гр}$ производится в динамическом режиме по схеме, приведенной на рис. 11.

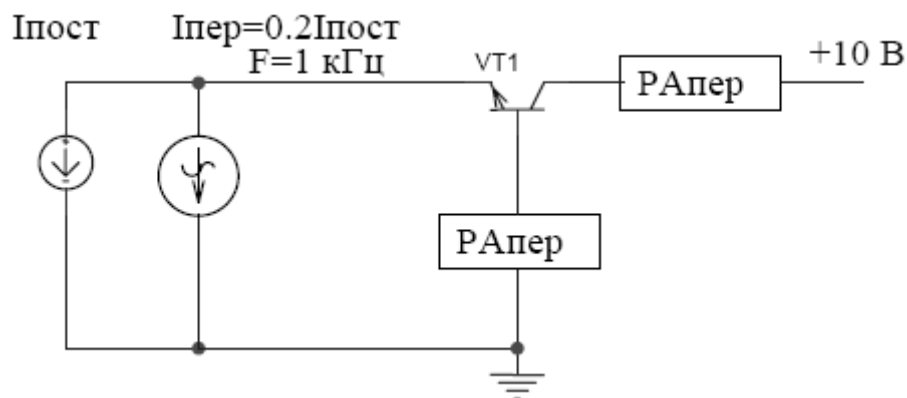


Рис. 11

В цепь эмиттера включены два источника тока: источник $I_{пост}$, задающий ток эмиттера в статическом режиме, и источник $I_{пер}$, задающий синусоидальный ток с частотой 1 кГц и амплитудой, равной $0,2I_{пост}$. В цепях базы и коллектора измеряются переменные токи $I_{б\ пер}$ и $I_{к\ пер}$. Коэффициент усиления по току в динамическом режиме для схемы с ОЭ (малосигнальная характеристика) равен:

$$\beta = I_{к\ пер} / I_{б\ пер}.$$

При постоянном значении тока эмиттера $I_{пост}$ измеряется коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером β при изменении частоты переменного сигнала. Строится график зависимости β от частоты (рис. 12).

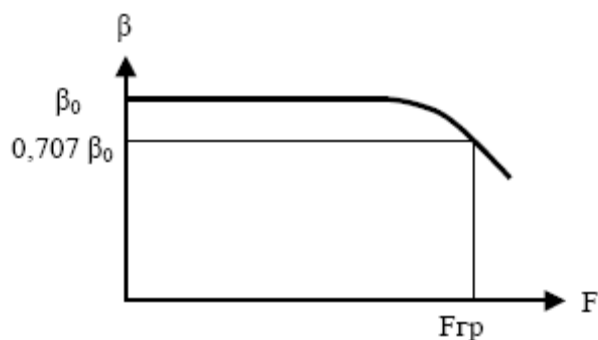


Рис. 12

Из графика находится граничная частота транзистора $F_{гр}$, при которой значение β уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Измерения граничной частоты производятся при токах эмиттера от 0,1 мА до 50 мА. Строится график зависимости $F_{гр}=f(I_э)$.

1.1.7. Измерение объемного сопротивления области базы

Схема измерения приведена на рис. 13.

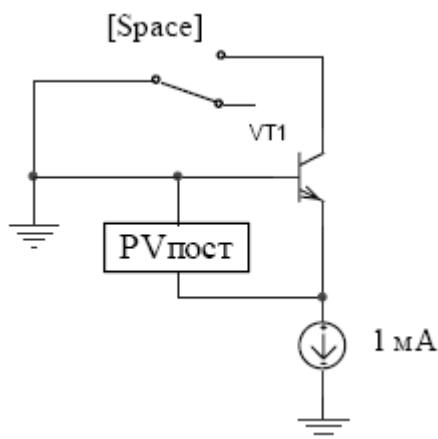


Рис. 13

При одном и том же токе эмиттера измеряется напряжение $V_{эб}$ при замкнутом и разомкнутом ключе. Сопротивление базы рассчитывается по формуле: $R_б=(V_{бэ2} - V_{бэ1})/I_э$, где $V_{бэ2}$ - напряжение база-эмиттер при разомкнутом ключе, $V_{бэ1}$ - при замкнутом ключе.

Лабораторное задание к подразделу 1.1.

1. Получить у преподавателя тип исследуемого транзистора. Транзистор выбирается из библиотеки National.lib, находящейся в каталоге..\Workbench\ Models\Bjt_npn.
2. Выполнить пункты 1.1.1-1.1.7.