

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А.Н.ТУПОЛЕВА

Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники

“ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА”
ПО КУРСУ
“ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ”

Методические указания к лабораторной работе 206

Казань-2011.

УДК 621.382.3.01 (076.5)

Методические указания к лабораторной работе “Исследование биполярного транзистора” по курсу “Электроника” /КГТУ; Составители: Л. М. Урманчиев, М.И. Нургалиев, Н.Б.Куншина. Казань: 2011. 21 с.

Цель работы - ознакомиться с принципом действия, характеристиками и параметрами биполярного транзистора в статическом и нагруженном режиме.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНЗИСТОРА.

Транзисторами называют полупроводниковые приборы, которые способны усиливать электрическую мощность.

В основе работы биполярных транзисторов лежит инжекция неосновных носителей заряда. Термин «биполярный» призван подчеркнуть роль обоих типов носителей заряда (электронов и дырок) в работе транзистора: инжекция неосновных носителей сопровождается компенсацией их заряда основными носителями.

Биполярный транзистор представляет собой совокупность двух встречно включенных взаимодействующих $p-n$ -переходов. Взаимодействие $p-n$ -переходов обеспечивается тем, что они расположены близко друг к другу – значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда в базе. Транзисторы бывают двух типов: $n-p-n$ и $p-n-p$ в зависимости от порядка чередования слоев с разным типом проводимости (рис.1)

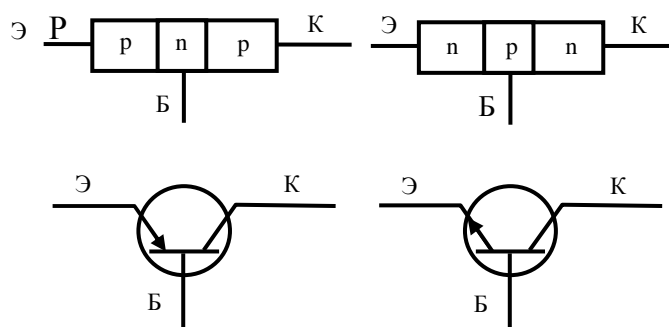


Рис.1. Структура и условные обозначения биполярных транзисторов.

Одна из крайних областей называется эмиттером, другая – коллектором, промежуточную область называют базой. Эмиттер предназначен для инжекции носителей в базу, это наиболее сильно легированная область. Назначение коллектора – экстракция инжектированных носителей из базы. Электронно-дырочный переход ($p-n$ -переход) между эмиттером и базой называется эмиттерным, между коллектором и базой – коллекторным. В реальном транзисторе площадь коллектора больше, чем эмиттера, и транзистор, кроме активной области, ограниченной площадью сечения эмиттера, имеет также пассивные области. Структуры на рис.1 отображают лишь активную область транзистора.

Принцип работы транзисторов обоих типов одинаков, различие лишь в том, что в $p-n-p$ – транзисторе ток через базу переносится дырками, инжектированными из эмиттера, а в транзисторе типа $n-p-n$ – электронами.

Режимы работы.

Возможны три режима работы биполярного транзистора:

1. Активный режим, когда один из переходов смещен в прямом направлении, а другой – в обратном. В этом режиме транзистор обладает усилительными свойствами. При этом возможны два варианта:

– Нормальное включение – на эмиттерный переход подается прямое напряжение, на коллекторный – обратное.

– Инверсное включение – когда на эмиттерный переход подано обратное напряжение, на коллекторный – прямое. Передача тока при этом значительно хуже, чем при нормальном включении, во-первых, из-за того, что коллектор легирован слабее, во-вторых, размеры эмиттера меньше, чем коллектора, и только часть зарядов попадает в эмиттер.

2.Режим насыщения (двойной инжекции) – на обоих переходах действует прямое напряжение. При этом и эмиттер, и коллектор инжектируют носители в базу навстречу друг другу и одновременно каждый из них собирает носители, дошедшие от другого перехода.

3.Режим отсечки – когда оба перехода смещены в обратном направлении, транзистор заперт.

При нормальном включении транзистора из эмиттера в базу инжектируются неосновные носители, и большая их часть, диффундируя сквозь базу, достигают коллекторного перехода, не успев рекомбинировать с основными носителями благодаря малой толщине базы. Коллекторный переход открыт для дырок, инжектированных в базу, и они беспрепятственно проходят в коллектор. Таким образом, при нормальном включении коллектор собирает поступившие в базу неосновные носители заряда. Небольшая часть инжектированных носителей рекомбинируют в базе с основными носителями, в результате в цепи базы возникает ток I_B , компенсирующий убыль основных носителей за счет рекомбинации, а также за счет небольшой инжекции из базы в эмиттер.

На основании закона Кирхгофа для токов в цепях электродов транзистора можно записать

$$I_{\text{Э}} = I_K + I_B \quad (1)$$

Коллекторный ток I_K пропорционален величине эмиттерного тока $I_{\text{Э}}$:

$$I_K = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБО}}, \quad (2)$$

где α – коэффициент передачи тока эмиттера, величина которого чуть меньше, но близка к единице.

В цепи коллектора протекает также собственный обратный ток коллектора $I_{\text{КБО}}$. Следует отметить, что ток $I_{\text{КБО}}$ представляет собой выходной ток при разомкнутой цепи входного электрода ($I_{\text{Э}} = 0$, режим х.х. на входе) в схеме с ОБ.

Схемы включения.

В зависимости от того, какой электрод соединен с общей шиной возможны три способа включения транзистора – с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК) (рис.2)

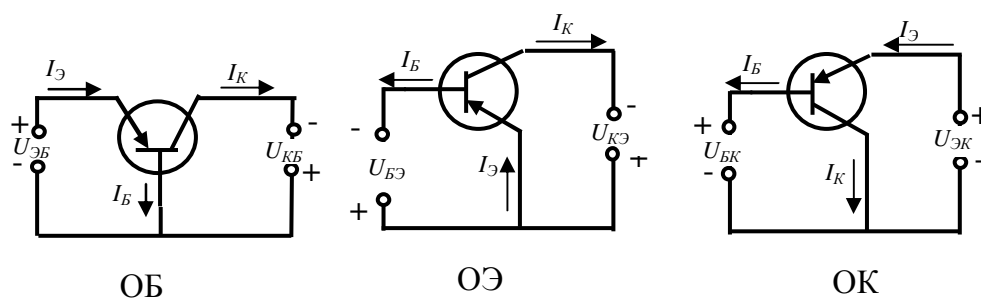


Рис.2. Схемы включения транзистора

2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА.

Характеристики транзисторов определяют соотношения между токами, проходящими в цепях транзистора, и напряжениями на его электродах.

Для транзистора за независимые переменные удобно принять входной ток и напряжение на выходном электроде, а за функции – выходной ток и напряжение на входном электроде. Зависимые переменные рассматриваются как функции одной независимой переменной при фиксированном значении другой независимой переменной, которая является параметром характеристики. Таким образом, используются четыре семейства статических характеристик:

- 1) входные $I_{ВХ} = f(U_{ВХ})$, при $U_{ВЫХ} = const$;
- 2) передачи по току $I_{ВЫХ} = f(I_{ВХ})$, при $U_{ВЫХ} = const$;
- 3) выходные $I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ})$ при $I_{ВХ} = const$;
- 4) обратной связи по напряжению $U_{ВХ} = f(U_{ВЫХ})$, при $I_{ВХ} = const$.

Указанные выше характеристики зависят от схемы включения транзистора с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК) (Рис.2).

Наиболее важными характеристиками, необходимыми для графического расчета режима работы транзистора, являются выходные и входные характеристики. Рассмотрим эти характеристики для $p-n-p$ – транзистора.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ

Пример семейства входных и выходных характеристик маломощного германиевого транзистора приведен на рис.3 и 4.

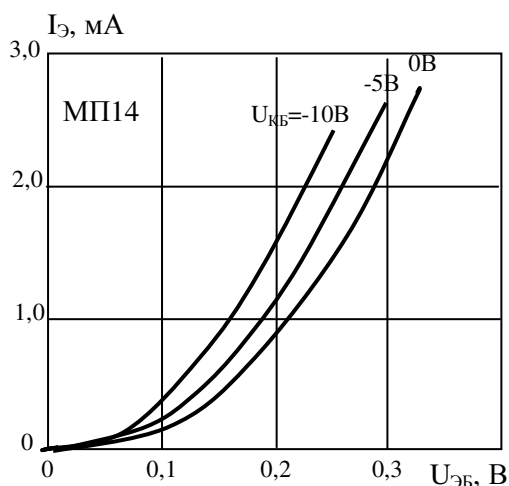


Рис.3

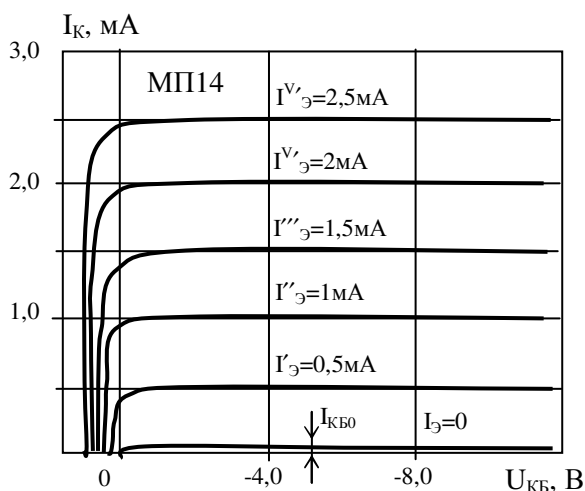


Рис.4

При $U_{КБ} = 0$ и $U_{ЭБ} > 0$ характеристика имеет вид обычной ВАХ $p-n$ -перехода в прямом направлении. При подаче запирающего напряжения на коллектор входные характеристики изменяются очень незначительно, что указывает на слабое влияние поля коллектора, на прохождение тока через эмиттерный переход. Это влияние обусловлено эффектом Эрли – уменьшением ширины (толщины) базы при увеличении обратного коллекторного напряжения вследствие расширения коллекторного перехода, что приводит к увеличению коэффициента α на доли процента и соответствующему росту тока.

Наклон выходных характеристик в схеме с ОБ незначителен и также обусловлен эффектом Эрли. Собственный обратный ток коллектора $I_{КБО}$ кроме теплового тока $I_{К0}$ включает также ток термогенерации $I_{КТ}$ и утечки $I_{КУ}$. Характеристика передачи дается выражением (2).

Активный режим соответствует первому квадранту выходных характеристик, в режиме двойной инжекции (второй квадрант) происходит спад коллекторного тока при неизменном эмиттерном токе. Это результат встречной инжекции с коллекторного перехода.

Характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

Семейства входных и выходных характеристик приведены на рис.5 и 6.

Входная характеристика при $U_{КЭ}=0$ соответствует диодному включению транзистора, когда оба перехода соединены параллельно. При прямом смещении переходы открываются, и ток возрастает по экспоненциальному закону.

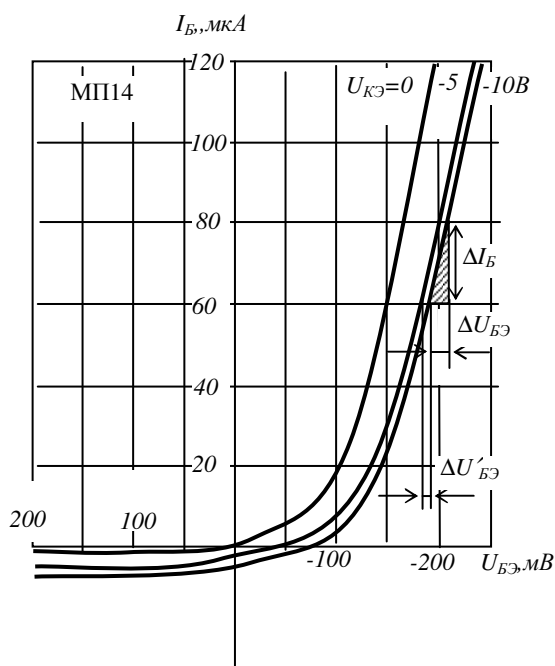


Рис.5

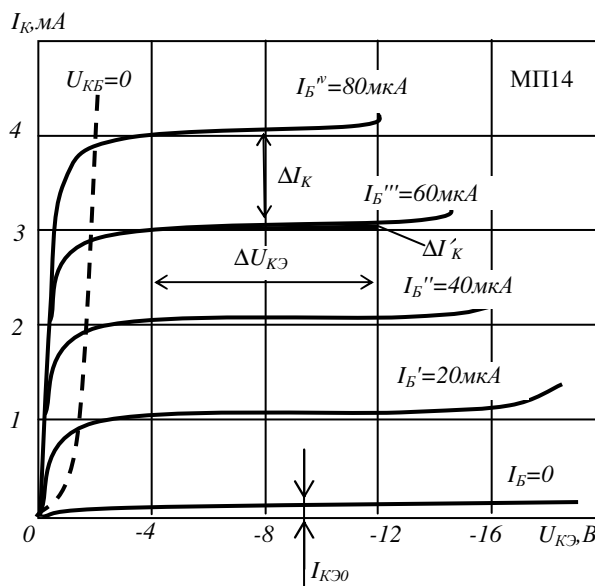


Рис.6

При обратном смещении коллекторного перехода ВАХ смещается вниз и вправо и при обратных напряжениях $|U_{КЭ}| \geq 0,5V$ напряжение коллектора практически не влияет на входные характеристики – кривые практически сливаются. Ток базы имеет две противоположно направленные составляющие:

$$I_B = (1-\alpha)I_{Э} - I_{КБО} \quad (3)$$

Первая составляющая – рекомбинационная – идет на восполнение убыли основных носителей вследствие рекомбинации и инжекции в эмиттер, вторая – обратный ток коллекторного перехода. При обратном смещении базы ток базы практически совпадает с $I_{КБО}$. При подаче прямого напряжения на базу эмиттерный переход открывается и в цепи базы появляется рекомбинационный ток.

Выходные характеристики в схеме с ОЭ, в отличие от характеристик схемы с ОБ, имеют крутой участок не при положительных напряжениях на коллекторе, а при малых

отрицательных. Это объясняется тем, что напряжение на базе отрицательно. Пунктирная линия на рис.6 соответствует условию $U_{KB}=0$.

Для схемы включения с ОЭ характерна заданная величина тока базы. В активном режиме выходной ток пропорционален входному току:

$$I_K = \beta I_B + I_{KЭ0}, \quad (4)$$

где β – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ, $I_{KЭ0}$ – обратный ток коллектора при разомкнутой базе. Связь между коэффициентами α , β и токами $I_{KЭ0}$, I_{KB0} легко получить, подставив I_B из формулы (1) в формулу (2):

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (5)$$

$$I_{KЭ0} = (\beta + 1)I_{KB0} \quad (6)$$

Пологий участок характеристик в схеме с ОЭ имеет больший наклон, чем в схеме с ОБ. Это связано с эффектом Эрли – уменьшением ширины базы при увеличении $U_{КЭ}$, – даже незначительное изменение коэффициента α приводят к существенному изменению β , а следовательно, и росту тока I_K в схеме ОЭ вследствие связи (5).

Спад коллекторного тока наступает в режиме двойной инжекции, которой соответствует область, лежащая левее пунктирной кривой $U_{KB}=0$ на рис.6. Заметный спад тока наступает лишь тогда, когда прямое напряжение U_{KB} достигает напряжения отпира- ния $U_{KB} = U^* - 0.1B$, где U^* – напряжение открытого $p-n$ -перехода.

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА.

Величины, связывающие малые приращения токов и напряжений называются дифференциальными параметрами. Критерием малости изменений токов и напряжений является линейность связи между ними, следовательно, дифференциальные параметры не зависят от амплитуды переменных составляющих токов и напряжений. Поэтому, когда транзистор работает в линейном режиме, для расчетов удобнее пользоваться не характеристиками, а параметрами.

Представим транзистор в виде четырехполюсника, на входе которого действуют ток I_1 и напряжение U_1 , а на выходе ток I_2 и напряжение U_2 (Рис.7)



Рис.7

Из четырех переменных, характеризующих четырехполюсник, только две являются независимыми. В зависимости от того, какие из них приняты за независимые получаются различные системы дифференциальных параметров. На практике наиболее часто используются три системы параметров: Y , Z , H . В системе Y -параметров за независимые принимаются напряжения U_1 и U_2 , токи I_1 , I_2 являются функциями этих величин, в систе-

ме Z -параметров за независимые принимаются I_1 и I_2 , U_1 и U_2 являются их функциями. В системе H -параметров за независимые переменные приняты входной ток I_1 и выходное напряжение U_2 . Эту систему называют также смешанной или гибридной, так как H -параметры имеют различную размерность.

Дифференциальные параметры несложно пересчитать из одной системы в другую. Выбор конкретной системы определяется удобством измерения. Систему H – параметров используют на низких частотах (обозначают строчной буквой h), когда пренебрежимо малы емкостные составляющие токов. Необходимые для измерения h -параметров режимы короткого замыкания выхода и холостого хода входа для переменной составляющей тока могут быть осуществлены на низких частотах сравнительно просто вследствие малого входного и большого выходного сопротивления транзистора. Поэтому в технических условиях и справочниках по транзисторам низкочастотные параметры приводятся в этой системе.

Система H -параметров.

Принимая за независимые переменные входной ток I_1 и выходное напряжение U_2 , можно получить уравнения четырехполюсника в системе H -параметров:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11} \dot{I}_1 + H_{12} \dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= H_{21} \dot{I}_1 + H_{22} \dot{U}_2; \end{aligned} \quad (7)$$

где $H_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2 = 0}$ – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе для переменной составляющей тока;

$H_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0}$ – коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе на входе для переменной составляющей тока;

$H_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2 = 0}$ – коэффициент передачи по току при коротком замыкании на выходе для переменной составляющей тока;

$H_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0}$ – выходная проводимость транзистора при холостом ходе на входе для переменной составляющей тока.

Величина параметров транзистора зависит от способа его включения, поэтому в обозначении параметров вводится третий индекс («Б», «Э», «К»), определяющий схему включения.

Определение h -параметров транзистора по статическим характеристикам.

Низкочастотные значения h -параметров можно найти с помощью входных и выходных характеристик. Должна быть задана или выбрана рабочая точка, в которой требуется найти параметры. Найдем h -параметры транзистора МП14 (рис.5, 6) в рабочей точке $I_B = 60 \text{ мкА}$, $U_{КЭ} = 8 \text{ В}$.

Параметры h_{21} и h_{22} определяются по выходным характеристикам транзистора (рис.6). При постоянном токе базы задаем приращение коллекторного напряжения $\Delta U_{\text{КЭ}} = 12\text{В} - 4\text{В}$ и находим получающееся при этом приращение тока коллектора $\Delta I'_{\text{К}}$ (катет зачерненного треугольника). Тогда выходная проводимость транзистора

$$h_{22\dot{Y}} = \left. \frac{\Delta I'_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}} \right|_{I_{\text{Б}}=60\text{мкА}} = \frac{0,06 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{8\text{В}} = 7,5\text{мкСм}$$

Далее при постоянном напряжении коллектора $U_{\text{КЭ}} = 8\text{В}$ задаем приращение тока базы $\Delta I_{\text{Б}} = I_{\text{Б}}^{\text{IV}} - I_{\text{Б}}^{\text{III}}$ и определяем получающееся при этом приращение тока коллектора $\Delta I'_{\text{К}}$. Тогда дифференциальный коэффициент передачи тока базы

$$h_{21\dot{Y}} = h_{21\dot{\Omega}} = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЭ}}=8\text{В}} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ А}} = 50$$

Параметры $h_{11\dot{\Omega}}$ и $h_{12\dot{\Omega}}$ определяют по входным характеристикам (рис. 9). Рабочая точка находится при $I_{\text{Б}} = 60\text{мкА}$ между характеристиками, снятыми при $U_{\text{КЭ}} = 5\text{В}$ и $U_{\text{КЭ}} = 10\text{В}$. Для нахождения $h_{11\dot{\Omega}}$ можно взять любую из них. Берем две точки $I_{\text{Б}} = 60\text{мкА}$ и $I_{\text{Б}} = 80\text{мкА}$ на одной из характеристик и находим получающиеся при этом приращение напряжения базы $\Delta U_{\text{БЭ}} = 17\text{мВ}$. Тогда входное сопротивление транзистора

$$h_{11\dot{Y}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta I_{\text{А}}} \right|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}} = \frac{17 \cdot 10^{-3} \text{ В}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ А}} = 850 \text{ Ом.}$$

Затем при постоянном токе базы $I_{\text{Б}} = 60 \text{ мкА}$ находим приращения напряжения базы $\Delta U'_{\text{БЭ}} = 8\text{мВ}$ между характеристиками, снятыми при $U_{\text{КЭ}} = 5\text{В}$ и $U_{\text{КЭ}} = 10\text{В}$. Тогда коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12\dot{\Omega}} = \left. \frac{\Delta U'_{\text{БЭ}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}} \right|_{I_{\text{Б}} = \text{const}} = \frac{-8 \cdot 10^{-3} \text{ В}}{-5\text{В}} = 0,0016.$$

Аналогично могут быть определены по соответствующим характеристикам параметра транзистора в других схемах включения.

Схемы замещения транзистора.

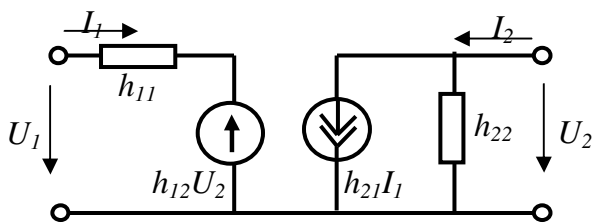


Рис.8.

Для малого сигнала в активном режиме транзистор рассматривается как линейный четырехполюсник. На рис.8 приведена формальная схема замещения транзистора в системе h -параметров. Эта схема отображает систему уравнений (7) и не содержит ничего сверх этого. На высоких частотах начинает сказываться инерционность транзистора и H -параметры становятся частотно зависимыми.

Инерционность транзистора при быстрых изменениях входных токов обусловлена конечным временем пролета инжектированных носителей и зарядением емкостей $p-n$ -переходов.

T-образную эквивалентную схему транзистора для схемы с ОБ можно получить из модели Эберса-Молла, исключив генератор тока $\alpha_0 I_{\Delta r}$ и заменив диоды их дифференциальными сопротивлениями и емкостями, учитывая дополнительно сопротивление базы.

Эта схема приведена на рис.9, где $r_{\Delta r}$, r_K – дифференциальные сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов, $C_{\Delta r} = C_{\Delta r\text{бар}} + C_{\Delta r\text{диф}}$, $C_K = C_{K\text{бар}}$, r'_B – распределенное омическое сопротивление базы, генератор тока управляется током $I_{\Delta r}$

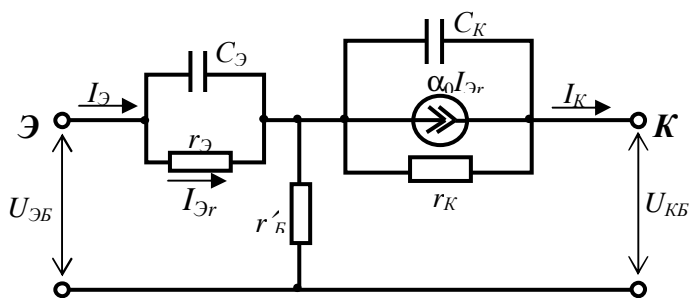


Рис.9

протекающим по $r_{\Delta r}$ со статический коэффициент передачи α_0 . Таким образом, часть тока эмиттера расходуется на зарядение емкости $C_{\Delta r}$, задержка сигнала определяется постоянной времени $r_{\Delta r} C_{\Delta r} = \tau_{\alpha}$

Частотная зависимость $\alpha(j\omega)$ определяется выражением

деляется выражением

$$\alpha(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{\alpha}}} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{\alpha}}\right)^2}} e^{-j \cdot \arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{\alpha}}\right)}, \quad (19)$$

где $\omega_{\alpha} = 1/\tau_{\alpha}$ – граничная частота коэффициента передачи α . На этой частоте $|\alpha| = \alpha_0 / \sqrt{2}$.

В справочниках обычно не приводят величины $r_{\Delta r}$, r_K , r'_B , поэтому их рассчитывают по известным h -параметрам транзистора, включенного по схеме с ОБ:

$$r_{\Delta r} = h_{11B} - \frac{h_{12B}}{h_{22B}} (1 + h_{21}); \quad \alpha = -h_{21}; \quad r_B = \frac{h_{12B}}{h_{22B}}; \quad r_K = \frac{1 - h_{12B}}{h_{22B}}.$$

Для маломощных транзисторов эти параметры имеют следующие значения: $r_{\Delta r} = 20 \dots 40$ Ом, $r_B = 200 \dots 300$ Ом, $r_K = 100 \dots 1000$ кОм,

4. ТРАНЗИСТОР В РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ

При использовании транзистора в качестве усилителя в его выходную цепь включается нагрузка, сопротивление которой будем для простоты считать чисто активным. На рис.10 усилитель на транзисторе изображен в обобщенном виде как четырехполюсник: в



Рис.10.

выходную цепь включено сопротивление нагрузки R_H ; во входной цепи действует источник сигнала, создающий переменное напряжение, U_1 , которое должно быть усилено.

Три возможные схемы включения транзистора в качестве усилителя представлены на рис.11. В схемах с ОБ и с ОЭ сопротивление нагрузки R_H включено в коллекторную

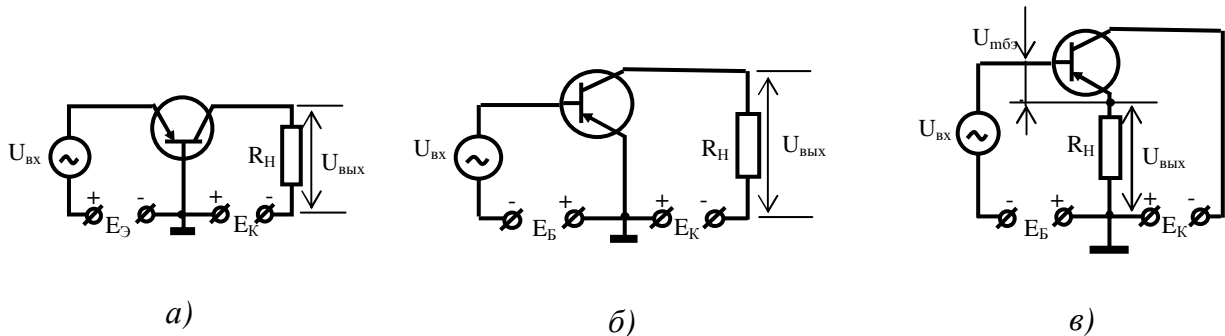


Рис.11. Схемы усилителей при включении транзистора с ОБ (а), ОЭ (б) и ОК (в).

цепь последовательно с источником коллекторного напряжения E_K , в схеме с ОК нагрузка включена в цепь эмиттера. Во входные цепи включены источники усиливаемого напряжения $U_{A\delta}$ и напряжения смещения E_{γ} , (ОБ) или E_B (ОЭ, ОК), позволяющие установить рабочую точку на практически линейном участке характеристики, где искажения при усилении минимальны.

Нагрузочные характеристики транзистора.

Характеристики транзистора при наличии нагрузки называются нагрузочными характеристиками. Они имеют иной вид, чем статические характеристики, так как в данном режиме выходное напряжение не остаётся постоянным. Напряжение коллектора U_K при наличии сопротивления R_H в его цепи и ток коллектора I_K связаны соотношением (8):

$$U_K = E_K - I_K R_H \quad \text{или} \quad I_K = \frac{E_K - U_K}{R_H} \quad (8)$$

Это выражение, являющееся уравнением прямой, и представляет собой выходную нагрузочную характеристику транзистора. Эта прямая пересекает оси координат в точках

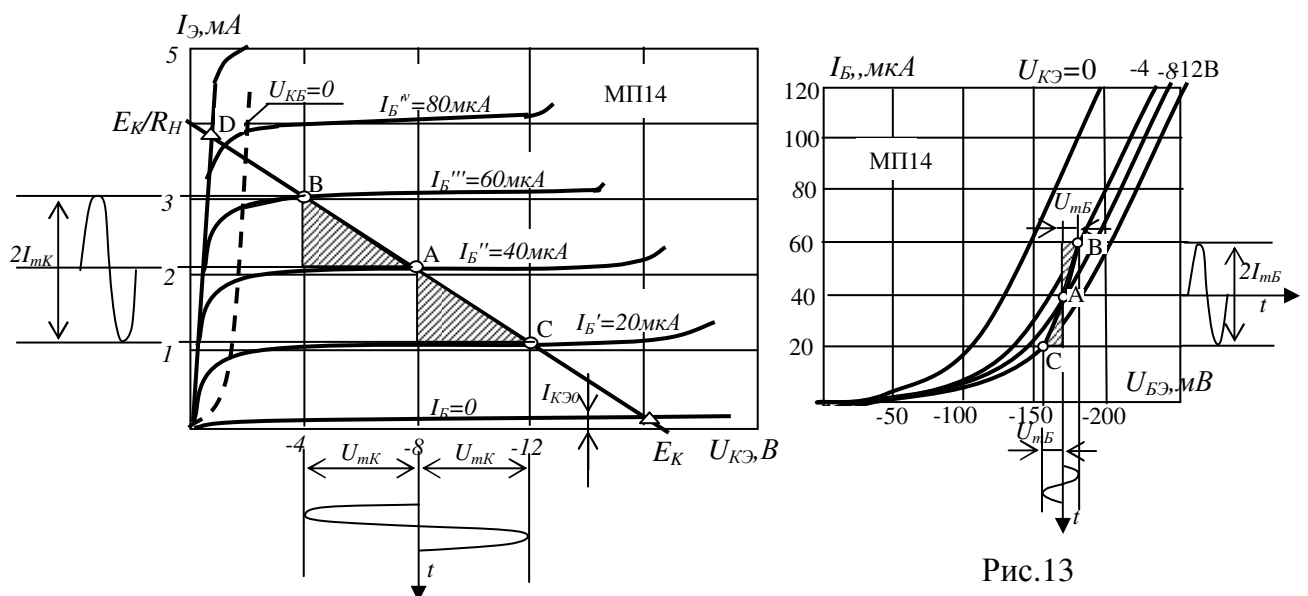


Рис.13

Рис.12.

$I_K = \frac{E_K}{R_H}$ при $U_K=0$ и $U_K = E_K$ при $I_K = 0$. Нагрузочная характеристика строится на семействе выходных статических характеристик транзистора (рис.12).

Для получения входной нагрузочной характеристики транзистора перенесем на семейство входных статических характеристик $I_A = f(U_{KY})$ точки А,В,С полученной нами выходной нагрузочной характеристики. Соединяя эти точки плавной кривой (рис.13), получим требуемую характеристику.

В схеме ОЭ входные статические характеристики в активном режиме практически сливаются и в справочниках обычно приводится лишь одна характеристика для достаточно большого напряжения $U_{KЭ}$, и ее можно принять в качестве входной нагрузочной характеристики.

По построенным нагрузочным характеристикам можно произвести расчет режима усиления: выбрать область неискаженного усиления, определить напряжение или ток смещения, допустимую амплитуду сигнала, входную и выходную мощность, коэффициент усиления по току, напряжению и мощности.

Выбор области неискаженного усиления целесообразно начинать с входных характеристик, выделив на них участок, который с достаточной точностью можно считать линейным. Исходную точку А выбираем посередине этого участка (см. рис.13), для этого во входной цепи транзистора с помощью источника напряжения смещения E_B должен быть создан ток смещения I_B^0 . Допустимая амплитуда входного тока, как видно из характеристики, должна удовлетворять неравенству $I_{mБ} < I_B^0$. Мощность, затрачиваемая источником сигнала на входе: $P_{BX} = \frac{1}{2} I_{mБ} U_{mБ}$, мощность на выходе: $P_{\hat{A}\hat{U}\hat{O}} = \frac{1}{2} I_{m\hat{E}} U_{m\hat{E}}$. Коэффициенты усиления:

$$K_I = \frac{I_{mK}}{I_{mБ}}; K_U = \frac{U_{mK}}{U_{mБ}}; K_P = \frac{P_{BЫX}}{P_{BX}}$$

Связь коэффициентов усиления с h-параметрами.

В нагруженном режиме к уравнениям (8), связывающим приращения токов и напряжений, добавляется еще одно, связывающее приращение выходного тока и напряжения согласно нагрузочной характеристике:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2 \\ \dot{U}_2 &= -R_H\dot{I}_2 \end{aligned}$$

Три уравнения связывают четыре переменные, таким образом, только одна из них является независимой. Исключая из этих уравнений те или другие величины, получаем

$$K_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22}R_H} \quad (9)$$

$$K_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{h_{21}}{h_{12}h_{21} - h_{11}(h_{22} + 1/R_H)} \quad (10)$$

Обычно при включении с ОБ и ОЭ выполняются соотношения:

$$h_{22} \ll 1/R_H \quad (11)$$

$$h_{11}/R_H \gg h_{12}h_{21}, \quad (12)$$

тогда

$$K_I \approx h_{21} \quad (9a)$$

$$K_U \approx -h_{21}R_H / h_{11} \quad (10a)$$

$$K_P = K_I K_U \approx h_{21}^2 R_H / h_{11} \quad (13)$$

Усилительные свойства транзистора при различных способах его включения.

Будем считать, что выполнены условия (11) и (12) и в схемах с ОБ и с ОЭ применимы формулы (9а), (10а), (13).

Схема с ОБ (рис.11а).

Коэффициент передачи тока эмиттера: $h_{21B} = -\alpha$, знак “-“ связан с тем, что за положительные в системе h -параметров приняты втекающие токи, тогда как, если I_E втекает, то I_K вытекает, и наоборот.

Коэффициенты усиления для схемы с ОБ:

$$K_I \approx h_{21A} = -\alpha \approx -1, \quad K_U \approx -\frac{h_{21A}}{h_{11A}} R_f \approx \frac{R_f}{h_{11A}}, \quad K_P = K_I K_U \approx \frac{R_H}{h_{11B}}$$

Входное сопротивление $h_{11A} = \frac{kT}{eI_E^0}$, где I_E^0 – ток эмиттера в рабочей точке. На

низких частотах отношение $\frac{R_H}{h_{11B}}$ может достигать нескольких тысяч, т.к. входное со-

противление h_{11B} очень мало, а сопротивление нагрузки R_H может иметь величину в несколько кОм.

Недостатком схемы с ОБ является низкое входное сопротивление, затрудняющее согласования ступеней усиления.

Схема с ОЭ (рис.11б).

Входным током в схеме является ток базы, коэффициент передачи $h_{21Э} = \beta$. Входное сопротивление в данном случае значительно выше, чем в схеме с ОБ, так как при одинаковом переменном напряжении на входе ток базы существенно меньше тока эмиттера. Параметры связаны соотношением

$$\frac{h_{21Э}}{h_{11Э}} = -\frac{h_{21Б}}{h_{11Б}}$$

Коэффициенты усиления в схеме с ОЭ:

$$K_I \approx h_{21Y} = \beta, \quad K_U = -\frac{h_{21Э}}{h_{11Э}} R_H, \quad K_P = \frac{h_{21Y}^2}{h_{11Y}} R_f = h_{21Y} K_U$$

K_U имеет примерно такую же величину, как и в схеме с ОБ, а в h_{21Y} раз больше, чем в схеме с ОБ/

Благодаря более высокому входному сопротивлению и более высокому усилению по мощности схема с ОЭ получила на практике самое широкое распространение.

Схема с ОК (рис.11в).

В данном случае сопротивление нагрузки R_H включено в цепь эмиттера, благодаря чему на эмиттерном переходе действует напряжение $U_{mБ}$, равное разности между входным $U_{вх}$ и выходным $U_{вых}$ напряжениями.

Поэтому коэффициент усиления по напряжению схемы с ОК всегда меньше единицы:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\hat{A}\hat{O}\hat{O}}}{\Delta U_{\hat{A}\hat{O}}} = \frac{\Delta U_{\hat{A}\hat{O}} - U_{m\hat{A}}}{\Delta U_{\hat{A}\hat{O}}} < 1.$$

Коэффициент передачи тока базы в схеме с ОК $h_{21К} = \beta + 1$. При включении с ОК условие (12) не выполняется, поскольку $h_{12К} = 1$ и $h_{21К} R_H \gg h_{11К} = h_{11Э}$.

Коэффициенты усиления:

$$K_U \approx 1 - \frac{h_{11A}}{R_f} \approx 1. \quad K_I \approx h_{21K} \approx 1 + h_{21Y} = \beta + 1 \gg 1$$

Так как обычно $\frac{h_{11B}}{R_H} \ll 1$, то коэффициент усиления по напряжению в этой схеме

близок к единице, коэффициент усиления по току значительно больше единицы.

Схема с ОК отличается высоким входным и низким выходным сопротивлением.


$$R_{\hat{a}\hat{o}} = \frac{U_{\hat{a}\hat{o}}}{I_{\hat{a}}} \approx (\beta + 1)R_f, \quad R_{\hat{a}\hat{a}} \approx h_{11A}.$$

Схему с ОК называют эмиттерным повторителем. Эта схема применяется в основном для согласования источника сигнала с большим выходным сопротивлением с нагрузкой, имеющим малое сопротивление, при обеспечении усиления по току.

5. ЗАДАНИЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Приборы, используемые в работе:

- 1) прибор Л2-22/1;
- 2) лабораторный макет.

ВНИМАНИЕ! Под блокировочной крышкой символ  означает, что прикосновение и подключение к выводам колодки “Е”, “В”, “С” (или “Э”, “Б”, “К”) допускается только при открытой крышке блокировки.

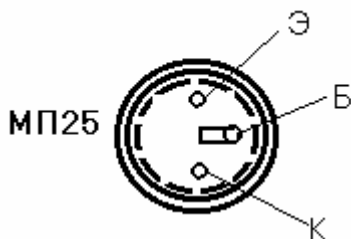


Рис.14. Расположение выводов транзистора М25

1. Вставить испытуемый транзистор (МП21, МП25, МП26) в панельку макета, проследив за правильностью подключения его электродов (рис.15).

2. Вставить трехштырьковый разъем макета в колодку прибора Л2-22/1, открыв блокировочную крышку.

Примечание. А) У колодки прибора Л2-22/1 вывод эмиттера задублирован. Это позволяет подключить любые транзисторы, избежав переключивания выводов.

Б) При измерении транзисторов с 4 выводами корпусной вывод может быть подключен к любому выводу колодки (“Е”, “В” или “С”).

В) Полярность подаваемых напряжений определяется выбором типа транзистора. В данной работе исследуется р-п-р-транзистор, и ключ “р-п-р, п-р-п” нужно установить в положение “р-п-р”;

3. Закрывать крышку блокировки.

Задание I. Снятие статических характеристик транзистора. Схемы включения транзисторов приведены на рис.16.

I. Входные характеристики для схемы включения ОЭ:

$$I_B = f(U_{БЭ}) \text{ при } U_K = const.$$

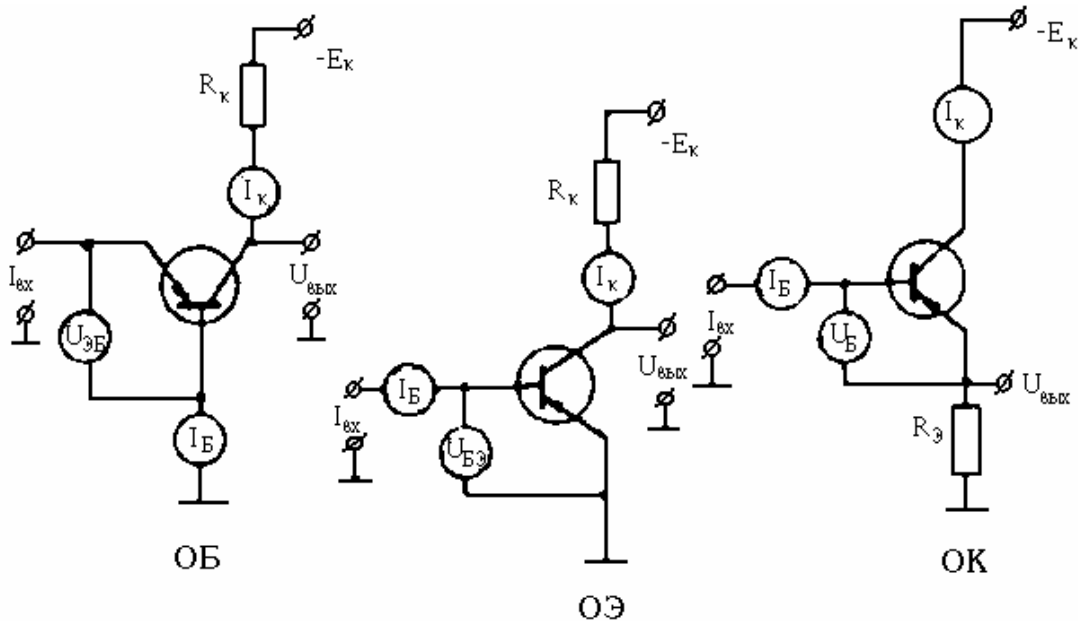


Рис.16. Схемы включения транзисторов.

Для снятия входных характеристик необходимо:

- 1) установить ключ “ТОКИ, ОБЩ. БАЗА, ОБЩ.ЭМИТТЕР” в положение “ОБЩ.ЭМИТТЕР” на приборе Л2-22/1;
 - 2) установить ключ “ОЭ, ОБ, ОК” на макете в положении “ОЭ”;
 - 3) установить ключ “кОм резистор” на макете в положение “0”;
 - 4) поворачивая ручку “ $U_{КЭ}$, $U_{КБ}$, $U_{БЭ}$ ” на приборе Л2-22/1, выставить напряжение на коллекторе транзистора $U_{К1} = -5 \text{ В}$.
 - 5) Задавая значения тока эмиттера поворотом ручки “ I_E ” на приборе Л2-22, измерить величину тока I_B , и напряжения $U_{БЭ}$ приборами на макете.
- Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1.

I_E, mA		0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	3	4	5
$U_{К1}, -5\text{В}$	$I_B, \text{мкА}$										
	$U_{ЭБ}, \text{мВ}$										
$U_{К2}, -20\text{В}$	$I_B, \text{мкА}$										
	$U_{ЭБ}, \text{мВ}$										

б) Установить напряжение на коллекторе транзистора $U_{К2} = -20 \text{ В}$ и повторить пункт 5).

По полученным данным построить семейство входных характеристик транзистора при. $I_B = f(U_{ЭБ})$ при $U_K = const..$

2. Выходные характеристики для схемы включения с ОЭ:

$$I_K = f(U_K) \text{ при } I_B = const.$$

Для снятия выходных характеристик необходимо, не меняя положения переключателей установить ручкой I_E на приборе Л2-22/1 ток базы транзистора I_B и, изменяя напряжение на коллекторе транзистора ручкой “ $U_{КЭ}, U_{КБ}, U_{БЭ}$ ” зафиксировать величину тока I_K по прибору на макете.

Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

$U_K, В$		0	1	2	5	8	10	15	20
$I_K, мА$	$I_{Б2}, 40мкА$								
	$I_{Б2}, 80мкА$								

Примечание. С изменением напряжения U_K меняется ток базы I_B . Ток базы поддерживать постоянным, регулируя ток эмиттера “ $I_Э$ ”.

По полученным данным построить семейство выходных характеристик транзистора при $I_K = f(U_K)$ при $I_B = const$.

3. Входные характеристики для схемы включения с ОБ.

$$I_Э = f(U_{ЭБ}) \text{ при } U_K = const.$$

Для снятия входных характеристик необходимо:

- 1) установить ключ “ТОКИ, ОБЦ.БАЗА, ОБЦ.ЭМИТТЕР” в положение “ОБЦ.БАЗА” на приборе Л2-22/1;
- 2) установить ключ “ОЭ, ОБ, ОК” на макете в положение “ОБ”;
- 3) поворачивая ручку “ $U_{КЭ}, U_{КБ}, U_{БЭ}$ ” на приборе Л2-22/1, установить необходимое напряжение на коллекторе транзистора.

Изменяя $I_Э$ ручкой “ I_E ” на приборе Л2-22/1, снять значения $U_{ЭБ}$ по прибору макета.

4) Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

$I_Э, мА$		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$U_{ЭБ}, мВ$	$U_{К1} = -5В$										
	$U_{К2} = -20В$										

5) По полученным данным построить семейство входных характеристик

$$I_Э = f(U_{ЭБ}) \text{ при } U_K = const.$$

4. Выходные характеристики для схемы включения с ОБ

$$I_K = f(U_K) \text{ при } U_{\text{Э}} = \text{const.}$$

Для снятия выходных характеристик необходимо, не меняя положения переключателей, установить ручкой “ I_E ” на приборе Л2-22/1 ток $I_{\text{Э}}$ и, изменяя напряжение на коллекторе транзистора ручкой “ $U_{KЭ}, U_{KB}, U_{БЭ}$ ”, зафиксировать величину коллекторного тока по прибору на макете. В мало-мощных транзисторах ток коллектора практически не зависит от напряжения U_{KB} , поэтому нет смысла подробно снимать всю выходную характеристику, достаточно измерить ток коллектора с максимальной точностью в крайних точках при $U_{KB}=0$ и $U_{KB}=-20$ В.

Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4.

$U_K, \text{ В}$		0	-20
$I_K, \text{ мА}$	$I_{\text{Э}}=1 \text{ мА}$		
	$I_{\text{Э}}=2 \text{ мА}$		
	$I_{\text{Э}}=4 \text{ мА}$		

По полученным данным построить семейство выходных характеристик $I_K=f(U_K)$ при $I_{\text{Э}} = \text{const}$, соединив прямой линией две крайние точки каждой характеристики.

Задание 2. Измерение h -параметров транзистора.

КРЫШКА БЛОКИРОВКИ ОТКРЫТА!

1. Для измерения h -параметров в схеме с ОБ необходимо:

1) установить ключ “ОЭ, ОБ, ОК” на макете в положение “ОБ”, а ключ “ $p-n-p, n-p-n$ ” в положение “ $p-n-p$ ”;

2) установить испытуемый транзистор (МП21, МП25 или МП26) в колодку прибора Л2-22/1 проследив за правильностью подключения его электродов.

3) установить необходимый режим измерения транзистора при открытой крышке блокировки $U_{KA} = -20\hat{\text{А}}, I_{\text{Э}} = 1,5\hat{\text{А}}$ по прибору Л2-22/1.

КРЫШКУ БЛОКИРОВКИ ЗАКРЫТЬ!

4) установить один из ключей выбора h -параметров в положение, соответствующее измеряемому h -параметру;

5) установить переключатель “ПРЕДЕЛЫ h ” в положение, при котором стрелка отсчетного прибора будет находиться в правой половине шкалы, и отсчитать значение измеряемого h -параметра, учитывая множитель, указанный в таблице над переключателем “ПРЕДЕЛЫ h ”.

Примечания. 1. При включении пробитого транзистора или при замыкании вывода коллектора на корпус срабатывает защита источника питания и загорается индикация “ПЕРЕГРУЗКА”. Необходимо открыть крышку блокировки, устранить причину перегрузки и нажать одноименную кнопку.

2. При измерении транзистора с 4 выводами вывод корпуса может быть подключен к любому выводу транзистора.

2. Для измерения h -параметров в схеме с ОЭ необходимо:

1) установить ключ “ОЭ, ОБ, ОК” на макете в положение “ОЭ”.

2) далее повторяем алгоритм измерения, описанный в пункте 1, где измеряются h -параметры в схеме с ОБ.

Задание 3. По статическим характеристикам, полученным в ходе работ, найти h -параметры в схемах с ОБ и с ОЭ в рабочей точке $U_K = -20$ В, $I_{\text{Э}} = 1,5$ мА и сравнить с данными, полученными в задании 2.

Задание 4. Расчет эквивалентной Т – образной схемы замещения транзистора.

По значениям h -параметров, полученных при непосредственных измерениях на чертить формальную и Т-образную схемы замещения транзистора. Определить собственные параметры транзистора (сопротивление эмиттера, базы, коллектора соответственно - $r_{\text{Э}}$, $r_{\text{Б}}$, $r_{\text{К}}$; коэффициент передачи тока эмиттера - α и коэффициент передачи тока базы).

Задание 5. На графиках выходных характеристик построить нагрузочную характеристику для нагрузки $R_{\text{К}} = 5$ кОм, $E_{\text{К}} = 20$ В. Найти коэффициенты усиления K_I , K_U , K_P для схем включения с ОЭ и с ОБ

ОТЧЁТ ДОЛЖЕН СОДЕРЖАТЬ:

- 1) графики входных и выходных характеристик и таблицы к ним;
- 2) нагрузочные характеристики, построенные на статических характеристиках;
- 3) значения K_I , K_U , K_P , вычисленные по характеристикам;
- 4) таблица, содержащая значения h -параметров, измеренных с помощью прибора Л2-22/1, вычисленных по статическим характеристикам, полученным в ходе работ, в рабочей точке $U_{\text{КЭ}} = -20$ В, $I_{\text{Э}} = 1,5$ мА ;
- 5) эквивалентная Т – образная схема замещения транзистора с собственными параметрами ($r_{\text{Э}}$, $r_{\text{Б}}$, $r_{\text{К}}$; α , β), рассчитанная по значениям h – параметров, полученным при непосредственном измерении;
- 6) анализ полученных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Структура, типы и условные обозначения транзисторов.
2. Какая область транзистора легирована наиболее сильно?
3. Принцип действия биполярного транзистора.
4. Статические характеристики транзистора.
5. Сходство и различия выходных и входных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ и ОЭ.
6. Чем вызван наклон выходных характеристик транзистора?
7. Дифференциальные параметры транзисторов.
8. Почему для биполярного транзистора выбрана система h -параметров?
9. Определение h -параметров по статическим характеристикам.
10. Т – образная схема замещения транзистора.
11. Какие из h -параметров транзистора изменяется по величине и как, если в Т–образной схеме замещения увеличивать $r_{\text{Б}}$?
12. Выходная характеристика транзистора в усилительном режиме.
13. Параметры, характеризующие режим работы усиления транзистора, и их связь с дифференциальными параметрами.
14. Усилительные свойства транзистора при различных способах его включения.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Аваев Н.А., Шишкин Г.Г. «Электронные приборы», Из-во МАИ, 1996г.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1980.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2-е изд. 2001, 3-е изд. 2004.
4. Урманчеев Л.М., Нургалиев М.И. Электроника: Учебное пособие по выполнению контрольных работ. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003.