

## Лабораторная работа №5

**Тема работы:** исследование параметров и характеристик биполярных транзисторов.

**Цель работы:** изучить устройство, режим работы, принцип действия, схемы включения и классификацию биполярных транзисторов (БТ). Экспериментально исследовать статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов и рассчитать дифференциальные параметры в заданной рабочей точке.

**Оснащение:** транзисторы (паспортные данные исследованных приборов); принципиальные схемы для исследования ВАХ биполярных транзисторов; программное обеспечение – Multisim.

**Теоретическая часть:** Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-п-переходами и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции носителей заряда.

Два взаимодействующих электронно-дырочных перехода имеются в полупроводниковых структурах, содержащих три области полупроводника с чередующимся типом проводимости. На рисунке 1, а, б показано устройство и условно-графическое обозначение (УГО) БТ со структурой р-п-р- и п-р-п-типа соответственно. Принцип их действия одинаков, различие заключается только в полярности подключения источников внешнего напряжения и в направлении протекания токов через электроды.

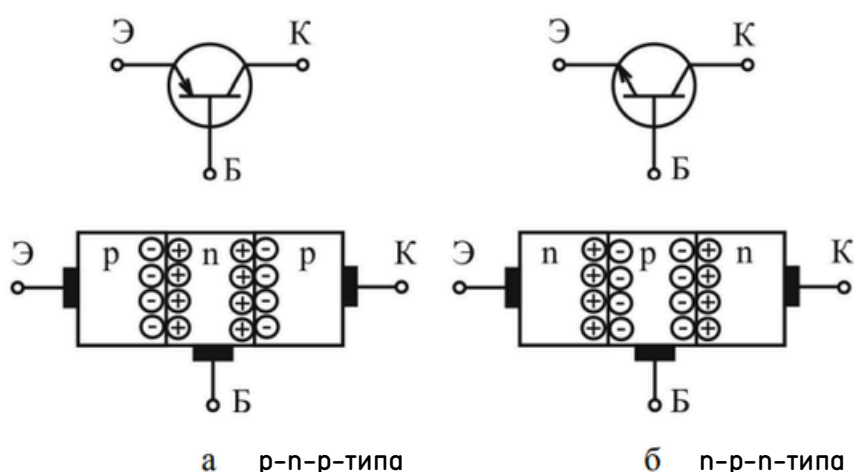


Рисунок 1 – УГО со структурой р-п-р- и п-р-п-типа биполярного транзистора

Одну из крайних областей транзисторной структуры легируют сильнее, ее используют обычно в режиме инжекции и называют эмиттером. Промежуточную область называют базой, а другую крайнюю область – коллектором.

Коллекторная область предназначена для экстракции инжектированных в базу носителей заряда. Электронно-дырочный переход между эмиттерной и базовой областями называют эмиттерным, а между коллекторной и базовой коллекторным. Чтобы переходы транзистора были взаимодействующими, ширина базы должна быть много меньше диффузионной длины неосновных носителей базы. Для повышения эффективности экстракции носителей в коллектор площадь поперечного сечения коллекторного перехода должна быть много больше площади поперечного сечения эмиттерного перехода.

Режимы работы БТ отличаются включением двух его переходов, каждый из которых может быть открыт или закрыт. Поэтому различают следующие режимы работы транзистора.

В активном режиме эмиттерный переход включен прямо (открыт), коллекторный – обратно (закрыт). Данный режим является основным, поскольку области БТ выполняют собственные функции. В нем транзистор работает в усилительных устройствах.

В режиме отсечки оба перехода БТ включены обратно, их сопротивления велики, токи малы, а напряжения на них определяются напряжением внешних источников.

В режиме насыщения оба перехода БТ включены прямо, их сопротивления малы, токи велики, а напряжения на них малы. В импульсных устройствах под действием входного сигнала БТ переключается из режима отсечки в режим насыщения и обратно, очень быстро миную при этом активный режим работы.

В инверсном режиме коллекторный переход включен прямо, эмиттерный – обратно. Коллектор при этом выполняет функции эмиттера, а эмиттер – функции коллектора. Поскольку структура БТ в общем случае не является полностью симметричной, то эффективность работы в данном режиме оказывается хуже, чем в активном. Поэтому данный режим работы на практике не используется.

В зависимости от того, какой из выводов транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). На рисунке 2 показаны полярности подключения внешних источников напряжения и направления протекания токов транзистора, соответствующие активному режиму работы, для трех схем включения. Для схем с ОЭ и ОК смена включения переходов, а значит, и режимов работы БТ происходит как при изменении абсолютных значений источников напряжения, так и при смене полярности их подключения.

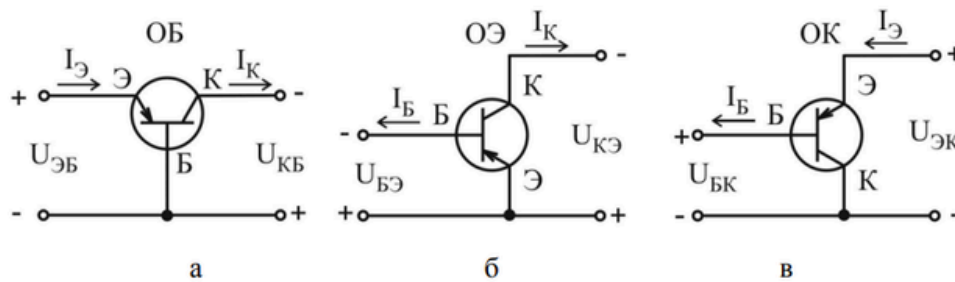


Рисунок 2 – Полярности подключения внешних источников напряжения и направления протекания токов транзистора

Рассмотрим принцип действия БТ р-п-р-типа в активном режиме, включенного с ОБ (рисунок 3). При увеличении прямого напряжения  $U_{ЭБ}$  на эмиттерном переходе снижается его потенциальный барьер, что вызывает рост инжекции дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. Поскольку концентрация примеси в эмиттере много больше концентрации примеси в базе (концентрация основных носителей эмиттера много больше концентрации основных носителей базы), то инжекция дырок из эмиттера в базу доминирует над инжекцией электронов из базы в эмиттер. Через эмиттерный переход протекает ток инжекции, имеющий две составляющие: дырочную  $I_{Эр}$  и электронную  $I_{Эн}$ . Процесс инжекции характеризуется коэффициентом инжекции (эффективностью эмиттерного перехода)  $\gamma = I_{Эр} / (I_{Эр} + I_{Эн})$ , показывающим, какую долю от полного тока эмиттера составляет ток инжектированных в базу носителей.

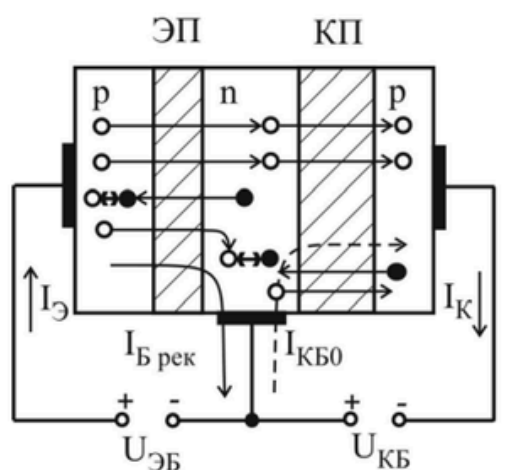


Рисунок 3 – Принцип действия БТ р-п-р-типа в активном режиме, включенного с ОБ

В результате инжекции дырок из эмиттера в базу возрастает их концентрация вблизи эмиттерного перехода. Это приводит к диффузионному движению дырок через базу к коллекторному переходу.

Поскольку ширина базы значительно меньше диффузионной длины дырок, то незначительная их часть рекомбинирует с собственными носителями базы – электронами, создавая рекомбинационную составляющую тока базы  $I_{B \text{ рек}}$ . Процесс переноса неосновных носителей через базу характеризуется коэффициентом переноса:

$$\varepsilon = I_{Kp} / I_{Эp} ,$$

где  $I_{Kp}$  – ток, образованный дырками, дошедшими до коллекторного перехода в области базы.

Дырки, подошедшие к обратно включенному коллекторному переходу, попадают в его ускоряющее поле и экстрагируются в коллектор, создавая управляемую составляющую тока коллектора  $I_{K \text{ упр}}$ .

Экстракция дырок может сопровождаться ударной ионизацией атомов полупроводника и лавинным умножением носителей заряда в коллекторном переходе. Этот процесс оценивается коэффициентом лавинного умножения  $M = I_{K \text{ упр}} / I_{Kp}$ . В лавинных транзисторах  $M > 1$ , а в обычных –  $M = 1$ .

Составляющую тока коллектора, вызванную инжекцией основных носителей эмиттера в базу, называют управляемым током коллектора  $I_{K \text{ упр}} = \gamma \varepsilon M I_{Э}$ . Величину  $\alpha = \gamma \varepsilon M < 1$  называют статическим коэффициентом передачи по току в схеме с ОБ (статический коэффициент передачи тока эмиттера). Часто для  $\alpha$  используют обозначение  $h_{21Б}$ . Значения параметра  $\alpha$  лежат в диапазоне **0,95...0,999**.

Кроме управляемого тока коллектора  $I_{K \text{ упр}}$  через коллекторный переход протекает обратный неуправляемый ток  $I_{КБО}$ , обусловленный экстракцией собственных неосновных носителей базы (дырок) и коллектора (электронов) (рисунок 3). Поэтому для полного тока коллектора справедливо выражение

$$I_K = \alpha I_{Э} + I_{КБО} . \quad (1)$$

Обратный ток коллекторного перехода  $I_{КБО}$  совпадает по направлению с управляемым током коллектора  $I_{K \text{ упр}}$ , а в цепи базы  $I_{КБО}$  противоположен току рекомбинации, поэтому полный ток базы определяется разностью

$$I_B = I_{B \text{ рек}} - I_{КБО} .$$

Величина тока  $I_{КБО}$  для германиевых транзисторов составляет десятки микроампер, а для кремниевых транзисторов – сотни наноампер, причем сильно зависит от температуры. Поэтому (1) можно упростить  $I_K \approx \alpha I_{Э}$ . Из рисунка 3 согласно закону Кирхгофа для токов можно записать выражение, связывающее токи всех трех выводов БТ:

$$I_3 = I_K + I_B, \quad (2)$$

которое называют внутренним уравнением транзистора.

Выражение, связывающее выходной  $I_K$  и входной ток  $I_B$  транзистора, включенного по схеме с ОЭ, можно получить, подставив (2) в (1):

$$I_K = (\alpha/(1-\alpha))I_B + I_{KB0}/(1-\alpha) = \beta I_B + (\beta+1)I_{KB0} = \beta I_B + I_{K30} \quad (3)$$

Параметр  $\beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1$  называют статическим коэффициентом передачи по току в схеме с ОЭ (статический коэффициент передачи тока базы). Часто для  $\beta$  используют обозначение  $h_{213}$ . Ток  $I_{K30} = I_{KB0}(\beta + 1)$  называют начальным сквозным током транзистора. Коэффициент  $\beta$  принимает значения, лежащие в диапазоне десятки – сотни раз.

В транзисторе, включенном по схеме с ОБ, отсутствует усиление по току ( $\alpha < 1$ ), но происходит усиление входного сигнала по мощности. В активном режиме токи коллектора и эмиттера практически равны, а незначительный ток базы равен их разности. Величина коллекторного тока практически не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поэтому дифференциальное сопротивление коллекторного перехода  $r_K = dU_{KB}/dI_K$  очень велико (переход включен в обратном направлении). В связи с этим транзистор можно рассматривать как источник тока, поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузку с достаточно большим сопротивлением  $R_H$ , что практически не изменит коллекторный ток. Дифференциальное сопротивление прямовключенного эмиттерного перехода очень мало:

$r_3 = dU_{3B}/dI_3 \ll r_K$  и  $r_3 \ll R_H$ . Из вышесказанного следует, что при изменении входного (эмиттерного) тока на  $\Delta I_3$  практически на такую же величину изменяется и коллекторный ток  $\Delta I_K \approx \Delta I_3$ . Однако изменение потребляемой мощности в цепи эмиттера  $\Delta P_{вх} = \Delta I_3^2 r_3$  значительно меньше изменения мощности в выходной цепи  $\Delta P_{вых} = \Delta I_K^2 R_H \approx \Delta I_3^2 R_H$ , т. е. транзистор способен управлять большой мощностью в коллекторной цепи при небольших затратах мощности в эмиттерной цепи. Коэффициент усиления по мощности определяется выражением

$$K_p = \Delta P_{вых} / P_{вх} \approx R_H / r_3 \gg 1 \quad (4)$$

Статические ВАХ отражают зависимости между постоянными входными и выходными токами и напряжениями транзистора. Если в качестве независимых переменных выбрать значения входного тока и выходного напряжения, а в качестве функций – значения выходного тока и входного напряжения  $I_{вх}, U_{вых} = f(I_{вх}, U_{вых})$ , то для любой схемы включения транзистора можно получить четыре семейства статических ВАХ:

ВХОДНЫЕ  $U_{ВХ} = f(I_{ВХ}) \mid U_{ВЫХ} = \text{const}$ ,

ВЫХОДНЫЕ  $I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ}) \mid I_{ВХ} = \text{const}$ ,

прямой передачи по току  $I_{ВЫХ} = f(I_{ВХ}) \mid U_{ВЫХ} = \text{const}$ ,

обратной связи по напряжению  $U_{ВХ} = f(U_{ВЫХ}) \mid I_{ВХ} = \text{const}$ .

На рисунках 4 и 5 приведены графики семейств статических ВАХ транзистора, имеющего р-п-р-структуру, для включения с ОБ и ОЭ соответственно.

Дифференциальные малосигнальные h-параметры БТ. При выполнении малосигнального анализа усилительных устройств по переменному току транзистор удобно рассматривать в виде линейного четырехполюсника, который описывается системой h-параметров, связывающей между собой амплитудные (действующие) значения переменных составляющих входных и выходных токов и напряжений

$$U_{ВХ} = h_{11} I_{ВХ} + h_{12} U_{ВЫХ}; \quad (5)$$

$$I_{ВЫХ} = h_{21} I_{ВХ} + h_{22} U_{ВЫХ}. \quad (6)$$

Поочередно подставив в (5) и (6) значения  $I_{ВХ} = 0$  и  $U_{ВЫХ} = 0$ , задающие режимы холостого хода (ХХ) по входу и короткого замыкания (КЗ) по выходу соответственно, получим следующие выражения для h-параметров, которые определяют их физический смысл:

$h_{11} = U_{ВХ} / I_{ВХ} \mid U_{ВЫХ} = 0$  – входное сопротивление в режиме КЗ по выходу;

$h_{12} = U_{ВХ} / U_{ВЫХ} \mid I_{ВХ} = \text{const}$ , – коэффициент обратной связи по напряжения в режиме ХХ по входу;

$h_{21} = I_{ВЫХ} / I_{ВХ} \mid U_{ВЫХ} = 0$  – коэффициент передачи по току в режиме КЗ по выходу;

$h_{22} = I_{ВЫХ} / U_{ВЫХ} \mid I_{ВХ} = \text{const}$  – входная проводимость в режиме по входу.

Для расчета h-параметров удобно использовать семейства входных и выходных характеристик БТ. Рассмотрим порядок графоаналитического метода расчета h-параметров БТ с ОЭ. Для определения дифференциальных параметров  $h_{11э}$  и  $h_{12э}$  в заданной рабочей точке А ( $U_{Бэ0}$ ,  $I_{Б0}$ ,  $U_{Кэ0}$ ) на линейном участке семейства входных характеристик необходимо выполнить построения, как показано на рисунке 5,а. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{БЭ}=\text{const}} = \left. \frac{U_{БЭ}'' - U_{БЭ}'}{I_{Б}'' - I_{Б}'} \right|_{U_{БЭ}=\text{const}}, \quad (7)$$

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} = \left. \frac{U_{БЭ}'' - U_{БЭ}'}{U_{КЭ}'' - U_{КЭ}'} \right|_{I_{Б}=\text{const}}. \quad (8)$$

Параметры  $h_{21э}$  и  $h_{22э}$  определяются по семейству выходных характеристик. Обратите внимание на различие в обозначении статического коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ  $h_{21э}$  и дифференциального параметра  $h_{21э}$ . В окрестности точки  $A'$  ( $I_{К0}$ ,  $U_{КЭ0}$ ,  $I_{Б0}$ ), соответствующей точке  $A$  на семействе входных характеристик, выполняют построения, как показано на рисунке 5,6. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}} = \left. \frac{I_{К}'' - I_{К}'}{I_{Б}'' - I_{Б}'} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}}, \quad (9)$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} = \left. \frac{I_{К}^{iv} - I_{К}^{iii}}{U_{КЭ}'' - U_{КЭ}'} \right|_{I_{Б}=\text{const}}. \quad (10)$$

Аналогично определяются  $h$ -параметры для транзистора с ОБ.

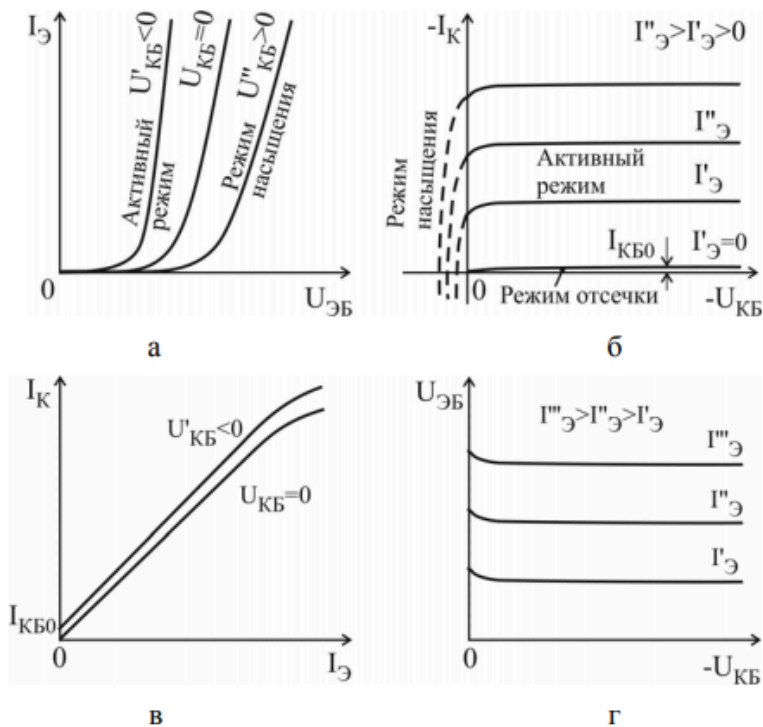


Рисунок 4 – Графики семейств статических ВАХ транзистора, имеющего р-п-р-структуру, для включения с ОБ

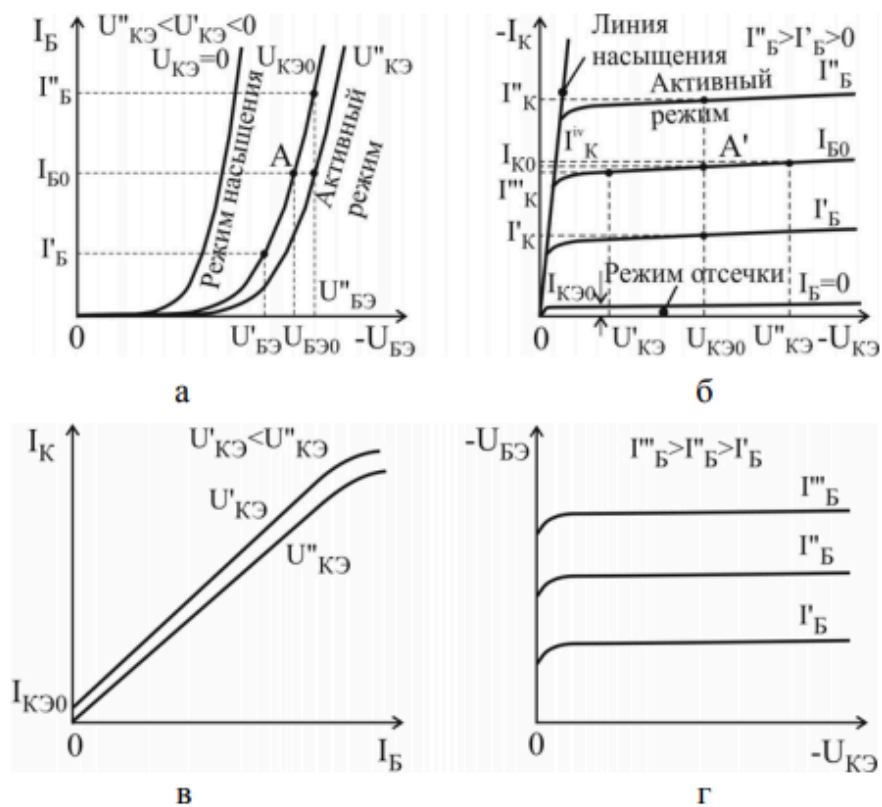


Рисунок 5 – Графики семейств статических ВАХ транзистора, имеющего р-п-р-структуру, для включения с ОЭ

Физическая Т-образная эквивалентная схема БТ наряду с h-параметрами также достаточно полно отражает свойства реального транзистора на низких частотах и широко используется для анализа малосигнальных транзисторных усилителей. Физические Т-образные эквивалентные схемы БТ с ОБ и ОЭ представлены на рисунке 6,а,б соответственно. Значения параметров эквивалентных схем БТ могут быть найдены с использованием известных h-параметров для включения БТ:

$$\text{с ОБ: } r_6 = \frac{h_{126}}{h_{226}}, \quad r_k = \frac{1}{h_{226}}, \quad \alpha_{\sim} = -h_{216}, \quad r_3 = h_{116} - (1 - h_{216})r_6; \quad (11)$$

$$\text{с ОЭ: } r_3 = \frac{h_{123}}{h_{223}}, \quad r^*_k = \frac{1}{h_{223}}, \quad \beta_{\sim} = h_{213}, \quad r_6 = h_{113} - (1 + h_{213})r_3. \quad (12)$$

Поскольку коэффициенты обратной связи по напряжению  $h_{216}$  и  $h_{213}$  для обеих схем включения БТ имеют очень малую величину, точность их вычисления с использованием статических ВАХ оказывается низкой. В связи с этим расчет параметров эквивалентной схемы необходимо начинать с расчета дифференциального сопротивления эмиттерного перехода:

$$r_3 = \varphi_T / I_{30}, \quad (13)$$

где  $\varphi_T = kT/q$  – тепловой потенциал, равный 26 мВ при  $T=300$  К;  
 $I_{30}$  – ток эмиттера БТ в рабочей точке.

С учетом этого в (11) объемное сопротивление базы БТ необходимо рассчитывать согласно выражению

$$r_6 = (h_{116} - r_3) / (1 - h_{216}), \quad (14)$$

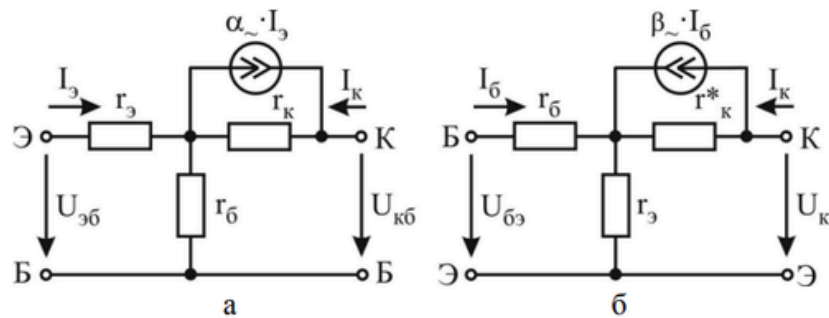


Рисунок 6 – Физические Т-образные эквивалентные схемы БТ с ОБ и ОЭ

Параметры эквивалентных схем маломощных БТ принимают следующие типовые значения:

дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода  $r_3$  – единицы – десятки ом;

объемное сопротивление базы  $r_6$  – сотни ом – единицы килоом;

выходное сопротивление в схеме с ОБ  $r_k$  – сотни килоом – единицы мегаом;

выходное сопротивление в схеме с ОЭ  $r_k^* = r_k / (h_{21э} + 1)$  – десятки – сотни килоом.

Максимально допустимые параметры БТ. Для обеспечения надежной работы аппаратуры режимы работы транзисторов должны выбираться таким образом, чтобы ток и напряжение не выходили за пределы области допустимых режимов, которая определяется следующими параметрами: максимально допустимый постоянный ток коллектора  $I_{kmax}$ ;

максимально допустимое постоянное обратное напряжение коллектор – эмиттер  $U_{кэmax}$ ;

максимально допустимое постоянное обратное напряжение эмиттер – база  $U_{эбmax}$ ;

максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора

$$P_{kmax} = I_k U_{кэ}.$$

Обычно в справочнике приводятся значения этих параметров для температуры корпуса  $T_{к1}$ , при которой обеспечивается максимальная мощность рассеивания. При увеличении температуры выше  $T_{к1}$  рассеиваемая мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{kmax} = (T_n - T_{к1}) / R_{Tpk}, \quad (15)$$

где  $T_n$  – температура перехода;

$T_k$  – температура корпуса;

$R_{T_{пк}}$  – тепловое сопротивление переход – корпус.

Классификация и система обозначений биполярных транзисторов. По мощности, рассеиваемой коллектором, транзисторы бывают малой мощности  $P_{K_{max}} \leq 0,3 \text{ Вт}$ ; средней мощности  $0,3 \text{ Вт} < P_{K_{max}} \leq 1,5 \text{ Вт}$ ; большой мощности  $P_{K_{max}} > 1,5 \text{ Вт}$ .

По частотному диапазону в зависимости от граничной или максимальной рабочей частоты транзисторы делятся на:

- низкочастотные  $f_{гр} \leq 3 \text{ МГц}$ ;
- средней частоты  $3 \text{ МГц} < f_{гр} \leq 30 \text{ МГц}$ ;
- высокочастотные  $30 \text{ МГц} < f_{гр} \leq 300 \text{ МГц}$ ;
- сверхвысокочастотные  $f_{гр} > 300 \text{ МГц}$

Для маркировки биполярных транзисторов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.038-77. Обозначение биполярных транзисторов состоит из шести или семи элементов.

Первый элемент – буква русского алфавита или цифра, указывающая исходный материал: Г(1) – германий, К(2) – кремний, А(3) – арсенид галлия.

Второй элемент – буква, указывающая на тип транзистора: Т – биполярный, П – полевой.

Третий элемент – цифра, указывающая на частотные свойства и рассеиваемую мощность транзистора (таблица 1).

Четвертый, пятый, (шестой) элементы – цифры, указывающие порядковый номер разработки.

Шестой (седьмой) элемент – буква русского алфавита, условно определяющая классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии.

Примеры обозначения транзисторов:

- **КТ315А** – кремниевый БТ, малой мощности, высокой частоты, номер разработки 15, группа А;
- **КТ806Б** – кремниевый БТ, большой мощности, средней частоты, номер разработки 06, группа Б;
- **ГТ108А** – германиевый БТ, малой мощности, низкой частоты, номер разработки 08, группа А;
- **КТ3126Б** – кремниевый БТ, малой мощности, высокой частоты, номер разработки 126, группа Б.

Таблица 1 – Частотные свойства и рассеиваемая мощность транзистора

Частота	Мощность		
	Малая	Средняя	Большая
Низкая	1	4	7
Средняя	2	5	8
Высокая	3	6	9

В интегральных схемах при реализации полупроводниковых диодов используются входящие в состав полупроводниковых интегральных микросхем транзисторные структуры в диодном включении, как показано на рисунке 7.



Рисунок 7 – Транзисторные структуры в диодном включении

### Порядок выполнения работы.

Выбрать различные типы исследуемых транзисторов и привести их справочные данные. Определить область допустимых режимов работы для исследуемого прибора и нанести границы этой области в системе координат ток–напряжение, как показано на рисунке 8.

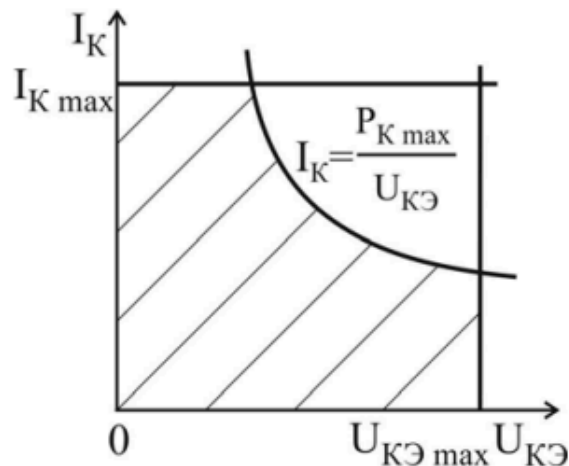


Рисунок 8 – Область допустимых режимов работы для исследуемого прибора и границы этой области в системе координат ток–напряжение

Внимание!!! Для предотвращения электрического повреждения транзисторов измерения необходимо проводить только в области допустимых режимов работы.

Собрать схему для исследования характеристик транзистора с ОБ, изображенную на рисунке 9,а для БТ р-п-р-типа или на рисунке 9,б для п-р-п-типа.

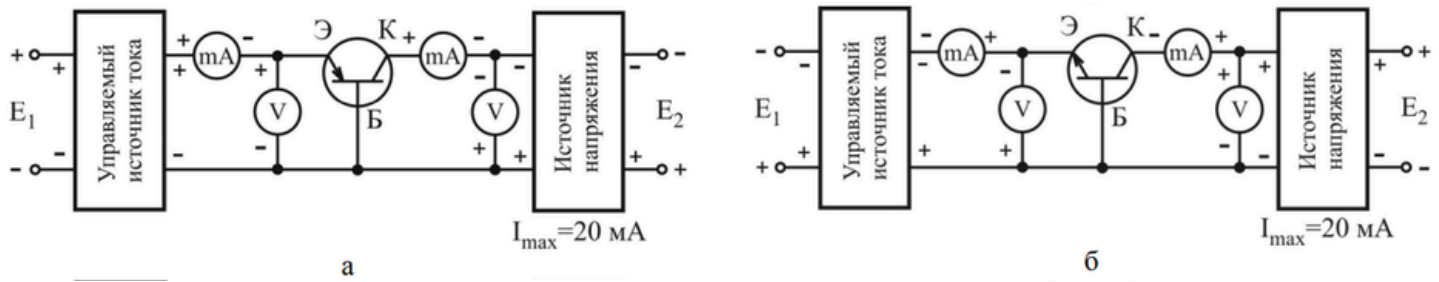


Рисунок 9 – Схемы для исследования характеристик транзистора с ОБ, для БТ а) р-п-р-типа; б) п-р-п-типа

Для предотвращения повреждения БТ исследования проводить для области режимов работы, ограниченной следующими значениями параметров:  $I_K = 10 \text{ mA}$  и  $|U_{КБ}| = 10 \text{ В}$ . С этой целью необходимо экспериментально определить ток эмиттера, задающий ток коллектора  $I_K = 10 \text{ mA}$  при напряжении коллектор – база  $|U_{КБ}| = 10 \text{ В}$ . Обозначить эту величину  $I_{\text{Э}}^*$ . Знак  $U_{КБ}$  определяется типом структуры транзистора и соответствует рисунку 9,а или рисунку 9,б.

Снять семейство входных характеристик  $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})$  для трех значений напряжения коллектор – база:  $|U_{КБ}| = 0; 5; 10 \text{ В}$ .

Снять семейство выходных характеристик  $I_K = f(U_{КБ})$  для трех значений тока эмиттера:  $I_{\text{Э}} = 0,3 \cdot I_{\text{Э}}^*; 0,6 \cdot I_{\text{Э}}^*; I_{\text{Э}}^*$ .

Снять семейство характеристик прямой передачи по току  $I_K = f(I_{\text{Э}})$  для двух значений напряжения коллектор – база  $|U_{КБ}| = 0; 5 \text{ В}$ .

Снять семейство характеристик обратной связи по напряжению  $U_{\text{ЭБ}} = f(U_{КБ})$  для трех значений тока эмиттера:  $I_{\text{Э}} = 0,3 \cdot I_{\text{Э}}^*; 0,6 \cdot I_{\text{Э}}^*; I_{\text{Э}}^*$ .

Снять семейство выходных характеристик транзистора в инверсном режиме  $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})$  для трех значений тока эмиттера:  $I_{\text{Э}} = 0,3 \cdot I_{\text{Э}}^*; 0,6 \cdot I_{\text{Э}}^*; I_{\text{Э}}^*$ .

Для обеспечения инверсного режима работы БТ достаточно в схеме поменять местами эмиттер и коллектор. Обратит внимание на справочную величину максимально допустимого обратного напряжения эмиттер – база  $U_{\text{ЭБ max}}$  и напряжение эмиттер – база изменять до значения  $|U_{\text{ЭБ}}| = U_{\text{ЭБ max}}$ .

По полученным данным построить графики семейств статических ВАХ транзистора и рассчитать дифференциальные h-параметры в рабочей точке  $|U_{КБ}| = 5 \text{ В}$  и  $I_{\text{Э}} = 0,6 \cdot I_{\text{Э}}^*$ . Для инверсного режима рассчитать величину  $h_{216 \text{ и }} = \Delta I_{\text{Э}} / \Delta I_K |_{U_{\text{ЭБ}} = \text{const}}$  в рабочей точке  $|U_{\text{ЭБ}}| = 2 \text{ В}$  и  $I_K = 0,6 \cdot I_{\text{Э}}^*$ .

Рассчитать значения параметров Т-образной эквивалентной схемы БТ.

Собрать схему для исследования характеристик транзистора с ОЭ, изображенную на рисунке 10,а для БТ р-п-р-типа или на рисунке 10,б для п-р-п-типа.

Для предотвращения повреждения БТ исследования проводить для области режимов работы, ограниченной следующими значениями параметров:  $I_K=10\text{мА}$  и  $|U_{КЭ}|=10\text{В}$ . С этой целью необходимо экспериментально определить ток базы, задающий ток коллектора  $I_K=10\text{мА}$  при напряжении коллектор – эмиттер  $|U_{КЭ}|=10\text{В}$ . Обозначить эту величину  $I_B^*$ . Знак  $U_{КЭ}$  определяется типом структуры транзистора и соответствует рисунку 10,а или рисунку 10,б.

Снять семейство входных характеристик транзистора  $I_B = f(U_{БЭ})$  для трех значений напряжения коллектор – эмиттер:  $|U_{КЭ}| = 0; 5; 10\text{В}$ .

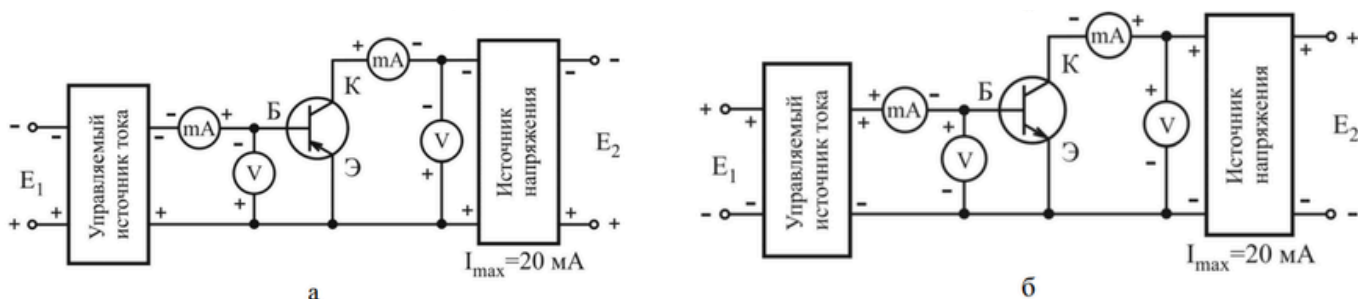


Рисунок 10 – Схемы для исследования характеристик транзистора с ОЭ, для БТ а) р-п-р-типа; б) п-р-п-типа

Снять семейство выходных характеристик транзистора  $I_K = f(U_{КЭ})$  для трех значений тока базы:  $I_B = 0,3 \cdot I_B^*; 0,6 \cdot I_B^*; I_B^*$ .

Снять семейство характеристик прямой передачи по току  $I_K = f(I_B)$  для двух значений напряжения коллектор – эмиттер  $|U_{КЭ}| = 0; 5\text{В}$ .

Снять семейство характеристик обратной связи по напряжению  $U_{БЭ} = f(U_{КЭ})$  для трех значений тока базы:  $I_B = 0,3 \cdot I_B^*; 0,6 \cdot I_B^*; I_B^*$ .

Снять семейство выходных характеристик транзистора в инверсном режиме  $I_Э = f(U_{ЭК})$  для трех значений тока базы:  $I_B = 0,3 \cdot I_B^*; 0,6 \cdot I_B^*; I_B^*$ . Для обеспечения инверсного режима работы транзистора достаточно в схеме поменять местами эмиттер и коллектор. Обратит внимание на справочную величину максимально допустимого обратного напряжения эмиттер – база  $U_{ЭБ\text{max}}$  и напряжение эмиттер – коллектор изменять до значения  $|U_{ЭК}| = U_{ЭБ\text{max}}$ .

По полученным данным построить графики семейств статических ВАХ транзистора и рассчитать дифференциальные h-параметры в рабочей точке  $|U_{КЭ}| = 5\text{В}$  и  $I_B = 0,6 \cdot I_B^*$ . Для инверсного режима рассчитать величину  $h_{21э и} = \Delta I_Э / \Delta I_Б |_{U_{ЭК} = \text{const}}$  в рабочей точке  $|U_{ЭК}| = 2\text{В}$  и  $I_B = 0,6 \cdot I_B^*$ .

## Выполнение работы:

Исследование выходных характеристик БТ в схеме с общей базой (ОБ)

Для исследования характеристик БТ собрать цепь по схеме, представленной на рисунке 11.

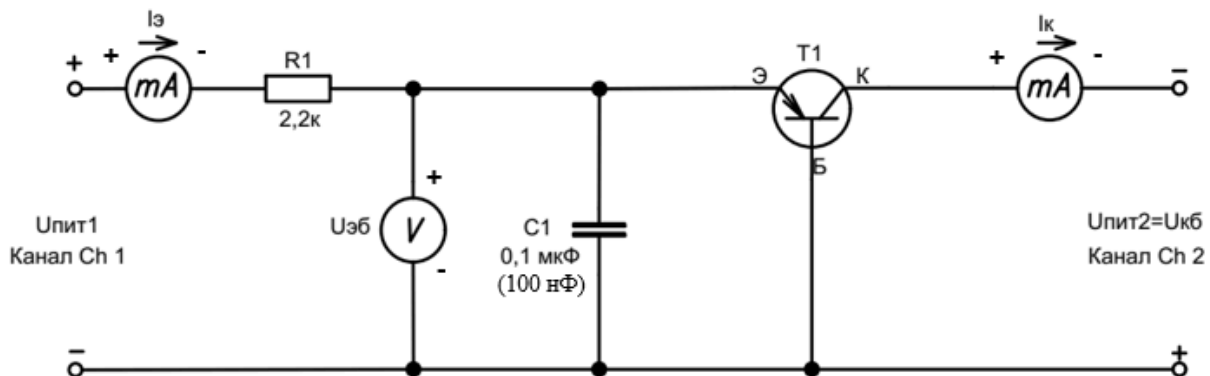


Рисунок 11 – Схема исследования выходных характеристик БТ в схеме с ОБ

Семейство выходных характеристик БТ в схеме с ОБ  $I_k=f(U_{кб})$  измерить для двух фиксированных значений входного тока эмиттера  $I_э = 3; 9\text{ мА}$ . Результаты исследований занесены в таблицу 1 и таблицу 2 соответственно.

Таблица 1 – Результаты измерения выходной характеристики БТ (изменять значение  $U_{пит2}$ )  $I_k = f(U_{кб})$ , при фиксированном значении  $I_э = 3\text{ мА}$  (устанавливается при  $U_{пит2} = 10\text{ В}$ )

$U_{кб}, \text{ В}$	10	9	8	7	6	5	4
$I_k, \text{ мА}$							
$U_{эб}, \text{ В}$							
$U_{кб}, \text{ В}$	3	2	1	0,6	0,3	0,1	0,001
$I_k, \text{ мА}$							
$U_{эб}, \text{ В}$							

Таблица 2 – Результаты измерения выходной характеристики БТ (изменять значение  $U_{пит2}$ )  $I_k = f(U_{кб})$ , при фиксированном значении  $I_э = 9\text{мА}$  (устанавливается при  $U_{пит2} = 10\text{В}$ )

$U_{кб}, \text{В}$	10	9	8	7	6	5	4
$I_k, \text{мА}$							
$U_{эб}, \text{В}$							
$U_{кб}, \text{В}$	3	2	1	0,6	0,3	0,1	0,001
$I_k, \text{мА}$							
$U_{эб}, \text{В}$							

По результатам измерений БТ в схеме с ОБ построить графики выходных характеристик БТ.

Расчет дифференциальных параметров БТ в схеме с ОБ

По построенным графикам характеристик БТ в схеме с ОБ рассчитать его дифференциальные параметры в окрестностях рабочей точки  $I_э = 9\text{мА}$ ,  $U_{кб} = 10\text{В}$ .

$$h_{11Б} = \dots; h_{12Б} = \dots; h_{21Б} = \dots; h_{22Б} = \dots$$

Исследование выходных характеристик БТ в схеме с общим эмиттером (ОЭ)

Для исследования характеристик БТ собрана цепь по схеме, представленной на рисунке 12.

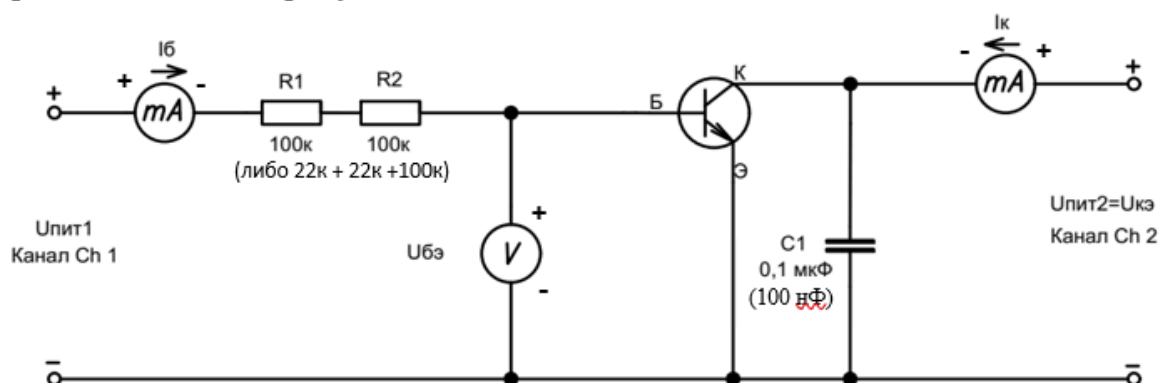


Рисунок 12 – Схема исследования выходных характеристик БТ в схеме с ОЭ

Семейство выходных характеристик БТ в схеме с ОЭ  $I_k=f(U_{кэ})$  измерено для двух фиксированных значений входного тока базы  $I_b = X_1; X_2$  мА. Результаты исследований занесены в таблицу 3 и таблицу 4 соответственно.

Таблица 3 – Результаты измерения выходной характеристики БТ (изменять значение  $U_{пит2}$ )  $I_k = f(U_{кэ})$ , при фиксированном значении  $I_b = X_1$  (из таблицы 4 ЛР №5) = ... мА (устанавливается при  $U_{пит2} = 10В$ )

$U_{кэ}, В$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0,5	0,1	0,01
$I_k, мА$	0												
$U_{бэ}, В$	0												

Таблица 4 – Результаты измерения выходной характеристики БТ (изменять значение  $U_{пит2}$ )  $I_k = f(U_{кэ})$ , при фиксированном значении  $I_b = X_2$  (из таблицы 4 ЛР №5) = ... мА (устанавливается при  $U_{пит2} = 10В$ )

$U_{кэ}, В$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0,5	0,1	0,01
$I_k, мА$	0												
$U_{бэ}, В$	0												

По результатам измерений БТ в схеме с ОЭ построить графики выходных характеристик БТ.

Расчет дифференциальных параметров БТ в схеме с ОЭ

По построенным графикам характеристик БТ в схеме с ОЭ рассчитать его дифференциальные параметры в окрестности рабочей точки  $I_b=x_2$  (из таблицы 4) = ... мА,  $U_{кэ} = 10В$ .

$$h_{11э} = \dots; h_{12э} = \dots; h_{21э} = \dots; h_{22э} = \dots$$

По наклону полученных графиков определить выходное сопротивление биполярного транзистора с ОБ и с ОЭ и определить токовые коэффициенты усиления с ОЭ и ОБ

### **Содержание отчёта.**

1. Тема работы.
2. Цель работы.
3. Оснащение работы.
4. Паспортные данные исследованных приборов и график с областью допустимых режимов работы.
5. Принципиальная схема установки для исследования ВАХ БТ.
6. Результаты экспериментальных исследований в виде таблиц и графиков.
7. Расчеты.
8. Выводы.
9. Ответы на контрольные вопросы.

**Вывод:** в ходе лабораторной работы были изучены .... Проведенные эксперименты позволили установить следующие ключевые моменты:

Принцип работы: ....

Основные параметры и характеристики: ....

Зависимость параметров от условий эксплуатации: ....

Система обозначений и применение: ....

### **Контрольные вопросы.**

1. Перечислите основные явления, происходящие в структуре БТ при работе в активном режиме.
2. Что показывает величина статического коэффициента передачи по току?
3. Почему обратный ток коллекторного перехода  $I_{кб0}$  называют неуправляемым или тепловым током?
4. Изобразите графики выходных семейств ВАХ транзистора с ОБ и ОЭ? Поясните характер поведения этих зависимостей?