

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3,4

### ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

#### 1. Краткие теоретические сведения

##### Устройство и принцип действия транзистора.

**Биполярный транзистор** – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-n-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 рис. 5.1 показано устройство и УГО БТ со структурой р-n-р- и n-p-n-типа соответственно. Принцип их действия одинаков, различие заключается только в полярности подключения источников внешнего напряжения и в направлении протекания токов через электроды.

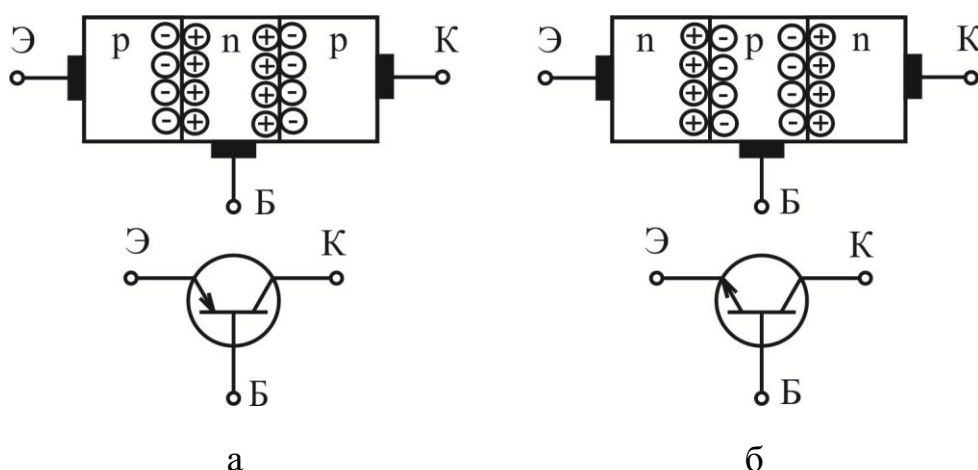


Рис. 5.1. Графическое представление структуры и УГО БТ  
а – структура р-n-р-типа; б – структура n-p-n-типа

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.

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 рис. 5.2 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.

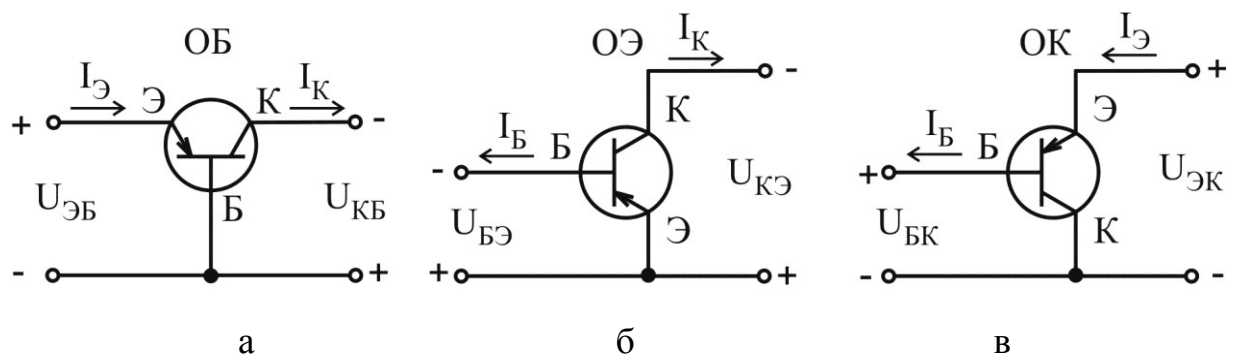


Рис. 5.2. Схемы включения БТ:

а – с общей базой; б – с общим эмиттером; в – с общим коллектором

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 минув 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.

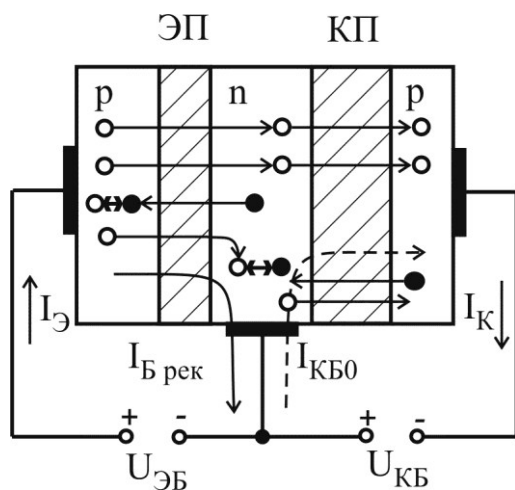


Рис. 5.3. Графическое изображение процессов протекания тока в БТ

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.

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  $I_{Б рек}$ . Процесс переноса неосновных носителей через базу характеризуется коэффициентом переноса  $\varepsilon = I_{Кр} / I_{Эр}$ , где  $I_{Кр}$  — ток, образованный дырками, дошедшими до коллекторного перехода в области базы.

Дырки, подошедшие к обратновключенному коллекторному переходу, попадают в его ускоряющее поле и экстрагируют в коллектор, создавая **управляемую составляющую тока коллектора**  $I_{К упр}$ .

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

Составляющую тока коллектора, вызванную инжекцией основных носителей эмиттера в базу, называют **управляемым током коллектора**  $I_{К упр} = \gamma \varepsilon M I_{Э}$ . Величину  $\alpha = \gamma \varepsilon M < 1$  называют **статическим**

Рассмотрим принцип действия БТ p-n-p-типа в активном режиме, включенного с ОБ (рис. 5.3). 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

**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  $I_{К\text{упр}}$  через коллекторный переход протекает **обратный неуправляемый ток**  $I_{КБ0}$ , обусловленный экстракцией собственных неосновных носителей базы (дырок) и коллектора (электронов) (см. рис. 5.3). Поэтому для полного тока коллектора справедливо выражение

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{КБ0}. \quad (5.1)$$

**Обратный ток коллекторного перехода**  $I_{КБ0}$  совпадает по направлению с управляемым током коллектора  $I_{К\text{упр}}$ , а в цепи базы  $I_{КБ0}$  противоположен току рекомбинации, поэтому полный ток базы определяется разностью  $I_B = I_{Б\text{рек}} - I_{КБ0}$ . Величина тока  $I_{КБ0}$  для германиевых транзисторов составляет десятки микроампер, а для кремниевых транзисторов – сотни наноампер, причем сильно зависит от температуры. Поэтому (5.1) можно упростить  $I_K \approx \alpha I_{\mathcal{E}}$ .

Из рис. 5.3, согласно закону Кирхгофа для токов, можно записать выражение, связывающее токи всех трех выводов БТ:

$$I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B, \quad (5.2)$$

которое называют внутренним уравнением транзистора.

Выражение, связывающее выходной  $I_K$  и входной  $I_B$  ток транзистора, включенного по схеме с ОЭ, можно получить, подставив (5.2) в (5.1):

$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{КБ0}}{1-\alpha} = \beta I_B + (\beta + 1) I_{КБ0} = \beta I_B + I_{КЭ0}. \quad (5.3)$$

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  $h_{21\mathcal{E}}$ . Ток  $I_{КЭ0} = I_{КБ0}(\beta + 1)$  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  $r_k = \frac{dU_{КБ}}{dI_K}$  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:

$$r_э = \frac{dU_{эБ}}{dI_э} \ll r_K \text{ и } r_э \ll R_H. \text{ Из вышесказанного следует, что при изменении}$$

входного (эмиттерного) тока на  $\Delta I_э$  практически на такую же величину изменяется и коллекторный ток  $\Delta I_K \approx \Delta I_э$ . Однако изменение потребляемой мощности в цепи эмиттера  $\Delta P_{вх} = \Delta I_э^2 r_э$  значительно меньше изменения мощности в выходной цепи  $\Delta P_{вых} = \Delta I_K^2 R_H \approx \Delta I_э^2 R_H$ , т. е. транзистор способен управлять большой мощностью в коллекторной цепи при небольших затратах мощности в эмиттерной цепи. Коэффициент усиления по мощности определяется выражением

$$K_P = \frac{\Delta P_{вых}}{\Delta P_{вх}} \approx \frac{R_H}{r_э} \gg 1. \quad (5.4)$$

**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  $U_{вх}, I_{вых} = f(I_{вх}, U_{вых})$ , то для любой схемы включения транзистора можно получить **четыре семейства статических ВАХ**: **входные**  $U_{вх} = f(I_{вх})|_{U_{вых}=\text{const}}$ , **выходные**  $I_{вых} = f(U_{вых})|_{I_{вх}=\text{const}}$ , **прямой передачи по току**  $I_{вых} = f(I_{вх})|_{U_{вых}=\text{const}}$  и **обратной связи по напряжению**  $U_{вх} = f(U_{вых})|_{I_{вх}=\text{const}}$ . На рис. 5.4, 5.5 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

$$U_{вх} = h_{11}I_{вх} + h_{12}U_{вых}; \quad (5.5)$$

$$I_{вых} = h_{21}I_{вх} + h_{22}U_{вых}. \quad (5.6)$$

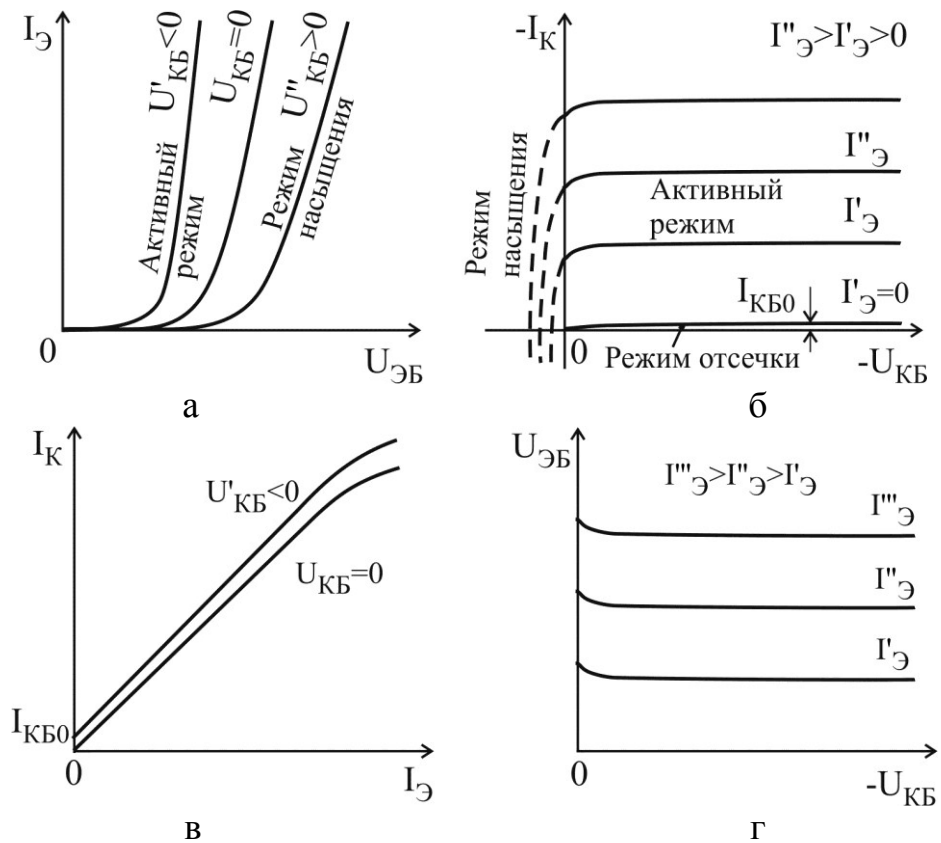


Рис. 5.4. Семейства ВАХ БТ, включённого по схеме с ОБ:  
а – входное; б – выходное; в – прямой передачи; г – обратной связи

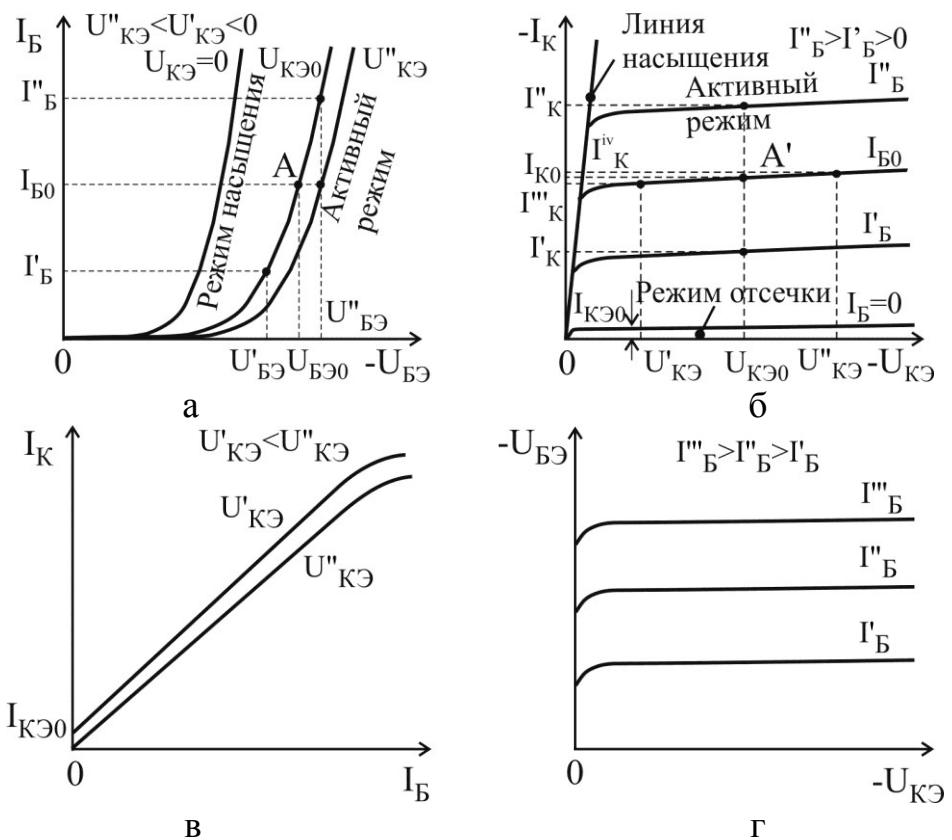


Рис. 5.5. Семейства ВАХ БТ, включённого по схеме с ОЭ:  
а – входное; б – выходное; в – прямой передачи; г – обратной связи

Поочередно подставив в (5.5) и (5.6) значения  $I_{\text{ВХ}} = 0$  и  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ , 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:

$$h_{11} = \left. \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}}=0} \quad - \text{входное сопротивление в режиме КЗ по выходу;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}}=0} \quad - \text{коэффициент обратной связи по напряжению в режиме ХХ по входу;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}}=0} \quad - \text{коэффициент передачи по току в режиме КЗ по выходу;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}}=0} \quad - \text{выходная проводимость в режиме ХХ по входу.}$$

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 ( $U_{\text{БЭ}0}$ ,  $I_{\text{Б}0}$ ,  $U_{\text{КЭ}0}$ ) на линейном участке семейства входных характеристик необходимо выполнить построения, как показано на рис. 5.5, а. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЭ}}=\text{const}} = \left. \frac{U_{\text{БЭ}}'' - U_{\text{БЭ}}'}{I_{\text{Б}}'' - I_{\text{Б}}'} \right|_{U_{\text{КЭ}}=\text{const}}; \quad (5.7)$$

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}} \right|_{I_{\text{Б}}=\text{const}} = \left. \frac{U_{\text{БЭ}}'' - U_{\text{БЭ}0}}{U_{\text{КЭ}}'' - U_{\text{КЭ}}'} \right|_{I_{\text{Б}}=\text{const}}. \quad (5.8)$$

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 А' ( $I_{\text{К}0}$ ,  $U_{\text{КЭ}0}$ ,  $I_{\text{Б}0}$ ), соответствующей точке А на семействе входных характеристик, выполняют построения, как показано на рис. 5.5, б. Найденные приращения токов и напряжений позволяют определить искомые параметры:

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЭ}}=\text{const}} = \left. \frac{I_{\text{К}}'' - I_{\text{К}}'}{I_{\text{Б}}'' - I_{\text{Б}}'} \right|_{U_{\text{КЭ}}=\text{const}}; \quad (5.9)$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = \text{const}} = \left. \frac{I_K^{iv} - I_K^{'''}}{U_{КЭ}'' - U_{КЭ}'} \right|_{I_B = \text{const}}. \quad (5.10)$$

Аналогично определяются h-параметры для транзистора с ОБ.

**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 рис. 5.6, а, б соответственно. Значения параметров эквивалентных схем БТ могут быть найдены с использованием известных h-параметров для включения БТ:

$$\text{с ОБ:} \quad r_э = \frac{h_{12б}}{h_{22б}}, \quad r_к = \frac{1}{h_{22б}}, \quad \alpha_{\sim} = -h_{21б}, \quad r_б = h_{11б} - (1 - h_{21б})r_э; \quad (5.11)$$

$$\text{с ОЭ:} \quad r_э = \frac{h_{12э}}{h_{22э}}, \quad r_к^* = \frac{1}{h_{22э}}, \quad \beta_{\sim} = h_{21э}, \quad r_б = h_{11э} - (1 + h_{21э})r_э. \quad (5.12)$$

Поскольку коэффициенты обратной связи по напряжению  $h_{21б}$  и  $h_{21э}$  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:

$$r_э = \frac{\varphi_T}{I_{э0}}, \quad (5.13)$$

где  $\varphi_T = kT/q$  – тепловой потенциал, равный 26 мВ при  $T = 300$  К;  $I_{э0}$  – ток эмиттера БТ в рабочей точке.

С учетом этого в (5.11) объемное сопротивление базы БТ необходимо рассчитывать согласно выражению

$$r_б = (h_{11б} - r_э)/(1 - h_{21б}). \quad (5.14)$$

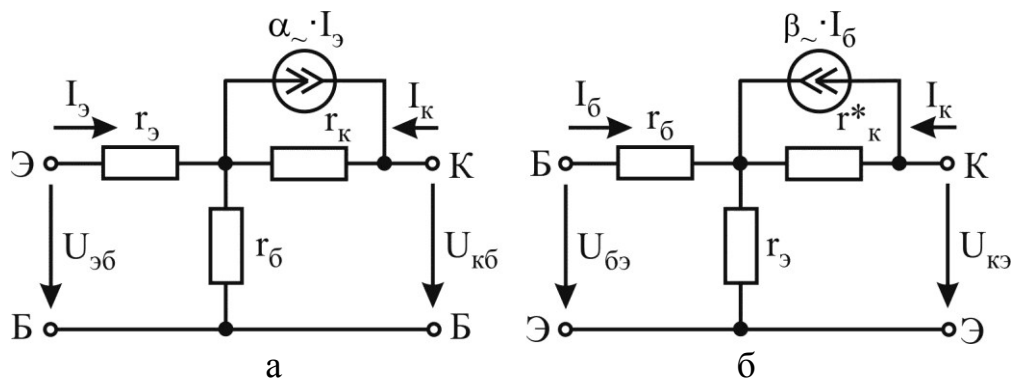


Рис. 5.6. Т-образная эквивалентная схема:  
а – БТ в схеме с ОБ; б – БТ в схеме с ОЭ



Параметры эквивалентных схем маломощных БТ принимают следующие типовые значения: *дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода*  $r_g$  – единицы – десятки ом; *объемное сопротивление базы*  $r_b$  – 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

$$P_{Kmax} = (T_{п} - T_{к}) / R_{ТПК}, \quad (5.15)$$

где  $T_{п}$  – температура перехода;  $T_{к}$  – температура корпуса;  $R_{ТПК}$  – тепловое сопротивление переход – корпус.

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

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 11.335.038-77. 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 (табл. 5.1).

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 5.1

Обозначения частоты и мощности транзисторов

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 рис. 5.7.

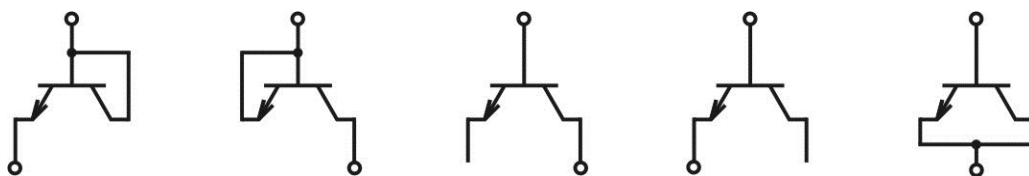


Рис. 5.7. Реализация диодов в интегральных схемах с использованием транзисторных структур

**Усилителем электрических сигналов** называется устройство, предназначенное для увеличения мощности сигнала, поданного на его вход. Процесс усиления основан на преобразовании активным элементом (биполярным, полевым транзистором) энергии источника постоянного напряжения в энергию переменного напряжения на нагрузке при изменении сопротивления активного элемента под действием входного сигнала.

Работа усилительных устройств описывается рядом параметров и характеристик.

**Коэффициент усиления, или коэффициент передачи** – отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного в установившемся

режиме при гармоническом входном сигнале. Сигнал может описываться напряжением, током или мощностью, поэтому различают:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_u = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ ;
- коэффициент усиления по току  $K_i = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}}$ ;
- коэффициент усиления по мощности  $K_p = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$ .

Для многокаскадных усилителей коэффициент усиления определяется произведением коэффициентов усиления отдельных каскадов, выраженных в абсолютных единицах:

$$K_u = K_{u1} K_{u2} \dots K_{un} \text{ (раз)}$$

или суммой коэффициентов усиления, выраженных в децибелах:

$$K_u = K_{u1} + K_{u2} + \dots + K_{un} \text{ (дБ)}.$$

Источником нелинейных искажений являются нелинейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) активных элементов усилителя, а также ограниченное значение напряжения питания. Это приводит к искажению формы сигнала и появлению высших гармонических составляющих в спектре выходного сигнала при действии на входе гармонического сигнала.

**Линейные искажения** определяются зависимостями параметров транзисторов от частоты и реактивными элементами усилительных устройств. Линейные искажения бывают трех видов: частотные, фазовые и переходные.

**Амплитудная характеристика (АХ)** – это зависимость амплитуды (или действующего значения) напряжения первой гармоники выходного сигнала от амплитуды (или действующего значения) напряжения гармонического входного сигнала (рис. 6.1). Для идеального усилителя АХ линейна и проходит через начало координат (штриховая линия), наклон характеристики к оси абсцисс определяется коэффициентом усиления  $U_{\text{ВЫХ}} = K_u \cdot U_{\text{ВХ}}$ .

Отличие реальной АХ от идеальной при малых входных сигналах обусловлено влиянием помех (шумы усилителя, наводки, фон и т. д.), которые приводят к наличию выходного сигнала при отсутствии входного. АХ реального усилителя становится нелинейной при превышении входного напряжения значения  $U_{\text{ВХ max}}$ , что обусловлено нелинейностью ВАХ активного элемента и ограниченным значением напряжения питания  $U_{\text{ИП}}$ . В случае резистивного усилителя  $U_{\text{ВЫХ max}} \leq U_{\text{ИП}}/2$ .

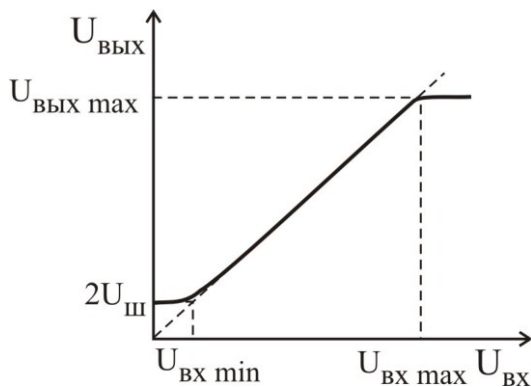


Рис. 6.1. Амплитудная характеристика

По АХ легко определить динамический диапазон усилителя.

Минимальной амплитудой напряжения входного сигнала следует считать такое ее значение, при котором амплитуда напряжения выходного сигнала в два раза превышает амплитуду напряжения шумов на выходе усилителя. Максимальная амплитуда напряжения входного сигнала ограничивается допустимым уровнем коэффициента гармоник.

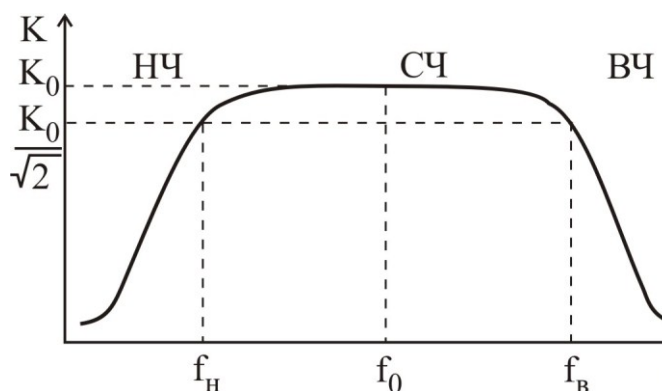


Рис. 6.2. Амплитудно-частотная характеристика

**Амплитудно-частотная характеристика** (АЧХ) определяет зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала на входе усилителя. На рис. 6.2 представлена типичная АЧХ резистивного усилителя.

В полосе пропускания усилителя или области средних частот (СЧ) коэффициент усиления можно считать постоянной величиной.

Частоты, на которых коэффициент усиления уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз относительно своего значения  $K_0$  в области СЧ, определяют нижнюю  $f_H$  и верхнюю  $f_B$  границы полосы пропускания усилителя и называются **граничными частотами**. Для определенности величину  $K_0$  находят на частоте  $f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_B}$ . Уменьшение модуля коэффициента усиления в области низких частот (НЧ) обусловлено наличием разделительных и блокировочных конденсаторов в схемах усилителей. Поведение АЧХ в области высоких частот (ВЧ) определяется частотными свойствами транзисторов, влиянием емкости монтажа и комплексного характера сопротивления нагрузки.

В усилительном каскаде при отсутствии входного сигнала устанавливаются постоянные значения токов и напряжений, которые определяют **статический режим работы (режим по постоянному току или режим покоя) транзистора**. Значения постоянных токов и напряжений определяются напряжениями источника (источников) питания и сопротивлениями нагрузок во входной и выходной цепях активного элемента. Соответствующая режиму покоя точка на ВАХ транзистора называется **рабочей точкой**. Положение рабочей точки выбирается исходя из требуемого режима работы активного элемента.

**Режим класса А.** В данном режиме ток в выходной цепи активного элемента протекает в течение всего периода входного сигнала. Положение рабочей точки выбирается таким образом, что амплитуда переменной составляющей выходного тока  $I_{km}$ , появившегося в результате входного сигнала, не превышает ток покоя  $I_{K0}$  (рис. 6.4). Рабочая точка на выходной

характеристике для резистивного усилителя определяется половиной напряжения питания:  $U_{КЭ0} \approx U_{ИП} / 2$ .

Режим класса А характеризуется работой транзистора на линейных участках ВАХ. В связи с этим нелинейные искажения сигнала минимальны ( $K_r \leq 1\%$ ). Максимальное значение КПД в этом режиме мало, для резистивного усилителя  $\eta_{\max} \leq 25\%$ .

**Режим класса В.** Ток в выходной цепи активного элемента протекает в течение половины периода входного сигнала. Рабочая точка на ВАХ выбирается так, что входной ток покоя равен нулю (рис. 6.5). При этом входной и выходной токи имеют форму импульса с углом отсечки  $90^\circ$ .

**Угол отсечки** – половина части периода, выраженная в радианах или градусах, в течение которой транзистор открыт и через него протекает ток.

Из-за нелинейности начального участка ВАХ активного элемента форма входного и выходного токов существенно отличается от формы, соответствующей линейному элементу (см. рис. 6.5).

Для усиления другой полуволны входного сигнала используют еще один транзистор, такой усилитель называется двухтактным. Режим класса В характеризуется большими нелинейными искажениями сигнала ( $K_r \leq 10\%$ ), обусловленными работой на нелинейных начальных участках ВАХ транзистора и высоким КПД. Максимальный КПД имеет величину 78 %.

**Режим класса АВ.** Ток в выходной цепи активного элемента протекает в течение промежутка времени больше половины периода входного сигнала. Угол отсечки достигает  $120...150^\circ$ .

В режиме покоя транзистор приоткрыт, и через него протекает ток, равный 5...15 % максимального тока при заданном входном сигнале (рис. 6.6). Используется для уменьшения нелинейных искажений, присущих режиму класса В. Коэффициент гармоник уменьшается ( $K_r \leq 3\%$ ), но уменьшается и КПД за счет наличия входного тока покоя  $I_{Б0}$ .

Существуют различные способы задания режима работы по постоянному току.

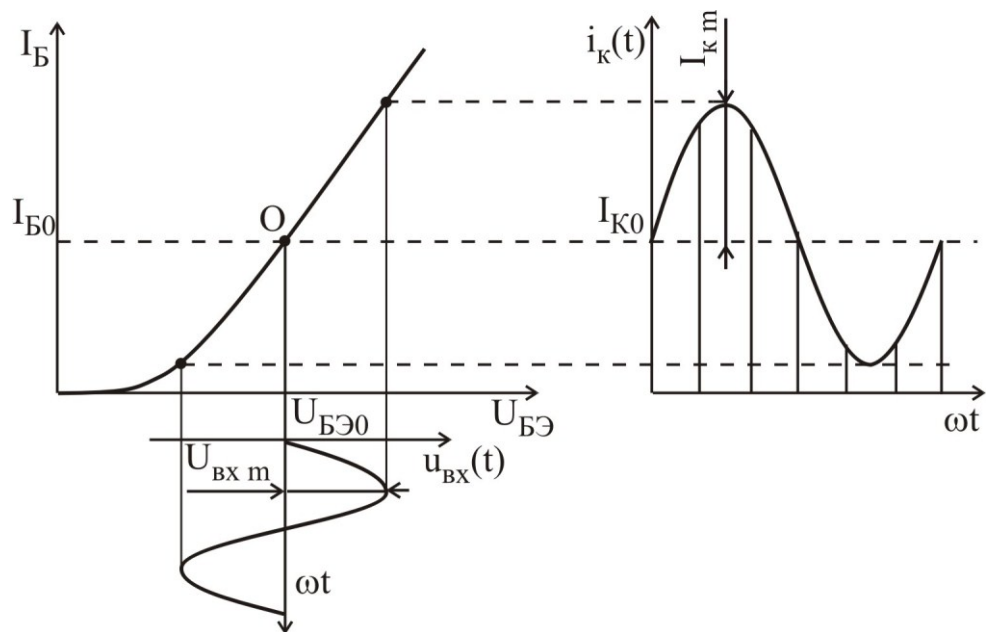


Рис. 6.4. Токи БТ в режиме класса А

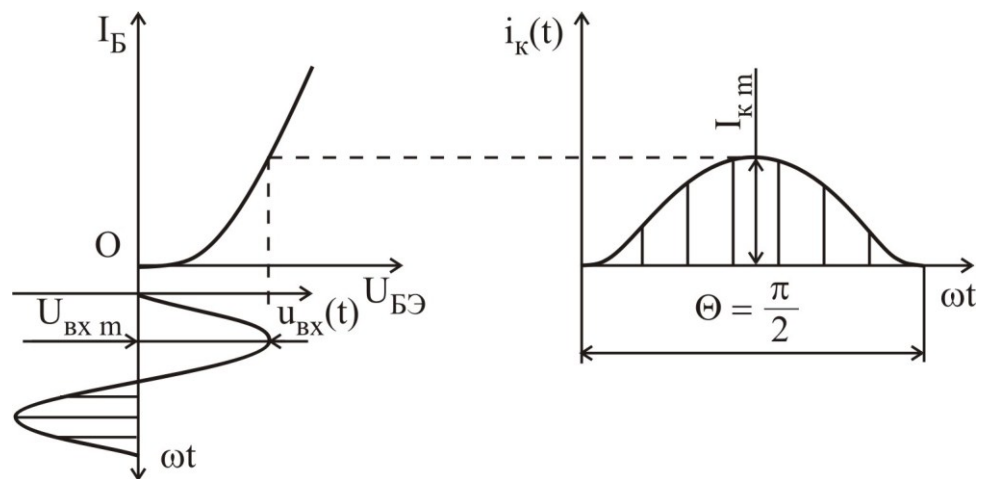


Рис. 6.5. Токи БТ в режиме класса В

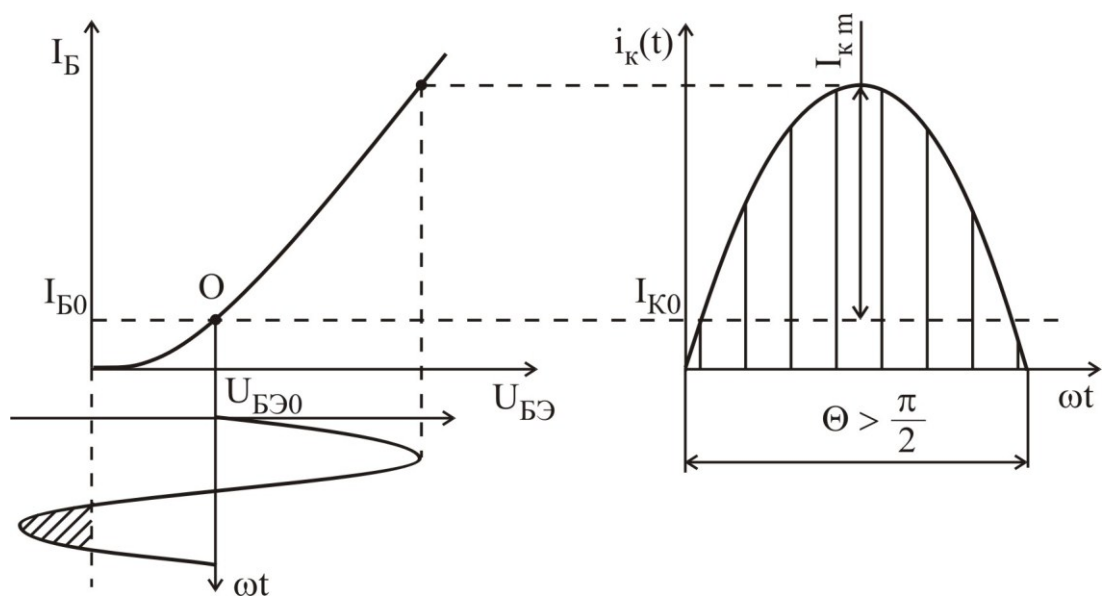


Рис. 6.6. Токи БТ в режиме класса АВ

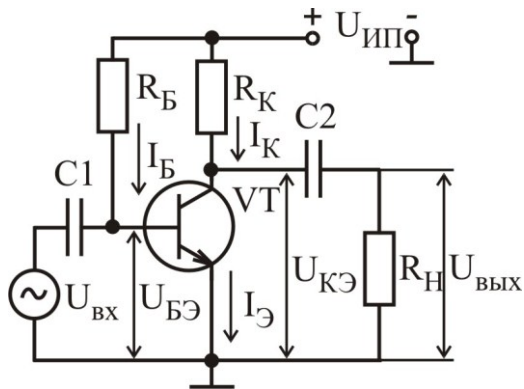


Рис. 6.7. Схема каскада с фиксированным током базы

**Схема с фиксированным током базы.** Режим по постоянному току задается с помощью резисторов  $R_Б$ ,  $R_К$  и источника питания  $U_{ИП}$  (рис. 6.7). Уравнение для входной цепи согласно второму закону Кирхгофа имеет вид

$$U_{ИП} = I_Б \cdot R_Б + U_{БЭ}, \quad (6.2)$$

где  $U_{БЭ} \approx 0,6 \dots 0,8$  В (напряжение на открытом эмиттерном переходе кремниевого БТ), т. е.  $U_{БЭ} \ll U_{ИП}$ ,

поэтому ток в цепи базы  $I_Б \approx U_{ИП}/R_Б$  не зависит от параметров транзистора, а определяется параметрами входной цепи.

Рассмотрим принцип работы усилителя на примере простейшей схемы (см. рис. 6.7). Усиливаемый сигнал  $U_{ВХ}$  подается на базу транзистора через конденсатор  $C1$  большой емкости. Выходной сигнал через конденсатор  $C2$  большой емкости подается на нагрузку с сопротивлением  $R_Н$ , которой может служить следующий усилительный каскад.

**Схема с коллекторной стабилизацией.** На рис. 6.8 представлена схема с коллекторной стабилизацией, в которой резистор  $R_Б$  подключается к коллектору транзистора с напряжением  $U_{КЭ}$ , тогда

$$I_Б = \frac{U_{КЭ} - U_{БЭ}}{R_Б} \approx \frac{U_{КЭ}}{R_Б} \approx \frac{U_{ИП} - I_К \cdot R_К}{R_Б}. \quad (6.3)$$

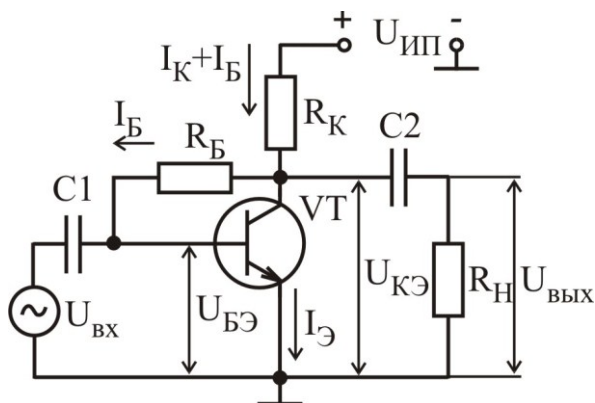


Рис. 6.8. Схема каскада с коллекторной стабилизацией

При повышении температуры коллекторный ток увеличивается, следовательно, коллекторное напряжение  $U_{КЭ}$  уменьшается, а значит, уменьшается ток базы  $I_Б$ , что приводит к уменьшению коллекторного тока  $I_К$ . Эти два фактора частично компенсируют друг друга, поэтому рабочая точка стремится вернуться в исходное положение.

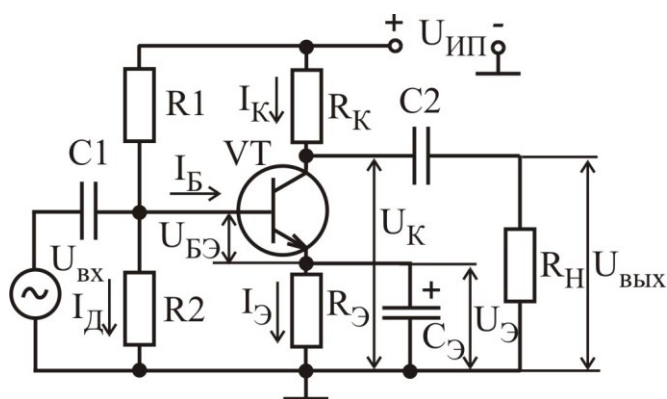


Рис. 6.9 Схема каскада с эмиттерной стабилизацией

### Схема с эмиттерной стабилизацией.

Наиболее эффективной является схема с эмиттерной стабилизацией рабочей точки (рис. 6.9). Повышение температуры приводит к увеличению тока  $I_K$ , уменьшению напряжения на коллекторе  $U_K$  и увеличению эмиттерного тока  $I_Э = I_K + I_Б$ . В результате увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_Э$ . Поскольку потенциал базы

транзистора  $U_Б = U_{R2} = I_Д \cdot R2$  зафиксирован делителем напряжения  $R1, R2$ , то напряжение между базой и эмиттером  $U_{БЭ}$  уменьшается:

$$U_{БЭ} = U_{R2} - I_Э R_Э \approx \frac{U_{ип} \cdot R2}{R1 + R2} - I_Э R_Э. \quad (6.4)$$

Это приведет к уменьшению тока базы  $I_Б$ , а значит, и коллекторного тока  $I_K$ . Происходит частичная взаимная компенсация этих двух факторов, влияющих на рабочую точку транзистора, поэтому ее положение практически не изменяется.

Наличие резистора  $R_Э$  – резистора обратной связи – при отсутствии конденсатора  $C_Э$  не только стабилизирует рабочую точку, но и изменяет работу каскада по переменному току. Для схемы изменяющийся входной сигнал также является дестабилизирующим фактором. Переменная составляющая эмиттерного тока с амплитудой  $I_{эм}$  создает на резисторе  $R_Э$  падение напряжения, которое уменьшает амплитуду переменной составляющей напряжения:

$$U_{бэ м} = U_{вх м} - R_Э I_{эм}, \quad (6.5)$$

что приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада.

## 2. Контрольные вопросы и задания

1. Какой полупроводниковый прибор называется биполярным транзистором?
2. Перечислите основные элементы структуры БТ.
3. Каким условиям должна удовлетворять структура БТ для обеспечения взаимодействия электронно-дырочных переходов?
4. Перечислите основные явления, происходящие в структуре БТ при работе в активном режиме.



5. Что показывает величина статического коэффициента передачи по току?

6. Почему обратный ток коллекторного перехода  $I_{КБ0}$  называют неуправляемым или тепловым током?

7. Почему в биполярном транзисторе происходит усиление электрических колебаний по мощности?

8. Почему транзистор в схеме включения с ОЭ может обеспечить усиление по току, а в схеме с ОБ нет?

9. Изобразите графики входных и выходных семейств ВАХ транзистора с ОБ и ОЭ. Поясните характер поведения этих зависимостей.

10. Перечислите основные режимы работы БТ и укажите соответствующие им области на выходных семействах БТ с ОБ и ОЭ.

11. Поясните физический смысл  $h$ -параметров БТ.

12. Какие параметры ограничивают область максимально допустимых режимов работы БТ?

13. Поясните принцип работы усилителя на БТ.

14. Основные режимы работы усилителей.