

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3,4

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

1. Краткие теоретические сведения

Устройство и принцип действия транзистора.

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p-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 p-n-p- 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.

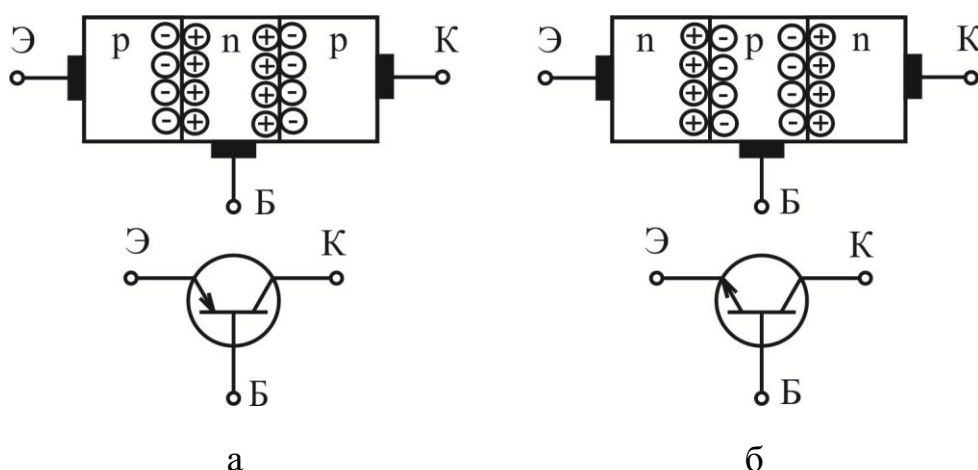


Рис. 5.1. Графическое представление структуры и УГО БТ
а – структура p-n-p-типа; б – структура n-p-n-типа

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.

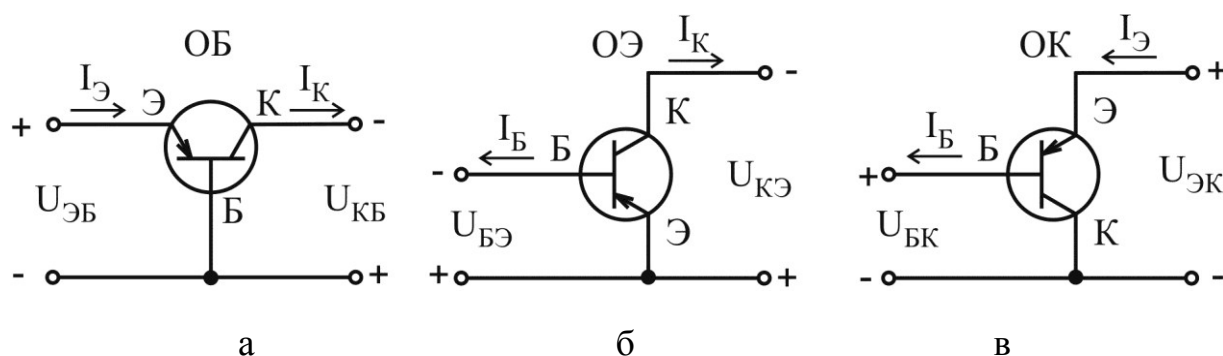


Рис. 5.2. Схемы включения БТ:

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 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.

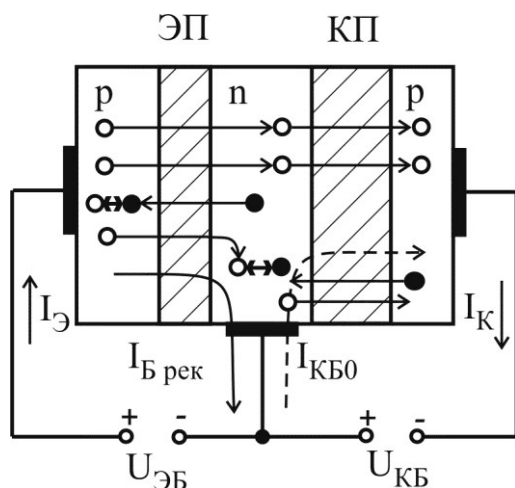


Рис. 5.3. Графическое изображение процессов протекания тока в БТ р-n-p-типа в активном режиме, включенного с ОБ (рис. 5.3). При увеличении прямого напряжения $U_{ЭБ}$ на эмиттерном переходе снижается его потенциальный барьер, что вызывает рост инжекции дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в 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 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 р-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 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**

~~коэффициентом передачи по току в схеме с ОБ (статический коэффициент передачи тока эмиттера).~~ Часто для α используют обозначение $h_{21Б}$. Значения параметра α лежат в диапазоне $0,95 \dots 0,999$.

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 β используют обозначение $h_{21\mathcal{E}}$. Ток $I_{КЭ0} = I_{КБ0}(\beta+1)$ называют **начальным сквозным током** транзистора. Коэффициент β 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

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

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

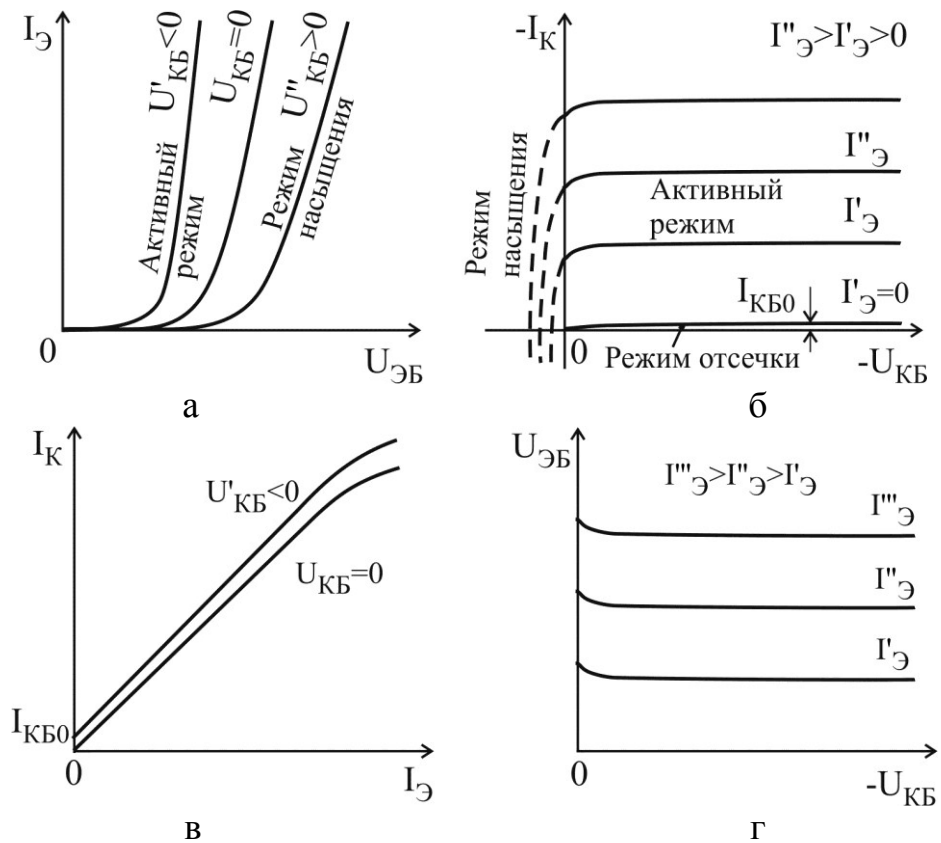


Рис. 5.4. Семейства ВАХ БТ, включённого по схеме с ОБ:
а – входное; б – выходное; в – прямой передачи; г – обратной связи

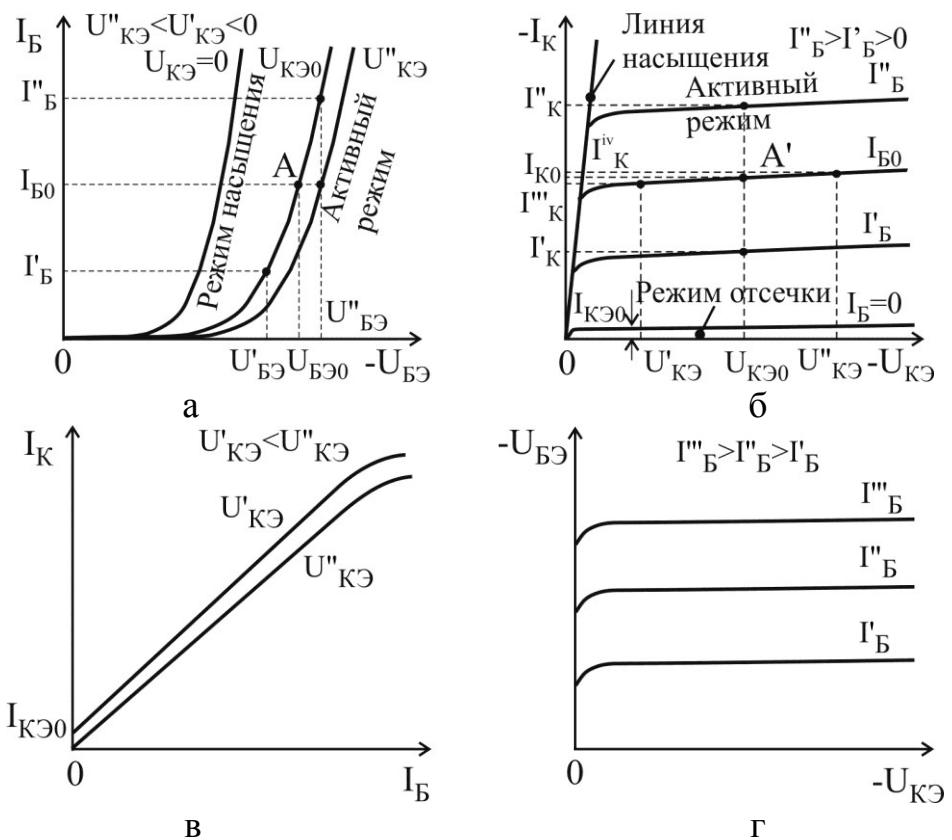


Рис. 5.5. Семейства ВАХ БТ, включённого по схеме с ОЭ:
а – входное; б – выходное; в – прямой передачи; г – обратной связи

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 ($U_{\text{БЭ0}}$, $I_{\text{Б0}}$, $U_{\text{КЭ0}}$) 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:

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

$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}} \right|_{I_{\text{Б}}=\text{const}} = \left. \frac{U_{\text{БЭ}}'' - U_{\text{БЭ0}}}{U_{\text{КЭ}}'' - U_{\text{КЭ}}'} \right|_{I_{\text{Б}}=\text{const}}. \quad (5.8)$$

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' ($I_{\text{К0}}$, $U_{\text{КЭ0}}$, $I_{\text{Б0}}$), 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

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

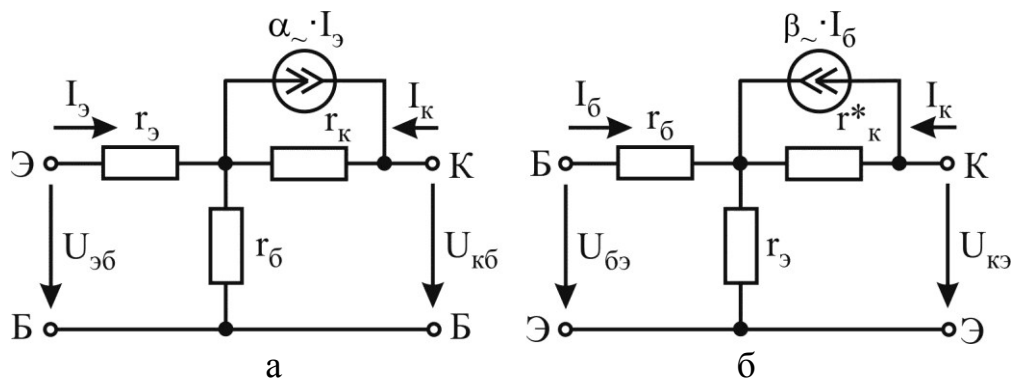


Рис. 5.6. Т-образная эквивалентная схема:
а – БТ в схеме с ОБ; б – БТ в схеме с ОЭ

Параметры эквивалентных схем маломощных БТ принимают следующие типовые значения: *дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода* r_e – 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.

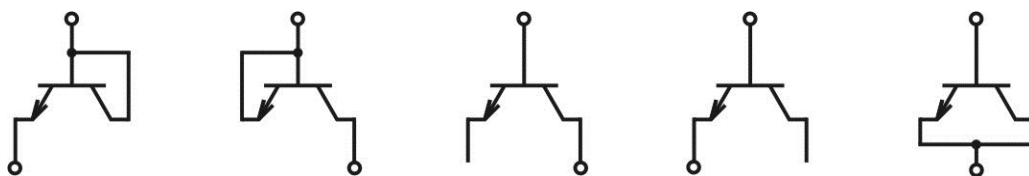


Рис. 5.7. Реализация диодов в интегральных схемах с использованием транзисторных структур

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 $U_{\text{ВЫХ}} = K_u \cdot U_{\text{ВХ}}$.

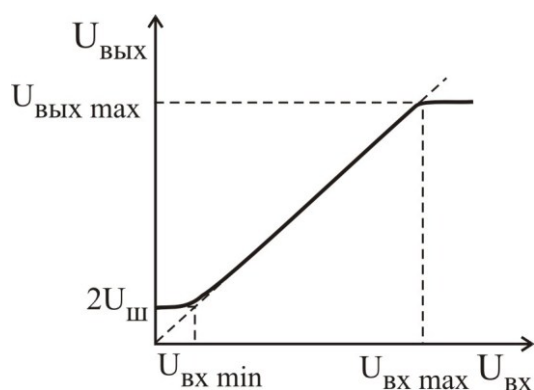


Рис. 6.1. Амплитудная характеристика

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 $U_{\text{ВЫХ max}} \leq U_{\text{ИП}}/2$. 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.

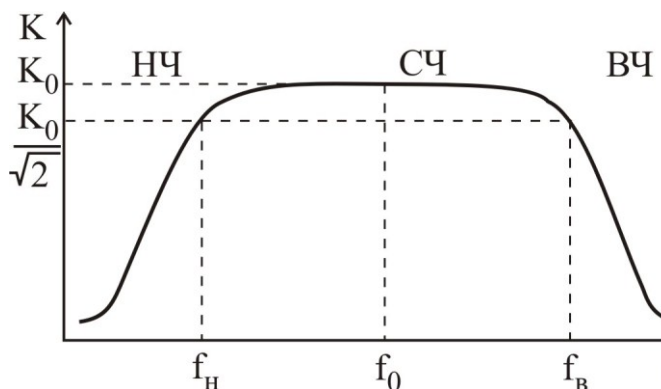


Рис. 6.2. Амплитудно-частотная характеристика

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° .

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.

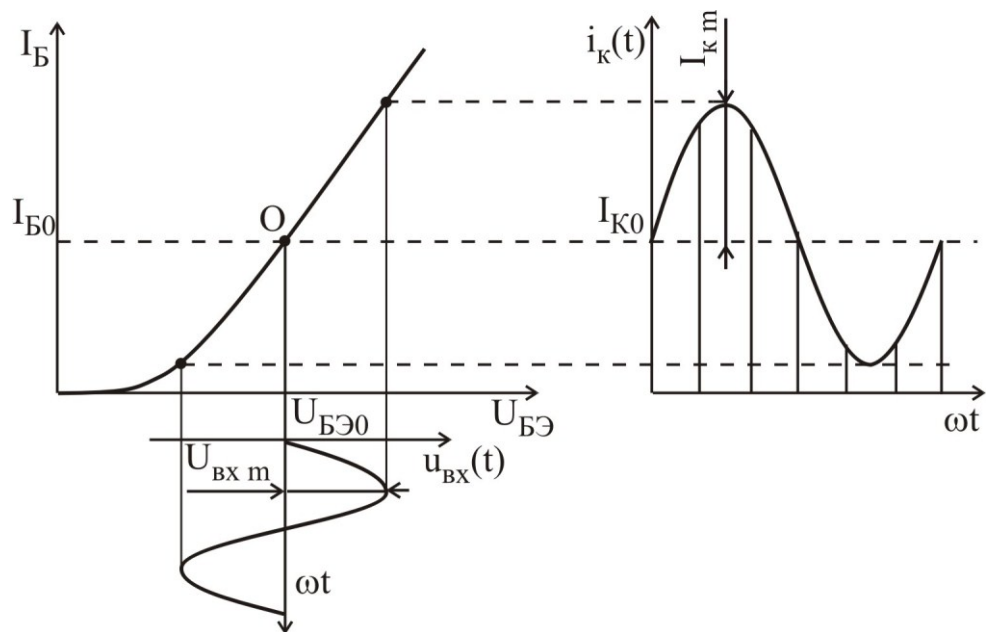


Рис. 6.4. Токи БТ в режиме класса А

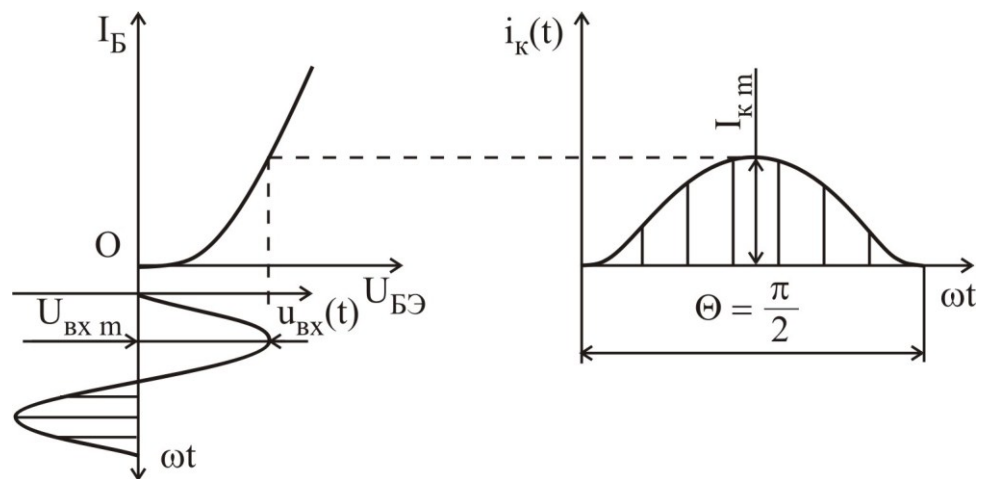


Рис. 6.5. Токи БТ в режиме класса В

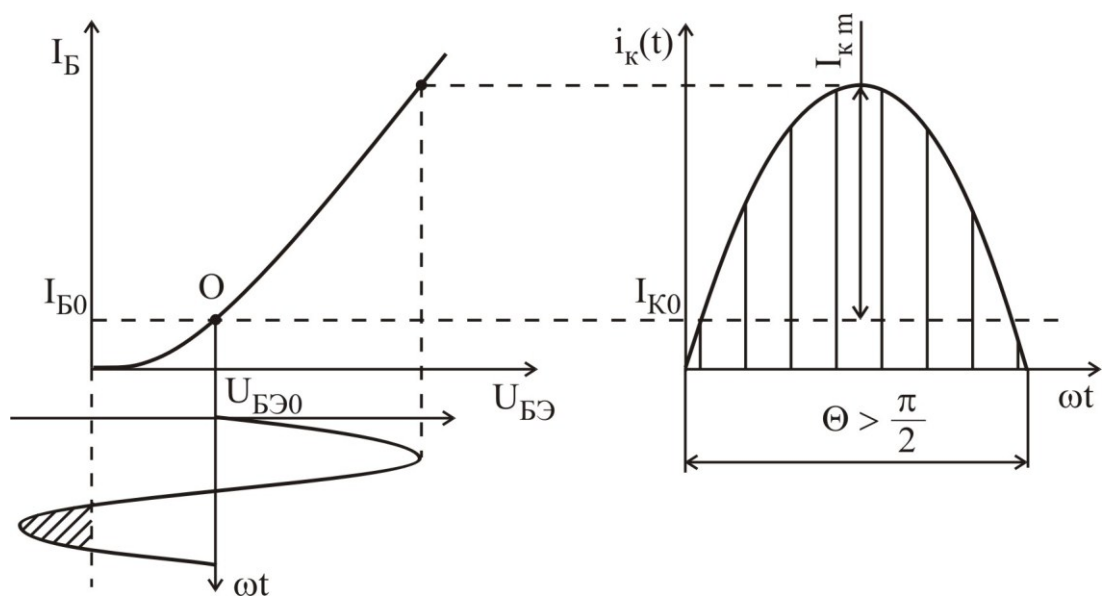


Рис. 6.6. Токи БТ в режиме класса АВ

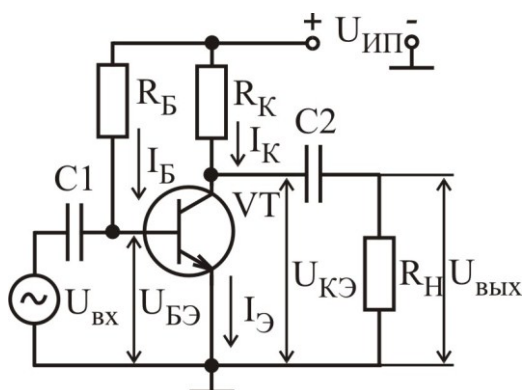


Рис. 6.7. Схема каскада с фиксированным током базы

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

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

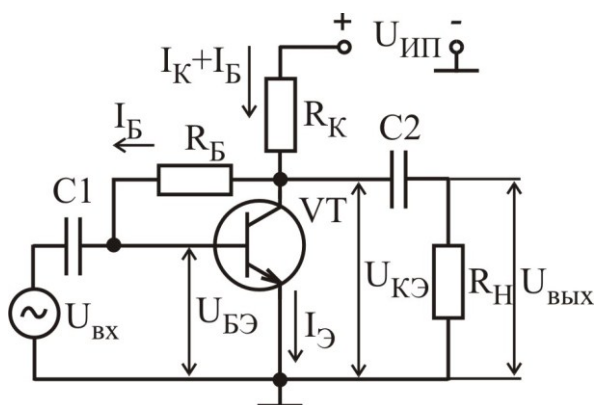


Рис. 6.8. Схема каскада с коллекторной стабилизацией

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.

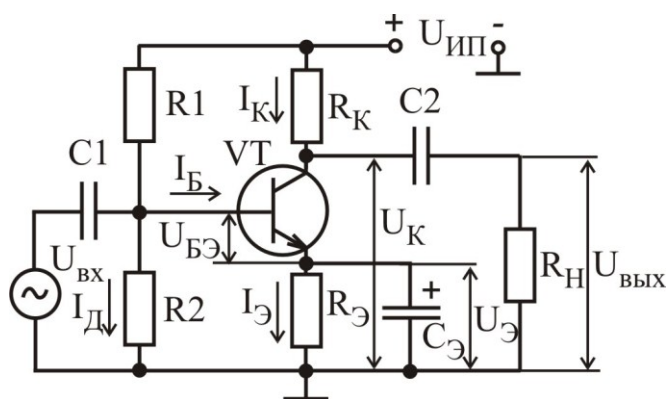


Рис. 6.9 Схема каскада с эмиттерной стабилизацией

Поскольку потенциал базы транзистора $U_B = U_{R2} = I_D \cdot R_2$ зафиксирован делителем напряжения R_1, R_2 , то напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ уменьшается:

$$U_{БЭ} = U_{R2} - I_Э R_Э \approx \frac{U_{ИП} \cdot R_2}{R_1 + R_2} - I_Э R_Э. \quad (6.4)$$

Это приведет к уменьшению тока базы I_B , 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 $I_{Эm}$ создает на резисторе $R_Э$ падение напряжения, которое уменьшает амплитуду переменной составляющей напряжения:

$$U_{БЭm} = U_{ВХm} - R_Э I_{Эm}, \quad (6.5)$$

что приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада.

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 $I_Э = I_K + I_B$. В результате увеличивается падение напряжения на резисторе $R_Э$. Поскольку потенциал базы

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.