

резистора нагрузки R_H . Следовательно,

$$I_{K \text{ нас}} = I_{K \text{ max}} = (E - U_{KЭ \text{ ост}}) / R_H \approx E / R_H$$

и

$$I_{б. \text{ вкл}} \approx I_{K \text{ max}} / \beta.$$

Две указанные рабочие точки характеризуют оба крайние состояния транзисторного ключа.

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

2.1. Изобразить схемы включения транзистора ОБ для транзисторов типов $p-n-p$ и $n-p-n$. Показать полярности питающих напряжений для случаев работы транзистора: а) в активном режиме; б) в режиме отсечки; в) в режиме насыщения; г) при инверсном включении. На обеих схемах показать направления токов эмиттера $I_э$, коллектора $I_к$, базы $I_б$ для всех рассмотренных случаев.

Решение

Схемы включения транзистора с общей базой, полярности питающих напряжений и направления токов для различных случаев работы транзистора показаны на рис. 2.9, а-г.

2.2. Транзистор типа $p-n-p$ включен по схеме ОЭ (рис. 2.2, б). В каком режиме работает транзистор, если: а) напряжение база-эмиттер $U_{БЭ} = -0,4$ В и напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ} = -0,3$ В; б) напряжение $U_{БЭ} = -0,4$ В и напряжение $U_{КЭ} = -10$ В; в) напряжение $U_{БЭ} = 0,4$ В и напряжение $U_{КЭ} = -10$ В?

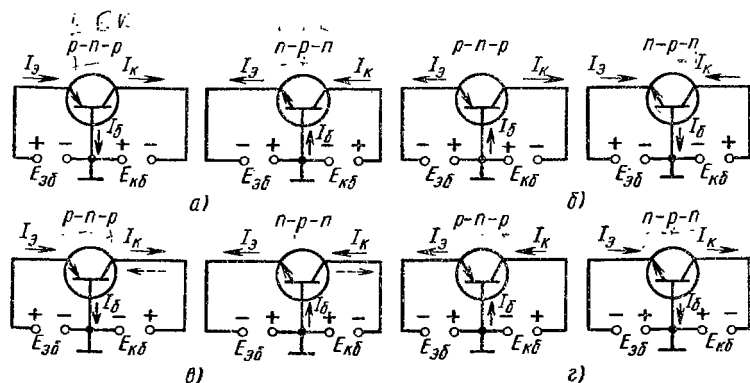


Рис. 2.9

Решение

а) Транзистор работает в режиме насыщения, так как на эмиттерном переходе прямое напряжение ($-0,4$ В) и на коллекторном переходе также прямое напряжение ($0,1$ В).

б) Транзистор работает в активном режиме, поскольку на эмиттерном переходе прямое напряжение ($-0,4$ В), а на коллекторном обратное напряжение ($-9,6$ В).

в) На обоих переходах обратные напряжения (на эмиттерном $-0,4$ В, на коллекторном $-10,4$ В); следовательно, транзистор работает в режиме отсечки.

2.3. Транзистор типа $n-p-n$ включен по схеме ОБ. Напряжение эмиттер–база $U_{ЭБ} = -0,5$ В, напряжение коллектор–база $U_{КБ} = 12$ В. Определить напряжение коллектор–эмиттер.

Решение

Здесь

$$U_{ЭБ} + U_{БК} + U_{КЭ} = 0,$$

откуда

$$U_{КЭ} = 12 + 0,5 = 12,5 \text{ В.}$$

2.4. Транзистор типа $p-n-p$ включен по схеме ОЭ. Напряжение база–эмиттер $U_{БЭ} = -0,8$ В, напряжение коллектор–эмиттер $U_{КЭ} = -10$ В. Определить напряжение коллектор–база.

Решение

Здесь

$$U_{ЭБ} + U_{БК} + U_{КЭ} = 0;$$

следовательно, $U_{КБ} = -10 + 0,8 = -9,2$ В.

2.5. В транзисторе $n-p-n$ избыточная концентрация электронов на эмиттерном переходе равна 10^{20} м^{-3} . Площади переходов $\Pi = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ одинаковы. Построить график примерного распределения концентрации электронов в области базы и определить ток коллектора, если эффективная ширина базы равна $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ и при $T = 300 \text{ К}$ подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение

Предположим, что ширина базы много меньше диффузионной длины электронов (неосновных носителей), концентрация акцепторных примесей в базе значительно ниже концентрации донорных примесей в эмиттере и коллекторе, в базовой области отсутствует рекомбинация носителей (распределение элек-

тронов в базе линейное), а концентрация неосновных носителей на коллекторном переходе равна нулю. Исходя из этих допущений, построим примерное распределение концентрации электронов в базе (рис. 2.10).

Плотность тока неосновных носителей заряда (электронов) в базе

$$j_n = eD_n \frac{dn_{\Sigma}}{dx}$$

Коэффициент диффузии вычислим из соотношения Эйнштейна:

$$D_n/\mu_n = kT/e,$$

откуда

$$D_n = kT\mu_n/e = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0,39 / (1,602 \cdot 10^{-19}) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определим градиент концентрации электронов в базе:

$$\frac{dn_{\Sigma}}{dx} = -\frac{10^{20}}{4 \cdot 10^{-5}} = -0,25 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-4}.$$

Принимая за положительное направление ток коллектора в активном режиме, имеем

$$\begin{aligned} I_K &= -j_n \Pi = -eD_n \frac{dn_{\Sigma}}{dx} \Pi = \\ &= 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25 \cdot 10^{25} \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 4 \text{ мА}. \end{aligned}$$

2.6. В *p-n-p*-транзисторе площади эмиттерного и коллекторного переходов одинаковы и равны $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, коэффициент диффузии дырок в базе $D_p = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. При $U_{КБ} = -1 \text{ В}$ распределение концентрации дырок в базе имеет вид, показанный на рис. 2.11.

Требуется: а) пренебрегая токами утечки, определить ток эмиттера, обусловленный дырками; б) вычислить дифференциальное сопротивление между коллектором и базой при $U_{КБ} = -16 \text{ В}$, если толщина обедненного носителями заряда слоя коллекторного перехода $w_k = (1 + \sqrt{|U_{КБ}|}) 10^{-6} \text{ м}$. Предположить, что условия на переходе эмиттер-база не изменяются и соответствуют условиям, показанным на рис. 2.11.

Решение

Плотность дырочного тока в базе

$$j_p = -eD_p \frac{dp_{\Sigma}}{dx};$$

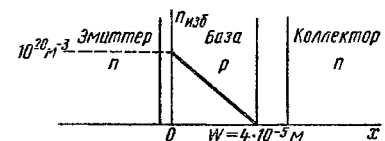


Рис. 2.10

дырочный ток эмиттера

$$I_p = -eD_p \frac{dp_{\Sigma}}{dx} \Pi.$$

Градиент концентрации дырок

$$\frac{dp_{\Sigma}}{dx} = -\frac{p_{\Sigma}}{w} = -\frac{2 \cdot 10^{20}}{2 \cdot 10^{-5}} = -1 \cdot 10^{25} \text{ дырок/м}^4.$$

Следовательно,

$$I_p = j_p \Pi = -eD_p \frac{dp_{\Sigma}}{dx} \Pi = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 47 \cdot 10^{-4} (10 \cdot 10^{25}) \cdot 10^{-6} = 7,5 \text{ мА}.$$

Ток коллектора

$$I_K = eD_p \Pi p_{\Sigma} / (w_{\text{полн}} - w_K) = eD_p \Pi p_{\Sigma} / w_{\Sigma},$$

где w — эффективная ширина базы.

Следовательно, $w_{\text{полн}} = w + w_K = 2 \cdot 10^{-5} + (1 + \sqrt{|U_{\text{КБ}}|}) \cdot 10^{-6}$; при $U_{\text{КБ}} = -1 \text{ В}$ $w_{\text{полн}} = 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, тогда

$$I_K = \frac{eD_p \Pi p_{\Sigma}}{[w_{\text{полн}} - (1 + \sqrt{|U_{\text{КБ}}|})] \cdot 10^{-6}}.$$

Продифференцируем это выражение по $U_{\text{КБ}}$:

$$\left| \frac{dI_K}{dU_{\text{КБ}}} \right| = \frac{eD_p \Pi p_{\Sigma} (|U_{\text{КБ}}|^{-1/2}/2) \cdot 10^{-6}}{[w_{\text{полн}} - (1 + \sqrt{|U_{\text{КБ}}|})] \cdot 10^{-6}]^2}.$$

При $U_{\text{КБ}} = -16 \text{ В}$

$$\left| \frac{dI_K}{dU_{\text{КБ}}} \right| = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{20} (16^{-1/2}/2) \cdot 10^{-6}}{[2,2 \cdot 10^{-5} - (1 + \sqrt{16}) \cdot 10^{-6}]^2} = \frac{1,88 \cdot 10^{-14}}{2,89 \cdot 10^{-10}} \text{ см}.$$

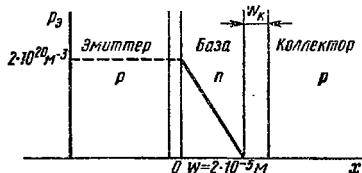


Рис. 2.11

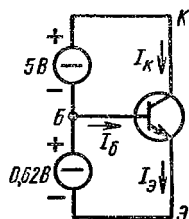


Рис. 2.12

Дифференциальное сопротивление

$$r_k = \frac{dU_{кб}}{dI_{кб}} = \frac{2,89 \cdot 10^{-10}}{1,88 \cdot 10^{-14}} \cong 15,4 \text{ кОм.}$$

2.7. Транзистор, имеющий параметры $\alpha = 0,995$, $\alpha_I = 0,1$, $I_{ЭБк} = 10^{-14}$ А, $I_{КБк} = 10^{-13}$ А, включен в схему, изображенную на рис. 2.12.

Определить напряжение коллектор–эмиттер $U_{КЭ}$, а также токи $I_{Э}$, $I_{К}$, $I_{Б}$.

Решение

Напряжение коллектор–эмиттер найдем из выражения

$$U_{ЭБ} + U_{Бк} + U_{КЭ} = 0,$$

откуда

$$U_{КЭ} = 5 + 0,62 = 5,62 \text{ В.}$$

Определим ток коллектора:

$$I_{К} = \alpha I_{ЭБк} (e^{U_{ЭБ}/(kT)} - 1) - I_{КБк} (e^{U_{Бк}/(kT)} - 1).$$

Заметим, что в последнем слагаемом членом с экспоненциальным множителем можно пренебречь из-за большого отрицательного напряжения $U_{Бк}$. Подставляя значения величин из условия задачи, получаем

$$\begin{aligned} I_{К} &= 0,995 \cdot 10^{-14} (e^{0,62/0,025} - 1) - 10^{-13} (e^{-5/0,026} - 1) = \\ &= 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ А.} \end{aligned}$$

Определяем ток эмиттера по формуле

$$\begin{aligned} I_{Э} &= I_{ЭБк} (e^{U_{ЭБ}/(kT)} - 1) - \alpha_I I_{КБк} (e^{U_{Бк}/(kT)} - 1) = \\ &= 10^{-14} (2,3 \cdot 10^{10}) - 10^{-14} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ А.} \end{aligned}$$

Ток базы

$$I_{Б} = -I_{К} + I_{Э} = 0.$$

В действительности ток базы не равен нулю. Неточный результат получен из-за приближенного вычисления тока коллектора:

$$I_{К} = 0,995 \cdot 2,3 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{10} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Следовательно, в действительности

$$I_{Б} = -0,995 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} + 2,3 \cdot 10^{-4} = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

2.8. На рис. 2.13, а, б изображены входные и выходные характеристики транзистора в схеме ОЭ. Требуется построить ха-

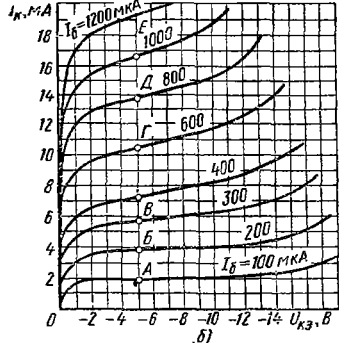
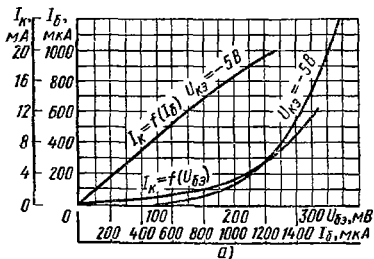


Рис. 2.13

рактеристику передачи тока $I_K = f(I_B)$ при $U_{KЭ} = -5 \text{ В} = \text{const}$ и характеристику передачи $I_K = f(U_{БЭ})$ при $U_{KЭ} = -5 \text{ В} = \text{const}$.

Решение

Первая кривая — зависимость $I_K = f(I_B)$ при $U_{KЭ} = -5 \text{ В} = \text{const}$ — строится по точкам А, Б, В, Г, Д, Е, которые являются точками пересечения вертикали для $U_{KЭ} = -5 \text{ В}$ с выходными характеристиками для разных токов базы I_B . Эту кривую можно построить на графике входной характеристики, если по оси ординат отложить значения I_K , а по оси абсцисс — значения I_B (рис. 2.13, а).

Вторая кривая строится на основе входной и выходной характеристик. Например, при напряжении коллектор — эмиттер $U_{KЭ} = -5 \text{ В}$ ток базы $I_B = 200 \text{ мкА}$ соответствует на входной характеристике напряжению $U_{БЭ} = 225 \text{ мВ}$, а на выходной — току $I_K = 3,9 \text{ мА}$. Поэтому в системе координат $I_K - U_{БЭ}$ наносим точку с этими координатами (3,9 мА; 225 мВ). Аналогично находим другие точки, по которым строим кривую.

Для удобства можно составить таблицу (для $U_{KЭ} = -5 \text{ В}$):

I_B , мкА	100	200	300	400	600
$U_{БЭ}$, мВ	180	225	245	265	288
I_K , мА	2,0	3,9	5,7	7,4	10,5
Точки	А	Б	В	Г	Д

Из построенных характеристик передачи (рис. 2.13, а) отчетливо видно, что кривая $I_K = f(I_B)$ близка к линейной, а кривая $I_K = f(U_{БЭ})$ в нижней части резко нелинейна.

2.9. Пользуясь семействами входных и выходных характеристик транзистора для схемы ОЭ (рис. 2.13, а, б), построить входные и выходные характеристики для схемы ОК.

2.10. Пользуясь семействами входных и выходных характеристик для схемы ОЭ (рис. 2.13, а, б), построить входные и выходные характеристики для схем ОБ.

2.11. Транзистор *p-n-p* включен в схему с общей базой. Показать, что дифференциальное сопротивление эмиттера можно приближенно вычислить по формуле $r_3 \approx kT/(eI_3)$, где I_3 — ток эмиттера. Вычислите r_3 при $T = 300$ К, если $I_3 = 2$ мА.

Решение

Так как на эмиттерный переход подано прямое напряжение, то ток эмиттера может быть определен следующим образом:

$$I_3 = I_{ЭБ0}(e^{eU_{ЭБ}/(kT)} - 1),$$

где $I_{ЭБ0}$ — обратный ток.

Тогда

$$r_3 = \left. \frac{dU_{ЭБ}}{dI_3} \right|_{U_{КБ} = \text{const}} = \frac{kT}{e(I_3 + I_{ЭБ0})},$$

но

$$I_3 \gg I_{ЭБ0} \text{ и } r_3 \approx kT/(eI_3) \approx \varphi_T/I_3.$$

При $I_3 = 2$ мА и $T = 300$ К

$$r_3 = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-3}) = 13 \text{ Ом.}$$

2.12. Пользуясь схемой замещения транзистора, включенного по схеме ОБ (рис. 2.14, а), установить зависимость между собственными параметрами и параметрами системы h .

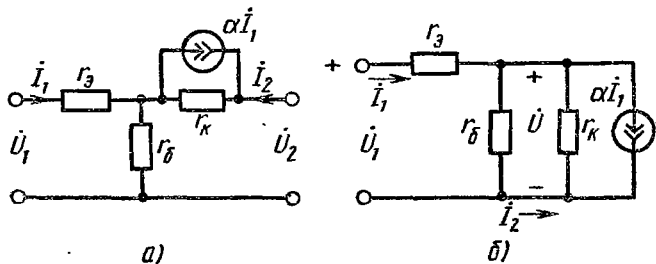


Рис. 2.14

Параметры

$$h_{116} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{и} \quad h_{216} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$$

определяются в режиме короткого замыкания на выходе для переменного тока. Поэтому для нахождения этих параметров преобразуем схему на рис. 2.14, а в схему, изображенную на рис. 2.14, б. Применяя к этой схеме уравнения Кирхгофа, найдем напряжение на входе:

$$\dot{U}_1 = r_3 \dot{I}_1 + \frac{(1-\alpha) I_1 r_6 r_k}{r_6 + r_k}.$$

Следовательно, входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе для переменного тока

$$h_{116} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = r_3 + \frac{(1-\alpha) r_6 r_k}{r_6 + r_k}.$$

Это точное выражение можно упростить. Учитывая, что $r_k \gg r_6$, можно записать: $h_{116} \approx r_3 + r_6(1-\alpha)$.

Из схемы на рис. 2.14, б видно, что

$$\dot{I}_2 + \alpha \dot{I}_1 = \dot{U}/r_k, \quad \text{но} \quad \dot{U} = \frac{(1-\alpha) \dot{I}_1 r_k r_6}{r_6 + r_k}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= -\alpha \dot{I}_1 - \frac{(1-\alpha) \dot{I}_1 r_6}{r_6 + r_k} = -\dot{I}_1 \left(\frac{\alpha r_6 + \alpha r_k + r_6 - \alpha r_6}{r_6 + r_k} \right) = \\ &= -\dot{I}_1 \left(\frac{\alpha r_k + r_6}{r_6 + r_k} \right), \end{aligned}$$

откуда

$$h_{216} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} = - \frac{r_6 + \alpha r_k}{r_6 + r_k}.$$

Разделив числитель и знаменатель почленно на r_k , получим

$$h_{216} = -(r_6/r_k + \alpha)/(1 + r_6/r_k).$$

Так как $\alpha \approx 1$, $r_6/r_k \ll 1$, то $h_{216} \approx -\alpha$.

Параметры h_{126} и h_{226} определяются в режиме холостого хода входной цепи для переменного тока (при разомкнутых входных зажимах). При этом зависимый генератор тока выключается. Нетрудно заметить, что в этом случае $h_{126} = r_6/(r_6 + r_k)$ и $h_{226} = 1/(r_6 + r_k)$.

2.13. Установить связь между z -параметрами и y -параметрами транзистора.

Решение

Уравнения для системы z -параметров имеют вид

$$\dot{U}_1 = z_{11}\dot{I}_1 + z_{12}\dot{I}_2,$$

$$\dot{U}_2 = z_{21}\dot{I}_1 + z_{22}\dot{I}_2.$$

Уравнения для системы y -параметров таковы:

$$\dot{I}_1 = y_{11}\dot{U}_1 + y_{12}\dot{U}_2,$$

$$\dot{I}_2 = y_{21}\dot{U}_1 + y_{22}\dot{U}_2.$$

Переход от одной системы параметров к другой удобно осуществлять с помощью определителей. Решая уравнения первой системы относительно \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , получаем

$$\dot{I}_1 = \frac{\begin{vmatrix} \dot{U}_1 & z_{12} \\ \dot{U}_2 & z_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix}} = \frac{z_{22}\dot{U}_1 - z_{21}\dot{U}_2}{z_{11}z_{22} - z_{21}z_{12}} = \frac{z_{22}}{\Delta z}\dot{U}_1 - \frac{z_{12}}{\Delta z}\dot{U}_2;$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\begin{vmatrix} z_{11} & \dot{U}_1 \\ z_{21} & \dot{U}_2 \end{vmatrix}}{\Delta z} = -\frac{z_{21}}{\Delta z}\dot{U}_1 - \frac{z_{11}}{\Delta z}\dot{U}_2,$$

где $\Delta z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$ — детерминант матрицы. Сопоставляя коэффициенты перед \dot{U}_1 и \dot{U}_2 из уравнения второй системы с соответствующими коэффициентами из уравнений первой системы, выведем искомые соотношения:

$$y_{11} = z_{22}/\Delta z; \quad y_{12} = -z_{12}/\Delta z; \quad y_{21} = -z_{21}/\Delta z; \quad y_{22} = z_{11}/\Delta z.$$

2.14. Выразить параметры транзистора $h_{12\beta}$ и $h_{11\beta}$ в схеме ОЭ через h -параметры транзистора в схеме ОБ.

Решение

Схема замещения транзистора с общей базой изображена на рис. 2.15, а. Если данный транзистор включить по способу ОЭ, то схема замещения примет вид, показанный на рис. 2.15, б. По определению,

$$h_{12\beta} = \left. \frac{\dot{U}_{\text{бэ}}}{\dot{U}_{\text{кэ}}} \right|_{\dot{I}_6=0} = - \left. \frac{\dot{U}_{\text{кб}} + \dot{U}_{\text{кэ}}}{\dot{U}_{\text{кэ}}} \right|_{\dot{I}_6=0} = \left(1 - \frac{\dot{U}_{\text{кб}}}{\dot{U}_{\text{кэ}}} \right)_{\dot{I}_6=0},$$

если $\dot{I}_\delta = 0$, то $\dot{I}_K = -\dot{I}$, и ток (рис. 2.15, а) $I = -(1 + h_{216})I_3$. Так как h_{226} является проводимостью, то $\dot{I} = h_{226}\dot{U}_{K\delta} = -(1 + h_{216})\dot{I}_3$.

Используя второй закон Кирхгофа, для выходного контура на рис. 2.15, б можно написать

$$h_{116}\dot{I}_3 + h_{216}\dot{U}_{K\delta} - \dot{U}_{K\delta} + \dot{U}_{K\delta} = 0.$$

Комбинируя два последних выражения, получаем

$$-\frac{h_{116}h_{226}}{1 + h_{216}}\dot{U}_{K\delta} + h_{216}\dot{U}_{K\delta} - \dot{U}_{K\delta} + \dot{U}_{K\delta} = 0$$

или

$$\dot{U}_{K\delta}/\dot{U}_{K\delta} = \frac{1 + h_{216}}{h_{116}h_{226} + (1 - h_{126})(1 + h_{216})}.$$

Следовательно,

$$h_{213} = 1 - \frac{\dot{U}_{K\delta}}{\dot{U}_{K\delta}} = \frac{h_{116}h_{226} - (1 + h_{216})h_{126}}{h_{116}h_{226} + (1 - h_{126})(1 + h_{216})}.$$

Поскольку $h_{126} \ll 1$ и $h_{226}h_{116} \ll 1 + h_{216}$, эта формула упрощается:

$$h_{213} \cong \frac{h_{116}h_{226}}{1 + h_{216}} - h_{126}.$$

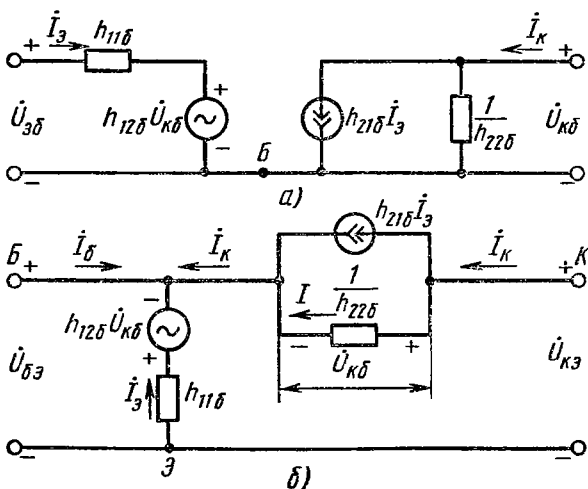


Рис. 2.15

По определению, $h_{113} = \left. \frac{\dot{U}_{63}}{\dot{I}_6} \right|_{\dot{U}_{K3}=0}$, т. е. данный параметр

определяется в режиме короткого замыкания на выходе. Замкнув выходные зажимы в схеме на рис. 2.15, а, получим схему, изображенную на рис. 2.16. Отметим, что в этом случае $\dot{U}_{K6} = -U_{63}$.

Применив второй закон Кирхгофа для входного контура, получим $\dot{U}_{K6} - h_{116}\dot{I}_3 - h_{126}\dot{U}_{K6} = 0$. Комбинируя два последних выражения, получаем

$$\dot{I}_3 = \frac{1 - h_{216}}{h_{116}} \dot{U}_{K6}.$$

Применяя первый закон Кирхгофа для узла Б, получаем

$$\dot{I}_6 + \dot{I}_3 + h_{216}\dot{I}_3 - h_{226}\dot{U}_{63} = 0$$

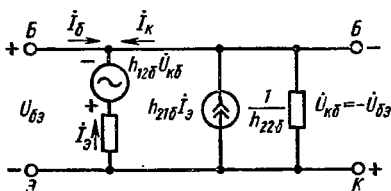


Рис. 2.16

или

$$\dot{I}_6 = (1 + h_{216}) \frac{1 - h_{216}}{h_{116}} \dot{U}_{63} + h_{226} \dot{U}_{63}.$$

Следовательно,

$$h_{113} = \frac{\dot{U}_{63}}{\dot{I}_6} = \frac{h_{116}}{h_{116}h_{226} + (1 - h_{126})(1 + h_{216})}.$$

Это выражение является точным.

Так как $h_{126} \ll 1$ и $h_{226}h_{116} \ll 1 + h_{216}$, то выражение приводится к виду

$$h_{113} \approx h_{116} / (1 + h_{216}).$$

2.15. Определить, являются ли совместимыми типовые значения параметров некоторого транзистора, включенного по схеме ОБ: $h_{116} = 30 \text{ Ом}$; $h_{126} = 4 \cdot 10^{-3}$; $h_{216} = -0,97$; $h_{226} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ См}$. Параметры заданы для рабочей точки: $U_{K6} = -5 \text{ В}$; $I_3 = 1 \text{ мА}$.

Решение

Необходимость предварительной проверки совместимости всех четырех h -параметров вызвана тем, что они характеризуют один и тот же транзистор и поэтому между ними существуют вполне определенные соотношения. В справочниках же даются усредненные значения параметров, которые могут этим

соотношениям не удовлетворяют. Иначе говоря, приняв для расчета приводимые в справочниках типовые значения параметров, можно получить абсурдные результаты.

Проверку совместимости параметров транзистора производят, вычисляя с помощью этих параметров значения сопротивлений Т-образной схемы замещения. В качестве критерия совместимости принимают положение о том, что все три сопротивления Т-образной схемы замещения с одним зависимым генератором должны быть положительны.

Найдем собственные параметры транзистора по формулам

$$\alpha = -h_{216} = 0,97;$$

$$r_6 \approx \frac{h_{126}}{h_{226}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 4000 \text{ Ом};$$

$$r_3 = h_{116} - h_{216} \left(\frac{1 + h_{216}}{h_{226}} \right) = h_{116} - r_6(1 - \alpha) = 30 - 4000(1 - 0,97) = -90 \text{ Ом};$$

$$r_k = \frac{1}{h_{226}} - r_6 \approx \frac{1}{h_{226}} = \frac{1}{10^{-6}} = 1 \text{ МОм}.$$

Поскольку значение параметра r_3 получилось отрицательным, приведенные в условии задачи значения параметров являются несовместимыми. Отрицательное значение сопротивления r_3 обусловлено слишком большим значением r_6 , а последнее — большим значением параметра h_{126} .

При несовместимости параметров в качестве исходных данных при расчете принимают три каких-либо h -параметра из четырех, имеющихся в справочнике, а четвертый определяют с учетом выбранных значений трех остальных, задавшись дополнительно значением одного из сопротивлений схемы замещения транзистора. Например, в рассматриваемом случае принимаем $h_{116} = 30 \text{ Ом}$; $h_{216} = -0,97$; $h_{226} = 1 \text{ мкСм}$ и полагаем, что значение сопротивления эмиттера r_3 в схеме замещения транзистора при $U_{КБ} = -5 \text{ В}$ и $I_3 = 1 \text{ мА}$ составляет 26 Ом .

Полагая $r_3 = 26 \text{ Ом}$ и $\alpha = |h_{216}|$, находим r_6 по формуле

$$r_6 = \frac{h_{116} - r_3}{1 + |h_{216}|} = \frac{30 - 26}{1 - 0,97} = 133 \text{ Ом}.$$

Теперь находим параметр h_{126} :

$$h_{126} = r_6 h_{226} = 133 \cdot 10^{-6} = 0,133 \cdot 10^{-3}.$$

2.16. По выходным характеристикам транзистора в схеме Б (рис. 2.4, а) в рабочей точке с напряжением эмиттер – база $U_{ЭБ} = 0,62$ В и напряжением коллектор – база $U_{КБ} = -5$ В определить параметры h_{116} и h_{126} .

Ответ: $h_{116} = 15$ Ом, $h_{126} = 1,4 \cdot 10^{-3}$.

2.17. По выходным характеристикам транзистора в схеме ОЭ (рис. 2.13, б) в рабочей точке с напряжением коллектор – эмиттер $U_{КЭ} = -8$ В и током базы $I_B = 400$ мкА определить параметры h_{213} и h_{223} .

Ответ: $h_{213} = 17$, $h_{223} = 2 \cdot 10^{-4}$ См.

2.18. По выходным характеристикам транзистора в схеме ОБ (рис. 2.4, б) в рабочей точке с напряжением коллектор – база $U_{КБ} = -6$ В и током эмиттера $I_Э = 3$ мА определить параметры h_{216} , h_{226} .

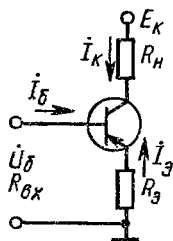
Ответ: $h_{216} = -0,98$, $h_{226} = 40$ мксм.

Аналитический расчет рабочего режима

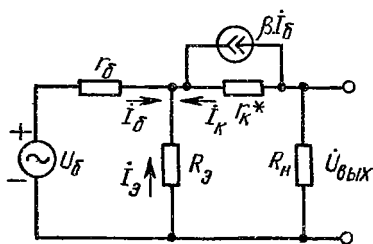
2.19. В цепи, изображенной на рис. 2.17, а, $E_K = -10$ В, $R_H = 2$ кОм, $R_3 = 1$ кОм. Определить входное сопротивление цепи, если коэффициент передачи тока базы транзистора $\beta = 50$.

Решение

Входное сопротивление $R_{вх} = \dot{U}_6 / \dot{I}_6$. Так как ввиду малости можно пренебречь падением напряжения на эмиттерном переходе, то $\dot{U}_6 \approx -\dot{I}_3 R_3$, а $\dot{I}_3 = -\dot{I}_6 (\beta + 1)$. Следовательно, $R_{вх} = -\dot{I}_6 (\beta + 1) R_3 / \dot{I}_6 = 1 (50 + 1) = 51$ кОм. Это примерное значение входного сопротивления получено без учета сопротивления эмиттера r_3 и сопротивления базы r_6 . Если учесть эти сопротивления, то формула для входного сопротивления будет иметь вид $R_{вх} = (r_3 + R_3) (\beta + 1) + r_6$. На практике $r_3 \ll R_3$ и $r_6 \ll R_3 (\beta + 1)$, поэтому приближенно можно считать, что $R_{вх} \cong R_3 (\beta + 1)$.



а)



б)

Здесь не было учтено также влияние сопротивления r_k^* . Схема замещения, учитывающая это влияние, показана на рис. 2.17, б. Предположим, что $r_k^* = \infty$ и генератор тока $\beta \dot{I}_6$ отсутствует. Тогда ток коллектора \dot{I}_k равен нулю и входной ток базы \dot{I}_6 определяется только r_6 и R_3 . В таком случае $R_{вх} = r_6 + R_3$.

Теперь допустим, что сопротивление r_k^* бесконечно, но имеется генератор тока $\beta \dot{I}_6$. Следовательно, источник \dot{U}_6 вызывает ток \dot{I}_6 , а источник $\beta \dot{I}_6$ будет вызывать ток коллектора $\dot{I}_k = \beta \dot{I}_6$. Эти токи вызывают на сопротивлении R_3 падение напряжения $R_3(\dot{I}_6 + \beta \dot{I}_6)$. Из анализа схемы следует, что

$$\dot{I}_6 = \frac{\dot{U}_6 - R_3(\beta + 1)\dot{I}_6}{r_6}.$$

Решив это уравнение относительно \dot{I}_6 , получим

$$\dot{I}_6 = \frac{\dot{U}_6}{r_6 + R_3(\beta + 1)}.$$

Тогда входное сопротивление

$$R_{вх} = \dot{U}_6 / \dot{I}_6 = r_6 + R_3(\beta + 1).$$

Будем считать, что сопротивление r_k^* конечно. При уменьшении r_k^* все большая часть тока $\beta \dot{I}_6$ будет проходить через это сопротивление, вместо того чтобы идти к коллекторным выводам и создавать ток коллектора. Следовательно, падение напряжения на резисторе R_3 будет меньше и входное сопротивление будет уменьшаться. Проанализируем это явление, заменив в схеме на рис. 2.17, б генератор тока генератором напряжения. Используя метод эквивалентного генератора, получим схему, показанную на рис. 2.18. Для контуров можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_6 &= (r_6 + R_3)\dot{I}_6 + R_3\dot{I}_k; \\ 0 &= (R_3 - \beta r_k^*)\dot{I}_6 + (R_3 + r_k^* + R_H)\dot{I}_k. \end{aligned}$$

Решим эти уравнения относительно \dot{I}_6 :

$$\begin{aligned} \dot{I}_6 &= \frac{\begin{vmatrix} \dot{U}_6 & R_3 \\ 0 & R_3 + r_k^* + R_H \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} r_6 + R_3 & R_3 \\ R_3 - \beta r_k^* & R_3 + r_k^* + R_H \end{vmatrix}} = \\ &= \frac{\dot{U}_6(R_3 + r_k^* + R_H)}{(r_6 + R_3)(R_3 + r_k^* + R_H) - R_3(R_3 - \beta r_k^*)}. \end{aligned}$$

Преобразуем знаменатель дроби:

$$r_6(R_3 + r_k^* + R_H) + R_3^2 + R_3 r_k^* + R_3 R_H - R_3^2 + R_3 \beta r_k^*$$

или

$$r_6(R_3 + r_k^* + R_H) + R_3[r_k^*(\beta + 1) + R_H].$$

Если числитель и знаменатель уравнения для \dot{I}_B разделить на $R_3 + r_k^* + R_H$, то можно переписать это уравнение в виде $\dot{I}_B = U_B/R_{вх}$, где $R_{вх}$ — выходное сопротивление. Следовательно, входное сопротивление

$$R_{вх} = r_6 + \frac{R_3[r_k^*(\beta + 1) + R_H]}{R_3 + r_k^* + R_H}.$$

Разделив числитель и знаменатель на r_k^* , получим

$$R_{вх} = r_6 + \frac{R_3[(\beta + 1) + R_H/r_k^*]}{1 + (R_3 + R_H)/r_k^*}.$$

Получено точное выражение для входного сопротивления. Из этого выражения можно выяснить роль сопротивления r_k^* . Если $(R_3 + R_H)/r_k^* \ll 1$, то $R_H/r_k^* \ll 1$ и тогда уравнение принимает вид $R_{вх} = r_6 + R_3(\beta + 1)$.

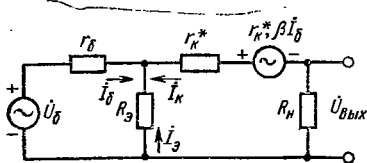


Рис. 2.18

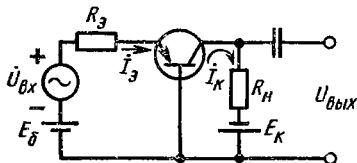


Рис. 2.19

2.20. Дана схема, изображенная на рис. 2.19. Известно, что транзистор работает в активном режиме. Предполагая, что сопротивление резистора R_3 достаточно велико по сравнению с сопротивлением эмиттерного перехода и что сопротивление коллекторного перехода $r_k \gg R_H$, найти коэффициент усиления по напряжению K_U .

Решение

Выходное напряжение

$$\dot{U}_{вх} = -\dot{I}_K R_H.$$

Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, можно написать

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_{вх}/R_3.$$

Пренебрегая обратным током коллектора $I_{КБО}$, найдем ток коллектора:

$$\dot{I}_K = -\alpha \dot{I}_3.$$

Следовательно,

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = \alpha \dot{I}_3 R_H = \alpha \dot{U}_{\text{ВХ}} R_H / R_3.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{U}_{\text{ВХ}} = \alpha R_H / R_3.$$

2.21 В схеме на рис. 2.20 $R_3 = 5$ кОм, $R_H = 10$ кОм, $E_3 = 10$ В, $E_K = 30$ В. Определить напряжение коллектор – база $U_{\text{КБ}}$.

Решение

Значения коэффициента передачи тока эмиттера α и обратного тока коллектора не приведены, чтобы читатель привык

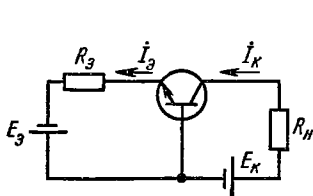


Рис. 2.20

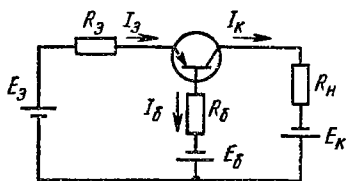


Рис. 2.21

делать самостоятельно допустимые приближения. Если температура, при которой работает транзистор, невелика, то можно считать, что $I_{\text{КБ0}} \approx 0$. Коэффициент передачи тока эмиттера α принимаем равным единице. Тогда, пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, можно записать $I_3 = E_3 / R_3 = 10 / (5 \cdot 10^3) = 2$ мА, а ток коллектора $I_K \approx \alpha I_3 \approx I_3 = 2$ мА. Следовательно,

$$U_{\text{КБ}} = E_K - I_K R_H = 30 - 2 \cdot 10 = 10 \text{ В.}$$

2.22. В схеме на рис. 2.21 $E_3 = 2$ В, $R_3 = 2$ кОм, $R_6 = 15$ кОм, $E_6 = 3$ В, $R_H = 4$ кОм, $E_K = 16$ В. Транзистор имеет параметры: $\alpha = 0,98$; $I_{\text{КБ0}} = 10$ мкА. Определить ток коллектора.

Решение

Используя второй закон Кирхгофа для входной цепи (эмиттер – база) и пренебрегая падением напряжения $U_{\text{БЭ}}$ на эмиттерном переходе, запишем

$$E_3 + E_6 = I_3 R_3 + I_B R_6.$$

Ток базы

$$I_B = I_3 (1 - \alpha) - I_{\text{КБ0}};$$

следовательно,

$$E_3 + E_6 = I_3 R_3 + [I_3 (1 - \alpha) - I_{КБ0}] R_6,$$

откуда

$$I_3 = \frac{E_3 + E_6 + I_{КБ0} R_6}{R_3 + R_6 (1 - \alpha)} = \frac{2 + 3 + 0,01 \cdot 15}{2 + 15(1 - 0,98)} = 2,4 \text{ мА.}$$

Найдем ток коллектора:

$$I_K = \alpha I_3 + I_{КБ0} = 0,98 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-6} \cong 2,36 \text{ мА.}$$

2.23. Дана схема, изображенная на рис. 2.22. Доказать, что ток коллектора в этой схеме может быть вычислен по следующей приближенной формуле:

$$I_K \approx \beta \frac{(E_K + I_{КБ0} R_6)}{(R_6 + \beta R_H)}$$

Решение

Здесь

$$I_K = \beta I_B + I_{КБ0} (\beta + 1); \quad U_{КЭ} \cong I_B R_6; \quad U_{КЭ} = E_K - (I_B + I_K) R_H.$$

Из двух последних выражений получим

$$I_B R_6 = E_K - (I_B + I_K) R_H,$$

откуда

$$I_B = \frac{E_K - I_K R_H}{R_6 + R_H}$$

Подставив это уравнение в выражение для I_K , получим

$$I_K = \beta \frac{E_K - I_K R_H}{R_6 + R_H} + I_{КБ0} (\beta + 1),$$

откуда

$$I_K = \frac{\beta E_K + I_{КБ0} (\beta + 1) (R_6 + R_H)}{R_6 + R_H (\beta + 1)}$$

Учитывая, что $\beta \gg 1$ и $\beta + 1 \approx \beta$, получаем

$$I_K \approx \beta \frac{E_K + I_{КБ0} (R_H + R_6)}{R_6 + \beta R_H}$$

Так как обычно $R_6 \gg R_H$, то

$$I_K \approx \beta \frac{E_K + I_{КБ0} R_6}{R_6 + \beta R_H}$$

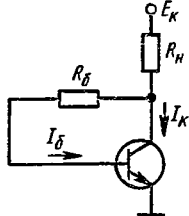


Рис. 2.22

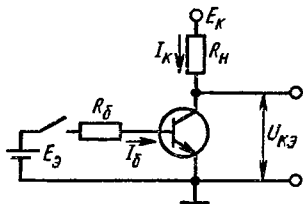


Рис. 2.23

2.24. В схеме, изображенной на рис. 2.23, используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 50$ и обратным током коллекторного перехода $I_{КБ0} = 10$ мкА. Известно, что $R_б = 10$ кОм, $E_э = 1$ В, $R_к = 5$ кОм, $E_к = 20$ В. Определить напряжение коллектор-эмиттер при разомкнутом и замкнутом ключе, считая, что коэффициент β неизменен.

Решение

При разомкнутом ключе ток базы $I_Б = 0$ и в идеальном транзисторе ток коллектора $I_К = \beta I_Б + I_{КБ0}(\beta + 1) = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 51 = 0,51$ мА; $U_{КЭ} = E_к - I_К R_к = 20 - 0,51 \cdot 5 = 17,5$ В.

Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, находим ток базы при замкнутом ключе:

$$I_Б \approx E_э / R_б = 1 / (10 \cdot 10^3) = 100 \text{ мкА.}$$

Если считать, что сохраняется активный режим, то ток коллектора $I_К = \beta I_Б + I_{КБ0}(\beta + 1) = 50 \cdot 10^{-4} + 51 \cdot 10^{-5} = 5,51$ мА и напряжение коллектор-эмиттер

$$U_{КЭ} = E_к - I_К R_к = 20 - 5,51 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = -7,5 \text{ В.}$$

Этот результат означает, что транзистор работает в режиме насыщения, так как на эмиттерном и на коллекторном переходах существуют прямые напряжения. Но в режиме насыщения ток коллектора не может быть больше значения $I_{К\max} \approx E_к / R_к = 4$ мА. При этом напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ} \approx 0$. Таким образом, при замкнутом ключе $U_{КЭ} \approx 0$.

2.25. Транзистор используется в схеме, показанной на рис. 2.24. Данные схемы: $E_к = -28$ В, $R_б = 15$ кОм, $R_э = 1$ кОм, $R_к = 2$ кОм. Определить, при каком минимальном входном напряжении транзистор будет работать в режиме насыщения. Принять, что на границе режима насыщения $\beta = 9$.

Решение

В режиме насыщения напряжения $U_{КЭ} \approx 0$. Входное напряжение

$$U_{вх} = -I_Э R_Э - I_Б R_Б.$$

Напряжение коллекторного источника питания

$$E_К = -I_Э R_Э - I_К R_Н.$$

Ток эмиттера

$$I_Э \approx I_Б (\beta + 1).$$

Ток коллектора

$$I_К \approx \beta I_Б.$$

Следовательно, входное напряжение

$$U_{вх} = -[I_Б (\beta + 1) R_Э + I_Б R_Б] = -I_Б [R_Э (\beta + 1) + R_Б].$$

Если напряжение источника питания

$$E_К = -I_Б (\beta + 1) R_Э + I_Б \beta R_Н = -I_Б [R_Э (\beta + 1) + \beta R_Н],$$

то ток базы

$$I_Б = \frac{-E_К}{R_Э (\beta + 1) + \beta R_Н} = \frac{28}{10^3 (9 + 1) + 9 \cdot 2 \cdot 10^3} = 1 \text{ мА}.$$

Таким образом, окончательно получим $U_{вх} = -1 [1(9 + 1) + 15] = -25 \text{ В}$.

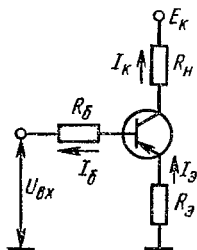


Рис. 2.24

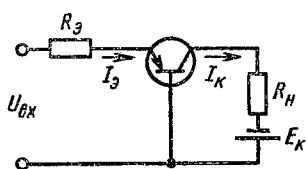


Рис. 2.25

2.26. В схеме на рис. 2.25 используется транзистор с коэффициентом передачи тока эмиттера $\alpha = 0,99$ и обратным током коллектора $I_{КБ0} = 10 \text{ мкА}$. Данные схемы: $R_Э = -3 \text{ кОм}$, $R_Н = 2 \text{ кОм}$, $E_К = 20 \text{ В}$. Определить, при каком минимальном значении входного напряжения транзистор будет работать в режиме насыщения.

Решение

Транзистор будет работать в режиме насыщения, если напряжение коллектор-база $U_{КБ} = 0$. Напряжение

$$U_{КБ} = -E_k + I_K R_H.$$

Приравняв это напряжение нулю, найдем коллекторный ток:

$$I_K = E_k / R_H = 20 / (2 \cdot 10^3) = 10 \text{ мА}.$$

Из уравнения $I_K = \alpha I_{Э} + I_{КБ0}$ найдем, что

$$I_{Э} = (I_K - I_{КБ0}) / \alpha = (10 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-6}) / 0,99 = 10 \text{ мА}.$$

Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, найдем искомое напряжение:

$$U_{вх} \approx I_{Э} R_3 = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 = 30 \text{ В}.$$

(2.27.) В схеме на рис. 2.26 ($R_6 = 50 \text{ кОм}$, $R_H = 10 \text{ кОм}$, $E_k = 24 \text{ В}$) используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 19$. Определить напряжение коллектор-эмиттер.

Решение

Пренебрегая током $I_{КБ0}$, имеем

$$U_{КЭ} = E_k - I_{Э} R_H = E_k - I_B (\beta + 1) R_H = E_k - U_{КЭ} (\beta + 1) R_H / R_6,$$

откуда

$$U_{КЭ} = \frac{E_k}{1 + (R_H / R_6) (\beta + 1)} = \frac{24}{1 + \left(\frac{10 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^3} \right) (19 + 1)} = 4,8 \text{ В}.$$

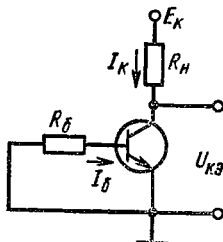


Рис. 2.26

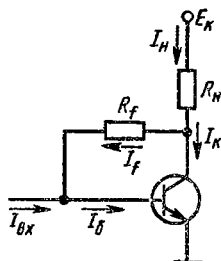


Рис. 2.27

2.28. Транзистор, работающий в активном режиме, используется в схеме на рис. 2.27. Найти коэффициент усиления по току $K_I = \Delta I_H / \Delta I_{вх}$.

Здесь

$$I_6 = I_{вх} + I_f, \quad (1)$$

$$I_H = I_f + I_K, \quad (2)$$

$$E_K = I_f R_f + I_H R_H, \quad (3)$$

$$I_K = \beta I_6. \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим

$$I_H = I_f + \beta I_6. \quad (5)$$

Перепишем соотношения (1), (5) и (3) в виде, удобном для решения с помощью определителей:

$$I_{вх} = I_f - I_6 + 0, \quad (1a)$$

$$0 = I_f + \beta I_6 - I_H, \quad (5a)$$

$$E_K = R_f I_f + 0 + R_H I_H, \quad (3a)$$

откуда

$$I_K = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -1 & -I_H \\ 1 & \beta & 0 \\ R_f & 0 & E_K \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & \beta & -1 \\ 1 & 0 & R_H \end{vmatrix}} = \frac{\beta E_K + \beta I_{вх} R_f + E_K}{\beta R_H + R_f + R_H} =$$

$$= \frac{E_K (\beta + 1) + \beta I_{вх} R_f}{R_f + R_H (\beta + 1)};$$

$$K_I = \frac{dI_H}{dI_{вх}} \cong \frac{\Delta I_H}{\Delta I_{вх}} = \frac{\beta R_f}{R_f + R_H (\beta + 1)} = \frac{\beta}{1 + R_H (\beta + 1)/R_f}.$$

Заметим, что если $R_H (\beta + 1)/R_f \gg 1$ и $\beta \gg 1$, то $K_I = R_f/R_H$, т. е. не зависит от свойств транзистора. Причиной этого является отрицательная обратная связь, осуществляемая резистором R_f .

2.29. Транзистор, используемый в схеме усилителя ОЭ, имеет следующие параметры: $h_{11\beta} = 1,4$ кОм, $h_{21\beta} = 45$, $h_{12\beta} = 4,3 \cdot 10^{-4}$, $h_{22\beta} = 18$ мксм. Сопротивление резистора нагрузки $R_H = 16$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала

$R_r = 300$ Ом. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U и мощности K_P .

Решение

Схема замещения усилителя на транзисторе для малых сигналов изображена на рис. 2.28, а. Примем $\dot{I}_5 = \dot{I}_1$, $\dot{I}_6 = \dot{I}_2$. Из рисунка следует, что для входной и выходной цепей справедливы следующие уравнения:

$$\dot{U}_1 = h_{113}\dot{I}_1 + h_{123}\dot{U}_2; \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 = h_{213}\dot{I}_1 + h_{223}\dot{U}_2; \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{I}_2 R_H. \quad (3)$$

Умножив левую и правую части уравнения (1) на h_{213} , а левую и правую части уравнения (2) на h_{113} , получим.

$$h_{213}\dot{U}_1 = h_{213}h_{113}\dot{I}_1 + h_{123}h_{213}\dot{U}_2; \quad (4)$$

$$h_{113}\dot{I}_2 = h_{113}h_{213}\dot{I}_1 + h_{113}h_{223}\dot{U}_2. \quad (5)$$

Вычитая (4) из (5), получаем

$$h_{113}\dot{I}_2 - h_{213}\dot{U}_1 = (h_{113}h_{223} - h_{123}h_{213})\dot{U}_2, \quad (6)$$

где $h_{113}h_{223} - h_{123}h_{213} = \Delta h$ — детерминант матрицы.

Из (3) следует, что

$$\dot{I}_2 = -\dot{U}_2/R_H. \quad (7)$$

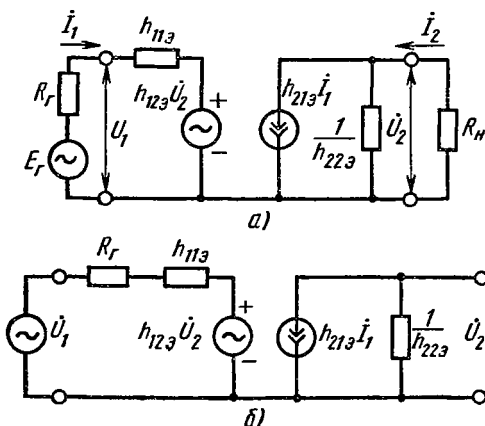


Рис. 2.28

Подставив (7) в (6), получим

$$-h_{213}\dot{U}_1 = \dot{U}_2(\Delta h + h_{113}/R_H) = (\dot{U}_2/R_H)(\Delta h R_H + h_{113}).$$

Следовательно,

$$K_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = -\frac{h_{213}R_H}{h_{113} + \Delta h R_H} =$$

$$= -\frac{45 \cdot 16 \cdot 10^3}{1,4 \cdot 10^3 + (1,4 \cdot 10^3 \cdot 18 \cdot 10^{-6} - 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 45) \cdot 16 \cdot 10^3} = -485.$$

Для определения коэффициента усиления по току K_I подставим (3) в (2); тогда

$$\dot{I}_2 = h_{213}\dot{I}_1 - h_{223}R_H\dot{I}_2, \quad (8)$$

или

$$\dot{I}_2(1 + h_{223}R_H) = h_{213}\dot{I}_1, \quad (9)$$

откуда

$$K_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{h_{213}}{1 + h_{223}R_H} = \frac{45}{1 + 18 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^3} = 34,9. \quad (10)$$

Выходное сопротивление определим из схемы на рис. 2.28, б. В этой схеме R_r — внутреннее сопротивление источника сигнала. Из анализа схемы следует, что

$$\dot{U}_1 = (R_r + h_{113})\dot{I}_1 + h_{123}\dot{U}_2; \quad (11)$$

$$\dot{I}_2 = h_{213}\dot{I}_1 + h_{223}\dot{U}_2. \quad (12)$$

Умножив (11) на h_{213} и (12) на $(R_r + h_{113})$, получим

$$h_{213}\dot{U}_1 = h_{213}(R_r + h_{113})\dot{I}_1 + h_{213}h_{123}\dot{U}_2; \quad (13)$$

$$(R_r + h_{113})\dot{I}_2 = h_{213}(R_r + h_{113})\dot{I}_1 + h_{223}(R_r + h_{113})\dot{U}_2. \quad (14)$$

Вычитая (13) из (14), получаем

$$\dot{I}_2(R_r + h_{113}) - h_{213}\dot{U}_1 = [h_{223}(R_r + h_{113}) - h_{123}h_{213}]\dot{U}_2,$$

откуда

$$R_{\text{вых}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{R_r + h_{113}}{h_{223}(R_r + h_{113}) - h_{123}h_{213}} =$$

$$= \frac{R_r + h_{113}}{h_{223}R_r + \Delta h} = \frac{1,4 \cdot 10^3 + 300}{18 \cdot 10^{-6} \cdot 300 + 58 \cdot 10^{-4}} = 15,2 \text{ кОм.}$$

При учете сопротивления резистора нагрузки эффективное выходное сопротивление

$$R'_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}R_H}{R_{\text{вых}} + R_H} = \frac{15,2 \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 10^3}{15,2 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3} = 7,8 \text{ кОм.}$$

Определим сопротивление $R_{\text{вх}}$. Подставив (3) в (1), получим

$$\dot{U}_1 = h_{113} \dot{I}_1 - h_{123} R_{\text{н}} \dot{I}_2. \quad (15)$$

Из (9) найдем

$$\dot{I}_2 = h_{213} \dot{I}_1 / (1 + h_{223} R_{\text{н}}). \quad (16)$$

Подставив это уравнение в (15), получим

$$\dot{U}_1 = h_{113} - \frac{h_{213} h_{123} R_{\text{н}}}{1 + h_{223} R_{\text{н}}} \dot{I}_1.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} R_{\text{вх}} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = h_{113} - \frac{h_{213} h_{123} R_{\text{н}}}{1 + h_{223} R_{\text{н}}} = \\ &= 1,4 \cdot 10^3 - \frac{45 \cdot 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 16 \cdot 10^3}{1 + 18 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^3} = 1160 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Коэффициент усиления мощности

$$K_P = |K_I K_U| = 482 \cdot 34,9 \cong 16822.$$

2.30. В усилительном каскаде по схеме ОЭ используется транзистор, имеющий следующие значения h -параметров: $h_{113} = 800 \text{ Ом}$, $h_{213} = 47$, $h_{123} = 5 \cdot 10^{-4}$, $h_{223} = 80 \text{ мкСм}$. Найти выходное напряжение и выходное сопротивление этого каскада, если ЭДС источника входного напряжения $E_{\text{вх}} = 10 \text{ мВ}$, внутреннее сопротивление источника входного напряжения $R_{\text{г}} = 500 \text{ Ом}$ и сопротивление резистора нагрузки в коллекторной цепи $R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$.

Ответ: $U_{\text{вых}} = 1,38 \text{ В}$; $R_{\text{вых}} = 16,2 \parallel R_{\text{н}} = 3,8 \text{ кОм}$.

2.31. В усилительном каскаде по схеме ОЭ используется транзистор, имеющий следующие значения h -параметров: $h_{113} = 800 \text{ Ом}$, $h_{123} = 5 \cdot 10^{-4}$, $h_{213} = 48$, $h_{223} = 80 \text{ мкСм}$. Найти выходную мощность, если ЭДС источника сигнала $E_{\text{вх}} = 100 \text{ мВ}$, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_{\text{г}} = 500 \text{ Ом}$, сопротивление резистора нагрузки в коллекторной цепи $R_{\text{н}} = 8 \text{ кОм}$.

Ответ: $2,1 \text{ мВт}$.

2.32. Транзистор, включенный по схеме ОБ, имеет следующие значения h -параметров: $h_{116} = 18 \text{ Ом}$, $h_{126} = 8 \cdot 10^{-4}$, $h_{216} = -0,98$, $h_{226} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ См}$. Определить коэффициент усиления каскада по мощности, если сопротивление резистора нагрузки в коллекторной цепи $R_{\text{н}} = 15 \text{ кОм}$.

Ответ: 216.

2.33. Транзистор имеет следующие значения h -параметров: $h_{116} = 20$ Ом, $h_{126} = 1,65 \cdot 10^{-4}$, $h_{216} = -0,99$, $h_{226} = 0,85$ мкСм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U и по мощности K_P этого транзистора, включенного в схему ОК, если внутреннее сопротивление источника сигнала $R_r = 30$ кОм, сопротивление резистора нагрузки $R_n = 1$ кОм.

Ответ: $R_{вх} = 102$ кОм; $R_{вых} = 0,32$ кОм; $K_I = -100$; $K_U = 0,98$; $K_P = 98$.

2.34. Транзистор, включенный в схему ОК, имеет следующие значения h -параметров: $h_{11к} = 22$ кОм, $h_{12к} = 1$, $h_{21к} = -31$, $h_{22к} = 23 \cdot 10^{-6}$ См. Сопротивление резистора нагрузки в цепи эмиттера $R_n = 1$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_r = 10$ кОм. Определить коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U и по мощности K_P , входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$.

Ответ: $K_I = -31$; $K_U = 0,6$; $K_P = 18,6$; $R_{вх} = 53$ кОм; $R_{вых} = 1$ кОм.

2.35. Транзистор в схеме ОЭ имеет следующие значения h -параметров: $h_{11з} = 2$ кОм, $h_{12з} = 5,9 \cdot 10^{-4}$, $h_{21з} = 60$, $h_{22з} = 40$ мкСм. Сопротивление резистора нагрузки $R_n = 30$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_r = 2$ кОм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U и по мощности K_P .

Ответ: $R_{вх} = 1,52$ кОм; $R_{вых} = 32$ кОм; $K_I \approx 60$; $K_U = -537$; $K_P = 32\,220$.

2.36. В схеме ОБ транзистор в рабочей точке имеет следующие значения h -параметров: $h_{116} = 20$ Ом, $h_{126} = 1,8 \cdot 10^{-4}$, $h_{216} = -0,99$, $h_{226} = 1$ мкСм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U и по мощности K_P усилительного каскада с этим транзистором, включенным в схему усилителя ОЭ, если сопротивление резистора нагрузки $R_n = 1$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_r = 1,5$ кОм.

Ответ: $R_{вх} = 1,84$ кОм; $R_{вых} = 1$ кОм; $K_I = 90$; $K_U = -49$; $K_P = 4400$.

2.37. Транзистор, включенный по схеме ОЭ, в рабочей точке имеет следующие значения h -параметров: $h_{11з} = 1,6$ кОм, $h_{12з} = 5 \cdot 10^{-4}$, $h_{21з} = 115$, $h_{22з} = 160$ мкСм. Определить входное сопротивление $R_{вх}$, выходное сопротивление $R_{вых}$, коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U и по мощности K_P усилительного каскада с этим транзистором, включенным в схему ОБ, если внутреннее сопротивление источника

сигнала $R_{\Gamma} = 500$ Ом и сопротивление резистора нагрузки $R_{\text{н}} = 10$ кОм.

Ответ: $R_{\text{вх}} = 30,4$ Ом; $R_{\text{вых}} = 9,9$ кОм; $K_I = -0,982$; $K_U = 323$; $K_P = 318$.

2.38. Транзистор, включенный в усилитель по схеме ОЭ, имеет следующие значения собственных параметров: $\alpha = 0,99$, $r_6 = 100$ Ом, $r_k = 2 \cdot 10^6$ Ом, $r_3 = 40$ Ом. Определить входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ и коэффициент усиления каскада по напряжению на низких частотах K_U , если сопротивление резистора нагрузки $R_{\text{н}} = 5$ кОм.

Ответ: $R_{\text{вх}} = 4,1$ кОм; $K_U = -121$.

2.39. Транзистор, включенный в схему усилителя ОБ, имеет следующие значения собственных параметров: $r_6 = 500$ Ом, $r_3 = 45$ Ом, $r_k = 1$ МОм и $\alpha = 0,97$. Сопротивление резистора нагрузки $R_{\text{н}} = 2$ кОм, внутреннее сопротивление источника сигнала $R_{\Gamma} = 500$ Ом. Найти коэффициенты усиления по току K_I , по напряжению K_U , по мощности K_P , а также входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления усилительного каскада.

Ответ: $K_I = -0,97$; $K_U = 32,3$; $K_P = 31,5$; $R_{\text{вх}} = 60$ Ом; $R_{\text{вых}} = 533$ кОм.

2.40. Определить те же величины, что и в предыдущей задаче, при условии, что транзистор включен в схему усилителя ОК.

Ответ: $K_I = -33,4$; $K_U = 1$; $K_P = 33,4$; $R_{\text{вх}} = 66,7$ кОм; $R_{\text{вых}} = 75$ Ом.

2.41. Определить те же величины, что и в задаче 2.39, при условии, что транзистор включен в схему усилителя ОЭ.

Ответ: $K_I = 32,3$; $K_U = -32,3$; $K_P = 1040$; $R_{\text{вх}} = 2$ кОм; $R_{\text{вых}} = 34,1$ кОм.

2.42. Доказать, что коэффициент усиления транзисторного каскада по мощности может быть выражен следующими формулами:

$$K_P = K_I^2 R_{\text{н}} / R_{\text{вх}} \quad \text{или} \quad K_P = K_U^2 R_{\text{вх}} / R_{\text{н}}$$

2.43. Используя Т-образную схему замещения транзистора, доказать, что в усилителе, собранном по схеме ОБ, коэффициент усиления по току

$$K_I = -(\alpha r_k + r_6) / (r_k + r_6 + R_{\text{н}});$$

входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = r_3 + r_6 (1 - K_I);$$

выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = r_6 + r_k - \left[\frac{r_6 (r_6 + \alpha r_k)}{R_{\Gamma} + r_3 + r_6} \right].$$

2.44. Транзистор включен в усилительный каскад по схеме ОЭ. Каскад питается от одного источника с напряжением $E = 10$ В. Для подачи смещения в цепь базы используется резистор R_6 (рис. 2.29). Характеристики транзистора изображены на рис. 2.30, *a, б*. Известно, что постоянная составляющая тока базы $I_{B0} = 0,3$ мА, амплитуда переменной составляющей тока базы $I_{mb} = 0,2$ мА, сопротивление резистора нагрузки $R_n = 500$ Ом, а максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором, $P_{Kmax} = 150$ мВт. Требуется: а) построить линию P_{Kmax} ; б) по выходным характеристикам найти постоянную составляющую тока коллектора I_{K0} , постоянную составляющую напряжения коллектор — эмиттер $U_{KЭ0}$, амплитуду переменной составляющей тока коллектора I_{mk} , амплитуду выходного напряжения $U_{mR} = U_{mkЭ}$, коэффициент усиления по току K_I , выходную мощность $P_{вых}$, мощность, рассеиваемую на нагрузке постоянной составляющей тока коллектора, P_{R0} , полную потребляемую мощность в коллекторной цепи P_0 , КПД коллекторной цепи η . Проверить, не превышает ли мощность P_{K0} , выделяемая на коллекторе в режиме покоя, максимально допустимую мощность P_{Kmax} ; в) с помощью входных характеристик определить напряжение смещения $U_{BЭ0}$, амплитуду входного сигнала $U_{mbЭ}$, входную мощность $P_{вх}$, коэффициент усиления по напряжению K_U и по мощности K_P , входное сопротивление каскада $R_{вх}$, сопротивление резистора R_6 и емкость разделительного конденсатора C_p . Диапазон частот усиливаемых колебаний 80 Гц — 5 кГц.

Решение

Так как во входной цепи транзистора при любой схеме включения протекает ток, то для расчета рабочего режима транзистора недостаточно одного семейства выходных характеристик, а требуется еще семейство, определяющее режим работы входной цепи. Следует заметить, что в справочниках обычно дана одна входная характеристика, так как входные характеристики, снятые при различных выходных напряжениях, расположены близко друг к другу.

Порядок решения задачи следующий. На семействе выходных характеристик строим линию максимально допустимой мощности, используя уравнение

$$I_{Kmax} = P_{Kmax} / |U_{KЭ}| = 150 \cdot 10^{-3} / |U_{KЭ}|.$$

Подставляя в него значения $U_{KЭ}$, равные, например, $-7,5$; -10 , -15 и -20 В, получаем значения I_{K} , равные 20, 15; 10

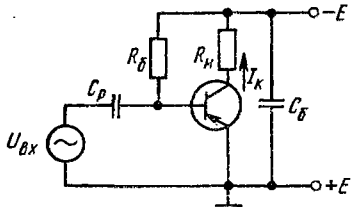
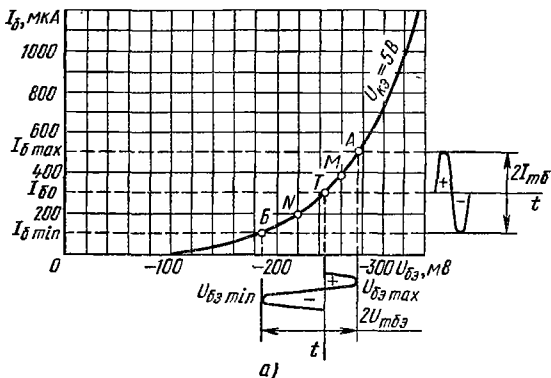
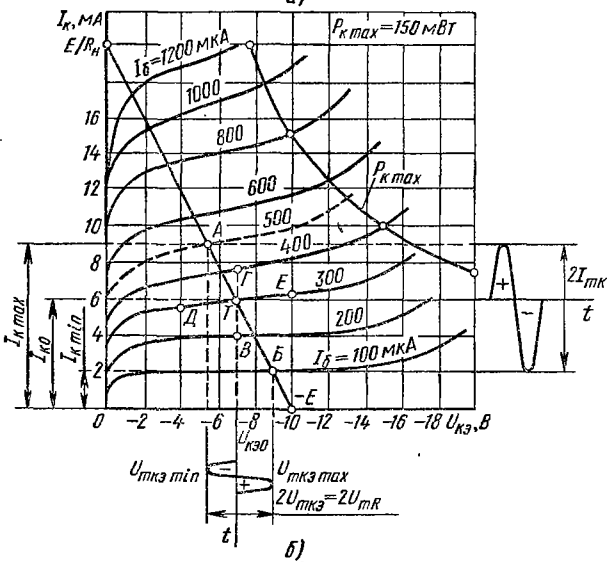


Рис. 2.29



а)



б)

Рис. 2.30

и 7,5 мА соответственно. Построенная по этим точкам линия $P_{K \max}$ показана на рис. 2.30, б.

Затем, используя уравнение линии нагрузки $I_K = (E - U_{KЭ})/R_H$, на семейство выходных характеристик наносим линию нагрузки: при $I_K = 0$ $U_{KЭ} = E = -10$ В — первая точка линии нагрузки; при $U_{KЭ} = 0$ $I_K = E/R_H = 10/500 = 20$ мА. — вторая точка линии нагрузки.

Точка пересечения линии нагрузки с характеристикой, соответствующей постоянной составляющей тока базы $I_{Б0} = 300$ мкА, определит рабочую точку. Ей будут соответствовать постоянная составляющая тока коллектора $I_{K0} = 6$ мА и постоянная составляющая напряжения $U_{KЭ0} = -7$ В.

Амплитуду переменной составляющей тока коллектора определим как среднее значение:

$$I_{mk} = \frac{I_{K \max} - I_{K \min}}{2} = \frac{9 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,5 \text{ мА.}$$

Дальнейший порядок расчета таков.

Амплитуда переменного напряжения на нагрузке

$$U_{mR} = U_{mkЭ} = I_{mk} R_H = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 1,75 \text{ В.}$$

Коэффициент усиления по току

$$K_I = I_{mk} / I_{mb} = 3,5 \cdot 10^{-3} / (0,2 \cdot 10^{-3}) = 17,5.$$

Выходная мощность

$$P_{\text{вых}} = 0,5 I_{mk} U_{mR} = 0,5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,75 = 3 \text{ мВт.}$$

Полная потребляемая мощность в коллекторной цепи

$$P_0 = E I_{K0} = 10 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ мВт.}$$

КПД коллекторной цепи

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_0 = 3 \cdot 10^{-3} / (60 \cdot 10^{-3}) = 0,05 = 5\%.$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе постоянной составляющей коллекторного тока,

$$P_{K0} = I_{K0} U_{KЭ0} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 7 = 42 \text{ мВт} < P_{K \max} = 150 \text{ мВт,}$$

т. е. режим работы допустим.

Далее расчет ведем по семейству входных характеристик (рис. 2.30, а). Поскольку у транзисторов входные характеристики расположены близко друг от друга, то в качестве рабочей входной характеристики можно принять одну из статических входных характеристик, соответствующую активному режиму, например характеристику, снятую при $U_{KЭ} = -5$ В. Это можно

сделать в том случае, если усиливаемое колебание работает как генератор тока, т. е. когда внутреннее сопротивление источника колебаний значительно больше входного сопротивления транзистора. Из графика находим, что $|U_{БЭ0}| = 0,25$ В.

Амплитуда входного напряжения

$$U_{mбэ} = \frac{U_{БЭ\max} - U_{БЭ\min}}{2} = \frac{277 \cdot 10^{-3} - 187 \cdot 10^{-3}}{2} = 45 \text{ мВ.}$$

Модуль коэффициента усиления по напряжению

$$|K_U| = U_{mкэ} / U_{mбэ} = 1,75 / (45 \cdot 10^{-3}) = 39.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = |K_I K_U| = 39 \cdot 17,5 \cong 690.$$

Входная мощность

$$P_{вх} = 0,5 I_{mбэ} U_{mбэ} = 0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 4,5 \text{ мкВт.}$$

Входное сопротивление

$$R_{вх} = U_{mбэ} / I_{mбэ} = 45 \cdot 10^{-3} / (0,2 \cdot 10^{-3}) = 225 \text{ Ом.}$$

Сопротивление резистора

$$R_6 = \frac{E - |U_{БЭ0}|}{I_{Б0}} = \frac{10 - 0,25}{0,3 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ кОм.}$$

Емкость конденсатора C_p определяется из условия

$$\frac{1}{\omega_n C_p} = \frac{R_{вх}}{10},$$

где ω_n — низшая рабочая частота.

Тогда

$$C_p = \frac{10}{\omega_n R_{вх}} = \frac{10}{2\pi f_n R_{вх}} = \frac{10}{6,28 \cdot 80 \cdot 225} = 90 \text{ мкФ.}$$

2.45. Для рабочей точки усилителя, рассмотренного в задаче 2.44, найти параметры $h_{21э}$, $h_{22э}$, $R_{вх} = 1/h_{22э}$, $h_{11э}$ и $y_{21э} = S$ и аналитически рассчитать величины K_I , K_U , K_P , $R_{вх}$.

Решение

Рассчитаем параметры в рабочей точке при $U_{кэ} = -7$ В и $I_{к0} = 6$ мА:

$$h_{21э} = \beta = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ} = \text{const}}$$

По точкам B и F (рис. 2.30, б) определим

$$h_{21э} = \frac{3,7 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 18,5.$$

По точкам D и E определим

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappaэ}} \Big|_{I_{\text{б}} = \text{const}};$$

$$h_{22э} = 0,7 \cdot 10^{-3} / 6 = 117 \text{ мкСм};$$

$$R_{\text{вых}} = 1/h_{22э} = 1/(0,117 \cdot 10^{-3}) = 8,5 \text{ кОм},$$

параметр

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \Big|_{U_{\kappaэ} = \text{const}}.$$

По точкам M и N (рис. 2.30, а) определим

$$h_{11э} = 40 \cdot 10^{-3} / (0,19 \cdot 10^{-3}) = 210 \text{ Ом}.$$

Крутизна характеристики транзистора

$$S = y_{21э} = h_{21э} / h_{11э} = 18,6 / 210 = 88 \text{ мА/В}.$$

С помощью найденных параметров определим искомые значения по приближенным формулам. Коэффициент усиления по току $K_I \approx h_{21э} = 18,5$; точнее,

$$\begin{aligned} K_I &= h_{21э} R_{\text{вых}} / (R_{\text{н}} + R_{\text{вых}}) = \\ &= 18,5 \cdot 8,5 \cdot 10^3 / (0,5 \cdot 10^3 + 8,5 \cdot 10^3) = 17,5, \end{aligned}$$

что сходится с результатом графоаналитического расчета.

Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} \cong h_{11э} \approx 210 \text{ Ом}.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U \approx -h_{21э} R_{\text{н}} / R_{\text{вх}} \approx -18,5 \cdot 500 / 210 = -44;$$

точнее,

$$K_U = -17,5 \cdot 500 / 210 = -41,5.$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = |K_I K_U| = 17,5 \cdot 41,5 = 725.$$

Влияние температуры на работу транзисторов.

Цепи питания. Стабилизация рабочей точки

2.46. У германиевого транзистора при температуре окружающей среды $T = 20^\circ\text{C}$ ток базы $I_{\text{б}} = 80 \text{ мкА}$, обратный ток коллекторного перехода $I_{\text{КБ0}} = 10 \text{ мкА}$. Предполагая, что ток

$I_{КБ0}$ удваивается при увеличении температуры на каждые 10°C , определить ток коллектора в схеме ОЭ при температуре 20, 40 и 60°C .

Считать, что коэффициент передачи тока базы β постоянен в рассматриваемом диапазоне температур и равен 49.

Ответ: 4,4; 5,92; 11,92 мА.

2.47. Чему равна максимально допустимая мощность транзистора ГТ108А, находящегося в воздушной среде при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, если тепловое сопротивление переход — окружающая среда $R_{пс}$ составляет 0,8 К/мВт, а максимально допустимая температура перехода $T_{п\max} = 80^\circ\text{C}$?

Решение

Температура перехода

$$T_{п} = T_{с} + R_{пс} P_{КЭ},$$

где $T_{п}$ — температура перехода, $^\circ\text{C}$; $T_{с}$ — температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $R_{пс}$ — тепловое сопротивление переход — окружающая среда, К/мВт; $P_{КЭ}$ — мощность, выделяемая на эмиттерном и коллекторном переходах, мВт.

Считая величину $T_{п}$ равной $T_{п\max}$ и подставляя числовые значения, получаем

$$P_{КЭ} = (T_{п} - T_{с})/R_{пс} = (80 - 20)/0,8 = 75 \text{ мВт}.$$

2.48. Некоторый транзистор выделяет на коллекторном переходе мощность $P_{К} = 25$ мВт. Тепловое сопротивление переход — окружающая среда $R_{пс} = 0,5$ К/мВт. Какую температуру имеет коллекторный переход, если температура окружающей среды $T_{с} = 40^\circ\text{C}$?

Ответ: $52,5^\circ\text{C}$.

2.49. Какую температуру будет иметь коллекторный переход транзистора, рассмотренного в предыдущей задаче, если с использованием теплоотвода сопротивление переход — среда уменьшилось до $R_{пс} = 0,3$ К/мВт?

Ответ: $47,5^\circ\text{C}$.

2.50. Максимально допустимая температура коллекторного перехода транзистора, описанного в задачах 2.48 и 2.49, равна 90°C . Чему равна максимально допустимая мощность, выделяемая на коллекторном переходе без теплоотвода и с теплоотводом при температуре окружающей среды $T_{с} = 40^\circ\text{C}$?

Ответ: 100 мВт; 167 мВт.

2.51. На выходных характеристиках транзистора ГТ108А для схемы ОЭ (рис. 2.31) построить линии максимально допустимой мощности при температуре окружающей среды 30

и 50°C , если максимально допустимая температура перехода $T_{\text{пmax}} = 80^{\circ}\text{C}$ и тепловое сопротивление переход — среда $R_{\text{пс}} = 0,8 \text{ К/Вт}$.

Решение

Найдем максимальную мощность, рассеиваемую в транзисторе при температуре 30°C , по формуле

$$P_{\text{КЭmax}} = (T_{\text{п}} - T_{\text{с}})/R_{\text{пс}} = (80 - 30)/0,8 = 62,5 \text{ мВт.}$$

Так как $P_{\text{КЭ}} = U_{\text{КЭ}}I_{\text{К}}$, то, задаваясь значениями $U_{\text{КЭ}}$, найдем значения тока коллектора по формуле $I_{\text{Кmax}} = P_{\text{КЭmax}}/U_{\text{КЭ}}$. Полученные результаты приведены ниже:

$U_{\text{КЭ}}$, В	1,5	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12
$I_{\text{К}}$, мА	41,5	31,3	21	15,6	12,5	10,4	9,0	7,8	6,31	5,71	5,2

При температуре $T = 50^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{КЭmax}} = (80 - 50)/0,8 = 37,5 \text{ мВт}$. Аналогично, задаваясь значениями $U_{\text{КЭ}}$, определяем:

$U_{\text{КЭ}}$, В	0,9	1	1,5	2	3	4	6	8	10	12
$I_{\text{К}}$, мА	41,6	37,5	25	18,8	12,5	9,4	6,25	4,7	3,8	3,11

Построенные по этим данным кривые показаны на рис. 2.31.

2.52. Германиевый транзистор ГТ108А используется в схеме с оборванной базой. Определить температуру, при которой произойдет тепловой пробой, если транзистор имеет следующие данные: максимально допустимая температура перехода $T_{\text{пmax}} = 80^{\circ}\text{C}$, тепловое сопротивление переход — среда $R_{\text{пс}} = 0,8 \text{ К/Вт}$, обратный ток коллекторного перехода $I_{\text{КБ0}} = 10 \text{ мкА}$ при 20°C , коэффициент передачи тока базы $\beta = 50$ (постоянен в интервале температур от 20 до 80°C). Напряжение источника $E_{\text{к}} = -10 \text{ В}$.

Решение

Мощность, рассеиваемая транзистором,

$$P_{\text{КЭ}} = U_{\text{ЭК}}I_{\text{К}} \quad (1)$$

Тогда изменение мощности, вызванное изменением температуры,

$$dP_{\text{КЭ}} = \frac{\partial P_{\text{КЭ}}}{\partial U_{\text{ЭК}}} dU_{\text{ЭК}} + \frac{\partial P_{\text{КЭ}}}{\partial I_{\text{К}}} dI_{\text{К}} \quad (2)$$

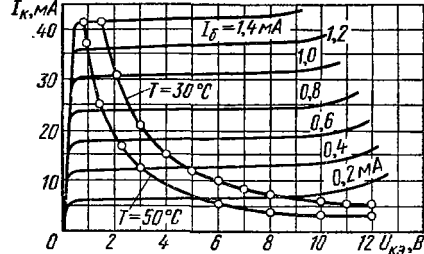


Рис. 2.31

Так как $U_{ЭК}$ — величина постоянная, то $dU_{КЭ} = 0$, поэтому

$$dP_{КЭ} = \frac{\partial P_{КЭ}}{\partial I_{К}} dI_{К}. \quad (3)$$

Но

$$\frac{\partial P_{КЭ}}{\partial I_{К}} = U_{ЭК}. \quad (4)$$

Следовательно,

$$dP_{КЭ} = U_{ЭК} dI_{К} \quad (5)$$

причем

$$dI_{К} = S_{ИК} dI_{КБ0}, \quad (6)$$

где $S_{ИК} = \Delta I_{К} / \Delta I_{КБ0}$ — коэффициент температурной неустойчивости по току.

Для данной схемы

$$S_{ИК} = \beta + 1 = 50 + 1 = 51. \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (5), получаем

$$dP_{КЭ} = U_{ЭК} (\beta + 1) dI_{КБ0}. \quad (8)$$

Предположив, что ток $I_{КБ0}$ удваивается при повышении температуры на каждые 10°C , можно записать

$$I_{КБ0} = I_{КБ0(T=20^\circ\text{C})} e^{(T-T_0)/10}. \quad (9)$$

Для удобства расчетов выразим число 2 как некоторую степень числа e . Так как $2 \approx e^{0,7}$, то (9) можем переписать в следующем виде:

$$I_{КБ0} = I_{КБ0(T=20^\circ\text{C})} e^{A(T-T_0)}, \quad (10)$$

где $A = 0,07$.

Дифференцируем (10) по T :

$$\frac{dI_{КБ0}}{dT} = AI_{КБ0(T=20^\circ\text{C})} e^{A(T-T_0)}. \quad (11)$$

Подставив (10) в (11), получим

$$\frac{dI_{КБ0}}{dT} = AI_{КБ0}, \quad (12)$$

или

$$dI_{КБ0} = AI_{КБ0} dT.$$

Подставив (12) в (8), получим

$$dP_{КЭ} = U_{ЭК} (\beta + 1) AI_{КБ0} dT.$$

Следовательно,

$$\frac{dP_{кЭ}}{dT} = U_{ЭК} (\beta + 1) AI_{кБ0} = 10 \cdot 51 \cdot 0,07 = 35,07 I_{кБ0},$$

где $dP_{кЭ}/dT$ выражается в милливаттах на градус, а $I_{кБ0}$ — в миллиамперах.

Предполагая, что $dP_{кЭ}/dT \approx \Delta P_{кЭ}/\Delta T$, и приравнявая это выражение величине, обратной тепловому сопротивлению (условие теплового пробоя), получаем

$$\Delta P_{кЭ}/\Delta T = 1/R_{тс}.$$

В рассматриваемом случае $35,07 I_{кБ0} = (1/0,8)$ мВт/град, откуда $I_{кБ0} \approx 36$ мкА. Этот результат означает, что тепловой пробой транзистора произойдет, если обратный ток коллекторного перехода этого транзистора $I_{кБ0} \geq 36$ мкА. Из (9) можно легко найти температуру перехода, при которой ток достигнет 36 мкА:

$$I_{кБ0} = I_{кБ0(T=20^\circ\text{C})} 2^{(T_n - T_0)/10}. \quad (13)$$

Логарифмируя (13), получаем

$$\lg \frac{I_{кБ0}}{I_{кБ0(T_0=20^\circ\text{C})}} = \frac{T_n - T_0}{10} \lg 2;$$

тогда

$$\lg \frac{36}{10} = \frac{T_n - 20}{10} \lg 2;$$

следовательно,

$$0,56 = \frac{(T - 20)}{10} 0,301,$$

откуда $T = 5,6/0,301 + 20 = 38,6^\circ\text{C}$. Итак, при данных условиях тепловой пробой транзистора ГТ108А при обрыве в цепи базы произойдет при температуре перехода $T_n = 38,6^\circ\text{C}$.

2.53. Мощный транзистор, имеющий тепловое сопротивление между переходом и корпусом $R_{тк} = 0,8$ К/Вт, должен рассеивать мощность $P_{кЭ} = 10$ Вт при температуре окружающей среды $T_c = 32^\circ\text{C}$. Для повышения надежности температуру перехода решено ограничить величиной 70°C . В сборочной конструкции содержатся шайба и изолирующая силиконовая смазка. Тепловое сопротивление шайбы равно $1,5$ К/Вт, а силиконовая смазка уменьшает его примерно на 40%. Определить, какова должна быть площадь теплоотвода, если он необходим. Считать, что 1 см^2 металлической поверхности теплоотвода имеет тепловое сопротивление 800 К/Вт.

Решение

Определяем тепловое сопротивление между корпусом и теплоотводом $R_{кт}$, учитывая влияние силиконовой смазки:

$$R_{кт} = 1,5 - 1,5 \cdot 0,4 = 0,9 \text{ К/Вт.}$$

Общее тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой определяется выражением

$$R_{пс} = R_{пк} + R_{кт} + R_{тс}, \quad (1)$$

где $R_{пс}$ — тепловое сопротивление переход — среда; $R_{пк}$ — тепловое сопротивление переход — корпус; $R_{кт}$ — тепловое сопротивление корпус — теплоотвод; $R_{тс}$ — тепловое сопротивление теплоотвод — среда.

В выражении (1) неизвестны тепловое сопротивление переход — среда $R_{пс}$ и тепловое сопротивление теплоотвод — среда $R_{тс}$.

Можно также записать

$$T_{п} = T_{с} + R_{пс} P_{кэ}. \quad (2)$$

Из (2), подставляя исходные данные, получаем

$$R_{пс} = (T_{п} - T_{с}) / P_{кэ} = (70 - 32) / 10 = 3,8 \text{ К/Вт.}$$

Подставляя значение $R_{пс}$ в (1) и решая это уравнение относительно $R_{тс}$, определяем

$$R_{тс} = R_{пс} - R_{пк} - R_{кт} = 3,8 - 0,8 - 0,9 = 2,1 \text{ К/Вт.}$$

Полагая, что 1 см^2 металлической поверхности имеет тепловое сопротивление 800 К/Вт , и считая, что $R_{тс}$ изменяется обратно пропорционально площади поверхности теплоотвода, найдем площадь теплоотвода: $\Pi = 800 \cdot 1/2,1 = 381 \text{ см}^2$.

2.54. Транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 49$ используется в схеме, изображенной на рис. 2.32. Определить напряжение $U_{кэ}$ при $T = 50^\circ\text{C}$, если обратный ток коллекторного перехода $I_{кб0} = 10 \text{ мкА}$ зависит от температуры по закону $I_{кб0} = I_{кб0} e^{0,08(T - T_0)}$, где $T - T_0 = 50 - 25 = 25^\circ\text{C}$. Напряжение источника $E_k = +20 \text{ В}$.

Решение

Здесь

$$I'_{кб0} = I_{кб0} e^{0,08(T - T_0)} = 10 \cdot 10^{-6} e^{0,08 \cdot 25} = 74 \text{ мкА,}$$

$$\Delta I_{кб0} = I'_{кб0} - I_{кб0} = 74 - 10 = 64 \text{ мкА.}$$

Тогда изменение напряжения

$$\begin{aligned}\Delta U_{КЭ} &= -\Delta I_{К}(\beta + 1)R_{н} = \\ &= -64 \cdot 10^{-6}(49 + 1) \cdot 2 \cdot 10^3 = -6,4 \text{ В.}\end{aligned}$$

Напряжение коллектор – эмиттер при $T = 25^\circ\text{C}$ $U_{КЭ} = E_{К} - I_{К}R_{н}$, но

$$\begin{aligned}I_{К} &= \beta I_{Б} + I_{КБ0}(\beta + 1) = \\ &= 49 \cdot 20 / (200 \cdot 10^3) + 10 \cdot 10^{-6}(49 + 1) = 5,4 \text{ мА.}\end{aligned}$$

Таким образом, $U_{КЭ} = 20 - 5,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 9,2 \text{ В.}$

Напряжение коллектор – эмиттер при $T = 50^\circ\text{C}$ $U'_{КЭ} = U_{КЭ} + \Delta U_{КЭ} = 9,2 + (-6,4) = 2,8 \text{ В.}$

2.55. Транзистор с параметрами $\beta = 50$ и $I_{КБ0} = 10 \text{ мкА}$ при $T = 25^\circ\text{C}$ используется в схеме, изображенной на рис. 2.32. Напряжение $E_{К} = +20 \text{ В}$ и $U_{БЭ} = 100 \text{ мВ}$. Определить напряжение $U_{КЭ}$ при $T = 25$ и 50°C . Считать, что температурный коэффициент напряжения $\partial U_{БЭ} / \partial T = -2,5 \text{ мВ/К}$.

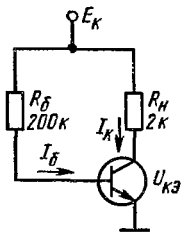


Рис. 2.32

Решение

При $T = 25^\circ\text{C}$

$$I_{Б} = (E_{К} - U_{БЭ}) / R_{Б} = (20 - 0,1) / (200 \cdot 10^3) = 99,5 \text{ мкА};$$

$$\begin{aligned}I_{К} &= \beta I_{Б} + I_{КБ0}(\beta + 1) = 50(99,5 \cdot 10^{-6}) + 10 \cdot 10^{-6} \cdot 51 = \\ &= 4,98 + 0,51 = 5,49 \text{ мА};\end{aligned}$$

$$U_{КЭ} = E_{К} - I_{К}R_{н} = 20 - 5,49 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 9 \text{ В.}$$

При $T = 50^\circ\text{C}$ напряжение на эмиттерном переходе уменьшится до значения

$$U'_{БЭ} = U_{БЭ} + \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial T} \Delta T = 100 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-3}(50 - 25) = 37,5 \text{ мВ.}$$

Следовательно,

$$I'_{Б} = (20 - 37,5 \cdot 10^{-3}) / (200 \cdot 10^3) \approx 20 / (200 \cdot 10^3) = 0,1 \text{ мА.}$$

Заметим, что из-за большого значения сопротивления $R_{Б}$ изменение напряжения $U_{БЭ}$, вызванное изменением температуры, почти никакой роли не играет. Изменение тока базы, вызванное изменением напряжения $U_{БЭ}$, $\Delta I_{Б} = 100 - 99,5 = 0,5 \text{ мкА}$. Изменение тока коллектора, вызванное этой же причиной, составляет $50(0,5 \cdot 10^{-6}) = 25 \text{ мкА}$.

Новое значение тока $I_{КБ0}$ определим по формуле

$$I'_{КБ0} = I_{КБ0} e^{0,08 \Delta T} = 10 \cdot 10^{-6} e^{0,08(50 - 25)} = 74 \text{ мкА.}$$

Новое значение тока коллектора

$$I_K = \beta I_B + I_{КБ0} (\beta + 1) = 50 (0,1 \cdot 10^{-3}) + 74 \cdot 10^{-6} \cdot 51 = 8,7 \text{ мА.}$$

Следовательно,

$$U_{КЭ} = 20 - 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2,6 \text{ В.}$$

2.56. Транзистор типа МП21В работает в схеме, изображенной на рис. 2.33, а. Пользуясь выходными характеристиками транзистора (рис. 2.33, б), графически определить рабочую точку при $E_K = -40 \text{ В}$ и $R_H = 1 \text{ кОм}$.

Решение

Исходим из того, что

$$U_{КЭ} = E_K + I_Э R_H = E_K + (I_B + I_K) R_H.$$

Так как $I_B \approx -U_{КЭ}/R_Б$, то, подставляя это значение в уравнение для $U_{КЭ}$, получаем

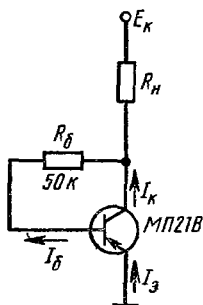
$$U_{КЭ} = E_K + (-U_{КЭ}/R_Б + I_K) R_H.$$

Решив последнее уравнение относительно $U_{КЭ}$, имеем уравнение линии нагрузки:

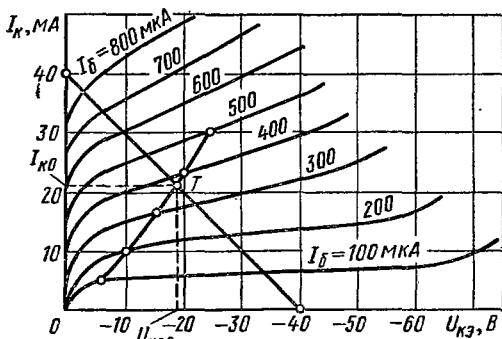
$$U_{КЭ} = \frac{E_K}{1 + R_H/R_Б} + \frac{R_H}{1 + R_H/R_Б} I_K.$$

Положив $I_K = 0$, найдем первую точку линии нагрузки:

$$U_{КЭ} = \frac{E_K}{1 + R_H/R_Б} = \frac{-40}{1 + 1/50} \approx -40 \text{ В,}$$



а)



б)

Рис. 2.33

а при $U_{КЭ} = 0$ — вторую точку дуги линии нагрузки:

$$I_K = -E_K/R_H = 40/10^3 = 40 \text{ мА.}$$

Чтобы найти рабочую точку, необходимо на семействе характеристик построить линию смещения, воспользовавшись соотношением $U_{КЭ} \approx -I_B R_6$. Задавая значения I_B и подставляя их в последнее уравнение, находим значения $U_{КЭ}$:

I_B , мкА	100	200	300	400	500
$U_{КЭ}$, В	-5	-10	-15	-20	-25

Точка пересечения линии нагрузки с линией смещения определяет рабочую точку $U_{КЭ} = -19 \text{ В}$, $I_{K0} = 22 \text{ мА}$.

2.57. В схеме, изображенной на рис. 2.34, используется транзистор с коэффициентом передачи тока базы $\beta = 50$ и обратным током коллектора $I_{КБ0} = 10 \text{ мкА}$. Напряжение источника питания $E_K = -15 \text{ В}$. Определить сопротивления R_6 и R_H , если ток коллектора $I_K = 1 \text{ мА}$, напряжение коллектор — эмиттер $U_{КЭ} = -6 \text{ В}$.

Решение

Известно, что ток коллектора $I_K = \beta I_B + I_{КБ0}(\beta + 1)$, откуда

$$I_B = \frac{I_K - I_{КБ0}(\beta + 1)}{\beta} = \frac{1 - 10 \cdot 10^{-3}(50 + 1)}{50} = 10 \text{ мкА.}$$

Сопротивление резистора R_6 определим по формуле

$$R_6 = (-E_K + U_{БЭ})/I_B.$$

Так как $U_{БЭ} \ll E_K$, то $R_6 \approx -E_K/I_B = 15/(10 \cdot 10^{-6}) = 1,5 \text{ МОм}$. Найдем сопротивление резистора нагрузки:

$$R_H = (-E_K + U_{КЭ})/I_K = (15 - 6)/(1 \cdot 10^{-3}) = 9 \text{ кОм.}$$

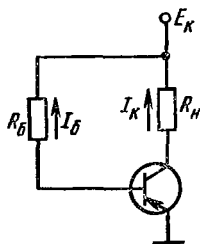


Рис. 2.34

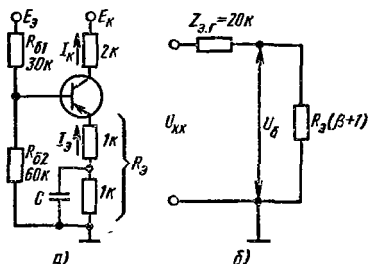


Рис. 2.35

2.58. Дана схема, изображенная на рис. 2.35, а. Определить коллекторный ток, если коэффициент передачи тока базы тран-

истора $\beta = 50$, обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ0} \approx \approx 0$ и $E_3 = -30$ В, $E_k = -40$ В.

Решение

Воспользовавшись методом эквивалентного генератора, преобразуем внешнюю цепь базы. ЭДС эквивалентного генератора (напряжение холостого хода)

$$U_{x.x} = E_3 \frac{R_{62}}{R_{61} + R_{62}} = \frac{(-30) 60}{30 + 60} = -20 \text{ В.}$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора

$$Z_{ЭГ} = \frac{R_{61} R_{62}}{R_{61} + R_{62}} = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} = 20 \text{ кОм.}$$

Входное сопротивление $R_{вх}$, измеряемое между выводом базы и заземленным выводом эквивалентной схемы, $R_{вх} = = R_3 (\beta + 1) = 2 \cdot 51 = 102$ кОм. Эквивалентная схема контура эмиттер — база показана на рис. 2.35, б. Из этой схемы определим

$$U_B = U_{x.x} \frac{R_3 (\beta + 1)}{R_3 (\beta + 1) + Z_{ЭГ}} = -20 \frac{102}{102 + 20} = -16,7 \text{ В.}$$

Так как $U_{БЭ} \approx 0$, то $U_3 = -16,7$ В. Находим ток эмиттера:

$$I_3 = -U_3 / R_3 = 16,7 / (2 \cdot 10^3) = 8,35 \text{ мА.}$$

Следовательно,

$$I_K \approx \alpha I_3 = \frac{\beta}{(\beta + 1)} I_3 = \frac{50}{50 + 1} 8,35 \cdot 10^{-3} = 8,2 \text{ мА.}$$

2.59. Схема усилителя изображена на рис. 2.36. Рассчитать цепи смещения, если рабочая точка задана следующими координатами: $I_K = 1$ мА, $U_{КЭ} = -6$ В. Коэффициент усиления каскада $K_U = -8$.

Решение

Здесь $U_{R_H} = I_K R_H = 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^3 = 8$ В. Так как напряжение $U_{КЭ} = -6$ В, то суммарное напряжение на резисторах в цепи эмиттера $U_3 = 30 - 6 - 8 = 16$ В. Пренебрегая током $I_{КБ0}$, получаем $I_B = I_K / \beta = 1 \cdot 10^{-3} / 50 = 20$ мкА. Следовательно, $I_3 = = I_K + I_B = 1 + 0,02 = 1,02$ мА. При $|K_U| \leq 10$ справедливо приближенное равенство $K_U \approx -R_H / R_3$, где K_U — коэффициент усиления по напряжению, откуда $R_3 = R_H / |K_U| = 8 \cdot 10^3 / 8 = = 1$ кОм.

Как видим, сопротивлением R_3 является сопротивление резистора R_3 . Напряжение на этом резисторе $U_{R_3} = I_3 R_3 =$

$= 1 \cdot 10^3 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3} \approx 1$ В. Следовательно, падение напряжения на резисторе R_4 равно $U_{R_4} = 16 - 1 = 15$ В. Таким образом, $R_4 = 15 / (1 \cdot 10^{-3}) = 15$ кОм.

Рассчитаем делитель в цепи базы. Для стабильной работы схемы необходимо, чтобы ток через резистор R_2 был по крайней мере раз в 5–10 больше, тока базы. Поскольку $I_B = 20$ мкА, возьмем $I_{дел} = 200$ мкА. Пренебрегая падением напряжения на эмиттерном переходе, можно считать, что $U_B \approx U_3 \approx -16$ В, откуда $R_2 = 16 / (200 \cdot 10^{-6}) = 80$ кОм.

Определим R_1 :

$$R_1 = (-E_K + U_3) / (I_B + I_{дел}) = (30 - 16) / (220 \cdot 10^{-6}) = 63,5 \text{ кОм.}$$

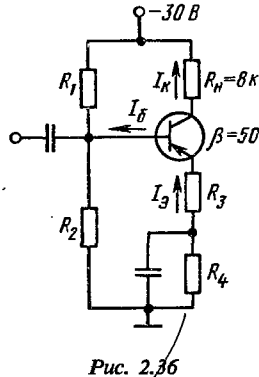


Рис. 2.36

Частотные свойства транзисторов

2.60. Транзистор работает в схеме ОБ с нагрузкой $R_H = 2$ кОм. Его параметры: $r_3 = 40$ Ом, $r_6 = 200$ Ом, $r_k = 200$ кОм, $C_k = 20$ пФ. На какой частоте за счет влияния емкости C_k модуль коэффициента усиления $|K_I|$ уменьшится вдвое? Внутренним сопротивлением источника сигнала пренебречь.

Решение

Изобразим Т-образную схему замещения транзистора (рис. 2.37, а). Ток, протекающий через резистор R_H , должен быть в два раза меньше тока, протекающего через него на низкой частоте, когда емкость C_k незначительна (рис. 2.37, б).

Так как можно пренебречь сопротивлением r_3 и внутренним сопротивлением источника сигнала ввиду их малости, то токи пропорциональны проводимостям (рис. 2.37, в):

$$1/R_H \text{ и } Y = \sqrt{(1/R_H)^2 + (\omega C_k)^2}.$$

По условию задачи, на высокой частоте $1/R_H = Y/2$. Следовательно,

$$\frac{2}{R_H} = Y = \sqrt{\left(\frac{1}{R_H}\right)^2 + (\omega C_k)^2} = \frac{\sqrt{1 + (\omega C_k R_H)^2}}{R_H}.$$

После преобразования получаем $4 = 1 + (\omega C_k R_H)^2$, откуда $\omega = \sqrt{3} / (C_k R_H)$;

$$f = \frac{\sqrt{3}}{2\pi C_k R_H} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^3} \approx 7 \text{ МГц.}$$

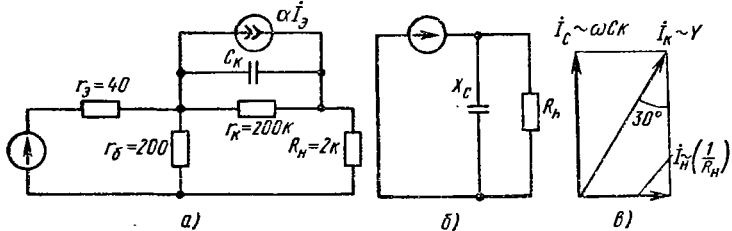


Рис. 2.37

2.61. На низких частотах коэффициент передачи тока эмиттера транзистора $h_{2160} = -0,98$ его предельная частота $f_{h_{216}} = 5$ МГц. Определить: а) модуль коэффициента передачи тока эмиттера $|h_{216}|$ этого транзистора на частоте 10 МГц; б) частоту, на которой модуль коэффициента передачи тока эмиттера уменьшается до значения 0,6.

Решение

Известно, что коэффициент передачи тока эмиттера h_{216} изменяется с частотой согласно выражению

$$h_{216} = h_{2160} \left[\frac{1}{1 + j(f/f_{h_{216}})} \right],$$

где h_{2160} — коэффициент передачи тока эмиттера на низкой частоте; $f_{h_{216}}$ — предельная частота, т. е. частота, на которой $|h_{216}| = |h_{2160}|/\sqrt{2}$. Следовательно, если $|h_{2160}| = 0,98$, $f_{h_{216}} = 5$ МГц и $f = 10$ МГц, то

$$|h_{216}| = \frac{0,98}{\sqrt{1 + (10/5)^2}} = 0,44.$$

При $h_{2160} = -0,98$, $|h_{216}| = 0,6$ и $f_{h_{216}} = 5$ МГц имеем

$$\begin{aligned} f &= f_{h_{216}} \sqrt{(h_{2160}/h_{216})^2 - 1} = \\ &= 5 \sqrt{(0,98/0,6)^2 - 1} = \\ &= 6,24 \text{ МГц.} \end{aligned}$$

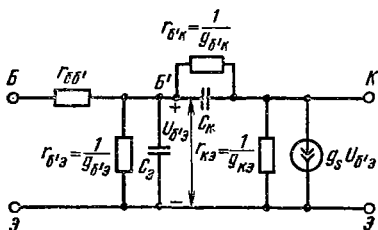


Рис. 2.38

2.62. При $T = 300$ К в рабочей точке с координатами $I_K = 10$ мА и $U_{КЭ} = 10$ В на низких частотах транзистор имеет сле-

дующие значения h -параметров: $h_{113} = 500$ Ом, $h_{123} = 10^{-7}$, $h_{213} = 100$, $h_{223} = 50$ мкСм.

Вычислить все параметры гибридной схемы замещения, если $f_{гр} = 50$ МГц и $C_k = 3$ пФ.

Решение

Гибридная схема замещения изображена на рис. 2.38. При расчете ее параметров учтем, что $g_s = I_K/\varphi_T$, где I_K — ток коллектора в рабочей точке, $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал.

В рассматриваемом случае

$$g_s = 10 \cdot 10^{-3} / (25,8 \cdot 10^{-3}) = 0,388 \text{ См};$$

$$r_{6'3} = 1/g_{6'3} = h_{213}/g_s = h_{213}\varphi_T/I_K = 100/0,388 = 258 \text{ Ом};$$

$$r_{66'} = h_{113} - r_{6'3} = 500 - 258 = 242 \text{ Ом};$$

$$r_{6'к} = 1/g_{6'к} = r_{6'3}/h_{123} = 258/10^{-4} = 2,58 \text{ МОм};$$

$$g_{к3} = 1/r_{к3} = h_{223} - (1 + h_{213})g_{6'к} = \\ = 50 \cdot 10^{-6} - 101 \cdot 0,388 \cdot 10^{-6} = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$r_{к3} = 1/g_{к3} = 92,5 \text{ кОм};$$

$$C_3 = g_s / (2\pi f_{гр}) = 0,388 / (2\pi \cdot 50 \cdot 10^6) = 1235 \cdot 10^{-12} = 1235 \text{ пФ}.$$

§ 2.2. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевые транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, в которых управление током, протекающим между двумя электродами, осуществляется с помощью напряжения, приложенного к третьему электроду. Их работа основана на перемещении только основных носителей заряда, т. е. дырок или электронов.

Управление током в них осуществляется за счет изменения удельной проводимости и площади полупроводникового слоя (канала), через который проходит рабочий ток, с помощью электрического поля. Электрод полевого транзистора, через который втекают носители заряда в канал, называется истоком (И), а электрод, через который из канала вытекают носители заряда, называется стоком (С). Эти электроды обратимы. С помощью напряжения, прикладываемого к третьему электроду, называемому затвором (З), осуществляют перекрытие канала, т. е. изменяют удельную проводимость и площадь сечения канала.

По конструктивным особенностям полевые транзисторы разделяют на транзисторы с управляющим p - n -переходом