

$= 0,05$  см, а удельная проводимость примесного германия  $\sigma = 8$  См/см.

Ответ:  $f_{пер} = 1$  ГГц;  $r_{диф} = 15$  Ом;  $R_s = 0,65$  Ом;  $r_{пер} = 1,7 \cdot 10^{-9}$  с.

## ГЛАВА 2

### ТРАНЗИСТОРЫ. РАСЧЕТ ОДИНОЧНЫХ КАСКАДОВ

Транзисторами называют полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности и имеющие три или более вывода. Различают биполярные и полевые транзисторы.

#### § 2.1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

##### Физические процессы в биполярном транзисторе

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя областями чередующейся электропроводности, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Эти транзисторы называют биполярными, потому что их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков. Биполярные транзисторы могут быть типа *p-n-p* и *n-p-n*.

Структуры и условные обозначения данных типов транзисторов показаны на рис. 2.1. Между каждой областью полупроводника и ее выводом имеется омический контакт, который на рис. 2.1 показан жирной чертой. Средний слой транзистора называют базой (Б), один из крайних — эмиттером (Э), другой — коллектором (К).

База — область, в которую инжектируются неосновные для этой области носители заряда. Эмиттер — область, из которой осуществляется инжекция носителей заряда в базу. Коллектор предназначен для экстракции носителей заряда из базы. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называется эмиттерным переходом, между базой и коллектором — коллекторным переходом.

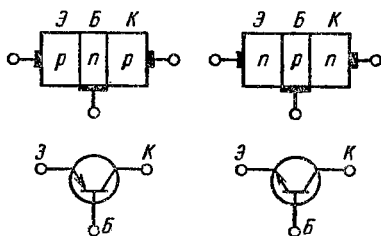


Рис. 2.1

В зависимости от соче-

гания знаков и значений напряжений на  $p$ - $n$ -переходах различают следующие области (режимы) работы транзистора: активная область — напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном — обратное; область отсечки — на обоих переходах обратные напряжения (транзистор заперт); область насыщения — на обоих переходах прямые напряжения (транзистор открыт); инверсная активная область — напряжение на эмиттерном переходе обратное, а на коллекторном — прямое. Режимы отсечки и насыщения характерны для работы транзистора в качестве переключательного элемента. Активную область, или активный режим, используют при работе транзистора в усилителях или генераторах. Инверсное включение применяют в схемах двунаправленных переключателей, использующих симметричные транзисторы, в которых обе крайние области имеют одинаковые свойства.

В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК) (рис. 2.2, а, б, в).

Для определения аналитических зависимостей между токами и напряжениями идеализированный транзистор представляют эквивалентной схемой Эберса — Молла (рис. 2.3). Соответствующая одномерная модель состоит из двух идеальных  $p$ - $n$ -переходов, включенных навстречу друг другу. Объемные сопротивления слоев, емкости  $p$ - $n$ -переходов и эффект модуляции ширины базы не учитываются.

Токи эмиттера и коллектора выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{\text{Э}} &= I_{\text{ЭБК}} (e^{U_{\text{ЭБ}}/\varphi_T} - 1) - \alpha I_{\text{КБК}} (e^{U_{\text{КБ}}/\varphi_T} - 1), \\ I_{\text{К}} &= \alpha I_{\text{ЭБК}} (e^{U_{\text{ЭБ}}/\varphi_T} - 1) - I_{\text{КБК}} (e^{U_{\text{КБ}}/\varphi_T} - 1), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $I_{\text{ЭБК}}$  и  $I_{\text{КБК}}$  — тепловые токи эмиттерного и коллекторного

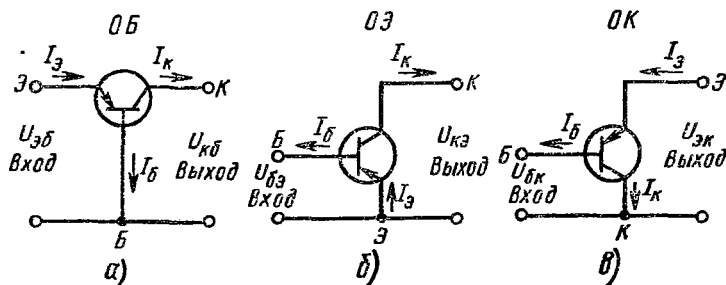


Рис. 2.2

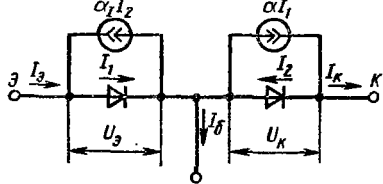


Рис. 2.3

переходов при коротком замыкании на входе транзистора ( $U_{КБ} = 0$  и  $U_{ЭБ} = 0$  соответственно);  $\alpha$  — коэффициент передачи тока эмиттера в активном режиме;  $\alpha_I$  — коэффициент передачи тока эмиттера при инверсном включении;  $U_{ЭБ}$  и  $U_{КБ}$  — напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах соответственно;  $\varphi_T = kT/e$  — температурный потенциал.

Можно показать, что

$$I_{КБК} = I_{КБ0} / (1 - \alpha\alpha_I), \quad (2.2)$$

$$I_{ЭБК} = I_{ЭБ0} / (1 - \alpha\alpha_I), \quad (2.3)$$

где  $I_{КБ0}$ ,  $I_{ЭБ0}$  — обратные токи коллекторного и эмиттерного переходов, измеряемые соответственно при обрыве коллектора и эмиттера.

Подставив выражения (2.2) и (2.3) в формулы (2.1), получим зависимость токов  $I_Э$ ,  $I_К$  и  $I_Б$  от напряжений  $U_{ЭБ}$  и  $U_{КБ}$ , т. е. выражения, описывающие статические ВАХ идеализированного транзистора:

$$I_Э = \frac{I_{ЭБ0}}{1 - \alpha\alpha_I} (e^{U_{ЭБ}/\varphi_T} - 1) - \frac{\alpha_I I_{КБ0}}{1 - \alpha\alpha_I} (e^{U_{КБ}/\varphi_T} - 1), \quad (2.4)$$

$$I_К = \frac{\alpha I_{ЭБ0}}{1 - \alpha\alpha_I} (e^{U_{ЭБ}/\varphi_T} - 1) - \frac{I_{КБ0}}{1 - \alpha\alpha_I} (e^{U_{КБ}/\varphi_T} - 1). \quad (2.5)$$

Учитывая, что  $I_Б = I_Э - I_К$ , получим

$$I_Б = \frac{(1 - \alpha) I_{ЭБ0}}{1 - \alpha\alpha_I} (e^{U_{ЭБ}/\varphi_T} - 1) + (1 - \alpha_I) \frac{I_{КБ0}}{1 - \alpha\alpha_I} (e^{U_{КБ}/\varphi_T} - 1). \quad (2.6)$$

Разрешая уравнение (2.4) относительно  $U_{ЭБ}$ , получим выражение для идеализированных входных (эмиттерных) характеристик транзистора  $U_{ЭБ} = f(I_Э) | U_{КБ} = \text{const}$ :

$$U_{ЭБ} = \varphi_T \ln \left[ \frac{I_Э}{I_{ЭБ0}} + 1 + \alpha (e^{U_{КБ}/\varphi_T} - 1) \right]. \quad (2.7)$$

Выражение для выходных характеристик может быть получено из уравнения (2.5):

$$I_К = \alpha I_Э - I_{КБ0} (e^{U_{КБ}/\varphi_T} - 1). \quad (2.8)$$

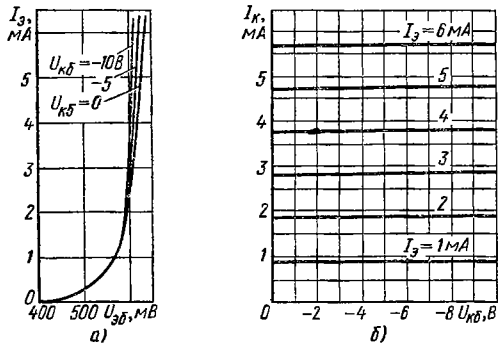


Рис. 2.4

На основании закона Кирхгофа для токов в цепях электродов транзистора можно записать  $I_Э \approx I_К + I_Б$ .

Реальные входные и выходные характеристики транзистора для схемы ОБ изображены на рис. 2.4, а, б.

Для активной области  $|U_{КБ}| < 0$  и  $|U_{КБ}| \gg \varphi_T$ , поэтому при нормальном включении

$$I_К = \alpha I_Э + I_{КБ0}. \quad (2.9)$$

Следовательно, ток коллектора  $I_К$  в активном режиме работы транзистора представляет собой сумму двух составляющих: тока  $I_{КБ0}$  и части эмиттерного тока, который определяется потоком носителей заряда, инжектированных в базу и дошедших (за вычетом рекомбинировавших в базе) до коллекторного перехода.

Величина

$$\alpha = \frac{I_К - I_{КБ0}}{I_Э}, \quad (2.10)$$

называемая статическим (интегральным) коэффициентом передачи эмиттерного тока, составляет 0,95–0,999.

Так как  $I_К \gg I_{КБ0}$ , то обычно статический коэффициент  $\alpha = I_К / I_Э$ .

В инверсном режиме (коллекторный переход включен в прямом, а эмиттерный — в обратном направлении) ток эмиттера

$$I_Э = \alpha_I I_К + I_{ЭБ0}. \quad (2.11)$$

Величина

$$\alpha_I = \frac{I_Э - I_{ЭБ0}}{I_К} \quad (2.12)$$

называется инверсным коэффициентом передачи коллекторного тока. Как правило,  $\alpha_i < \alpha$ .

Для анализа работы транзистора на переменном токе (с сигналами малых амплитуд) вводят дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока

$$\alpha_d = \left. \frac{dI_K}{dI_3} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} \quad (2.13)$$

Практически в активном режиме при не слишком больших уровнях инжекции величина  $\alpha$  мало меняется с изменением эмиттерного тока, и без большой погрешности можно полагать  $\alpha_d = \alpha$ . Поэтому в дальнейшем дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока также будем обозначать  $\alpha$ .

Статические ВАХ транзистора для схемы ОЭ показаны на рис. 2.5.

В первом квадранте на рис. 2.5 изображены выходные характеристики  $-I_K = f(U_{КЭ}) | I_B = \text{const}$ . Область I — активная область, в которой эмиттерный переход открыт, а коллекторный — закрыт. Как уже было сказано, эта область используется при работе транзистора в усилительном режиме. Если эмиттерный переход закрыт, то работа транзистора происходит в области III, которой соответствуют незначительные обратные токи (область отсечки). В области II эмиттерный и коллекторный переходы открыты, т. е. транзистор работает в режиме насыщения.

Во втором квадранте изображена характеристика передачи тока, т. е. зависимость  $I_K = f(I_B)$  при  $U_{КЭ} = \text{const}$ .

В третьем квадранте представлена входная характеристика — зависимость  $I_B = f(U_{БЭ}) | U_{КЭ} = \text{const}$ .

В транзисторе, включенном по схеме ОЭ, ток коллектора

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{КБ0}}{1 - \alpha} \quad (2.14)$$

Запишем это выражение в виде

$$I_K = B I_B + I_{КЭ0} \quad (2.15)$$

где  $B = \alpha / (1 - \alpha)$  — статический (интегральный) коэффициент передачи базового тока;  $I_{КЭ0} = I_{КБ0} / (1 - \alpha) = (1 + B) I_{КБ0}$  — обратный ток коллекторного перехода в схеме ОЭ при  $I_B = 0$ , т. е. при разомкнутом выводе базы.

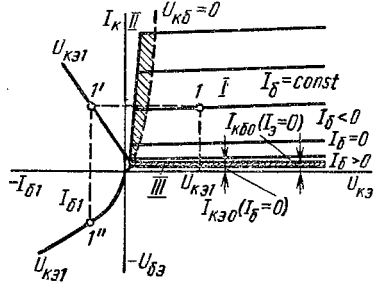


Рис. 2.5

Статический коэффициент передачи тока базы

$$B = \frac{I_K - I_{КБ0}}{I_B + I_{КБ0}}. \quad (2.16)$$

Так как  $I_{КБ0} \ll I_K$  и  $I_{КБ0} \ll I_B$ , то практически статический коэффициент передачи тока базы определяют как

$$B = I_K / I_B. \quad (2.17)$$

При работе транзистора на переменном токе при малых амплитудах используют дифференциальный коэффициент передачи тока базы

$$\beta = \left. \frac{dI_K}{dI_B} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}}. \quad (2.18)$$

Дифференциальный коэффициент  $\beta$  связан с интегральным (статическим) коэффициентом следующим соотношением:

$$\beta = B + (I_B + I_{КБ0}) \frac{d\beta}{dI_B}.$$

Зависимость  $\beta(I_B)$  выражена сильнее, чем зависимость  $\alpha(I_C)$ . Если же этой зависимостью без большой погрешности можно пренебречь, полагая  $d\beta/dI_B = 0$ , то  $\beta \approx B$ .

Как было сказано, транзистор в различных электронных устройствах может использоваться в трех схемах включения: ОЭ, ОК и ОБ.

Наиболее часто применяется схема ОЭ, так как позволяет получить наибольший коэффициент усиления по мощности. Она имеет достаточно высокие коэффициенты усиления по напряжению (с инвертированием фазы входного напряжения на  $180^\circ$ ), по току и относительно высокое входное сопротивление.

Схему ОК называют также эмиттерным повторителем, так как напряжение на эмиттере по полярности совпадает с напряжением на входе и близко к нему по значению. Эта схема усиливает ток и мощность, но не усиливает напряжение ( $K_U < 1$ ). Она обладает наибольшим из всех трех схем включения входным сопротивлением и наименьшим выходным сопротивлением, поэтому часто используется как буферный усилитель для согласования низкого сопротивления нагрузки с высоким выходным сопротивлением каскада, иначе говоря, применяется как трансформатор сопротивлений. Эмиттерный повторитель эквивалентен генератору напряжения, которое мало изменяется при изменении сопротивления нагрузки.

Схема ОБ обеспечивает усиление напряжения и мощности, но не усиливает ток (коэффициент усиления по току меньше единицы, но близок к ней). Подобно схеме ОЭ, она имеет высо-

кое выходное сопротивление. В отличие от схемы ОЭ входное сопротивление этой схемы очень мало; последнее обстоятельство делает ее непригодной для усиления больших напряжений. Обычно схема ОБ применяется для усиления напряжений на очень высоких частотах.

Схемы замещения и параметры транзистора. Для аналитического расчета цепей с транзисторами широко используют схемы замещения. Получили распространение физические и формализованные модели транзистора. В физической схеме замещения ее параметры связаны с физическими (собственными) параметрами транзистора. На рис. 2.6, а, б показаны Т-образные схемы замещения для переменных токов и напряжений для схем ОБ и ОЭ соответственно. Они справедливы для линейных участков входных и выходных ВАХ транзистора, на которых параметры транзистора можно считать неизменными. Здесь  $r_3$  — дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода (включенного в прямом направлении):

$$r_3 = \left. \frac{dU_{эб}}{dI_3} \right|_{U_{кб} = \text{const}} \quad (2.19)$$

Значения  $r_3$  зависят от постоянной составляющей тока эмиттера:

$$r_3 \approx \varphi_T / I_3 = 0,026 / I_3. \quad (2.20)$$

Числовое значение  $r_3$  лежит в пределах от единиц до десятков Ом.  $r_6$  — поперечное объемное сопротивление базы — сопротивление базовому току. Обычно  $r_6 \gg r_3$  и составляет 100—500 Ом. Эквивалентный источник тока  $\alpha I_3$  учитывает транзитную составляющую приращения эмиттерного тока, проходящую через базу в коллектор.

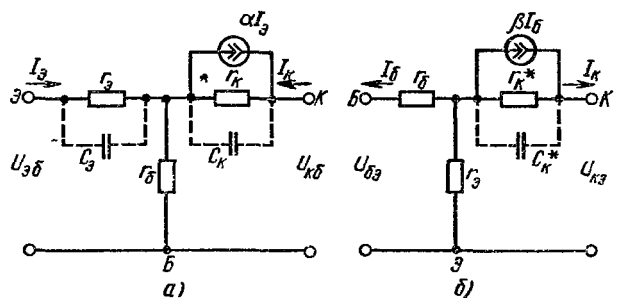


Рис. 2.6

$$r_k = \left. \frac{dU_{кб}}{dI_k} \right|_{I_3 = \text{const}}$$

— дифференциальное сопротивление коллекторного перехода (включенного в обратном направлении); учитывает изменение коллекторного тока с изменением напряжения  $U_{кб}$ . Значения  $r_k$  лежат в пределах 0,5—1 МОм.

Емкости  $C_3$  и  $C_k$  — это емкости эмиттерного и коллекторного переходов. Каждая из них равна сумме барьерной и диффузионной емкостей соответствующего перехода.

Поскольку на высоких частотах емкость  $C_k$  шунтирует большое сопротивление  $r_k$ , она сильно влияет на работу транзистора, а емкость  $C_3$  шунтирует малое сопротивление  $r_3$  и ее влияние незначительно. Емкость  $C_k$  учитывают при частотах, составляющих десятки килогерц, а емкость  $C_3$  — при частотах, превышающих единицы и десятки мегагерц. При работе на средних частотах (от десятков герц до единиц килогерц) емкости переходов не учитывают и в схему замещения не вводят.

Дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока

$$\alpha = dI_k/dI_3 |_{U_{кб} = \text{const}}$$

Коэффициент  $\alpha$  имеет порядок 0,9—0,999.

В Т-образной схеме замещения транзистора ОЭ (рис. 2.6, б) сопротивления  $r_3$ ,  $r_6$  имеют тот же физический смысл и тот же порядок величин, что и в схеме ОБ. Поскольку входной ток в схеме ОЭ — ток базы, в выходную цепь введен источник тока  $\beta I_6$ . Сопротивление  $r_k^* = r_k/(1 + \beta)$ , учитывает изменение коллекторного тока с изменением напряжения  $U_{кб}$ . Так как входным в схеме ОЭ является ток базы, который в  $1 + \beta$  раз меньше тока эмиттера, то при переходе от схемы ОБ к схеме ОЭ в  $1 + \beta$  раз уменьшается не только активное, но и емкостное сопротивление коллекторного перехода. В схеме ОЭ  $C_k^* = (1 + \beta)C_k$ . Увеличение емкости  $C_k^*$  приводит к еще большему ее влиянию на высоких частотах, чем влияние емкости  $C_3$ . В связи с этим емкость  $C_3$  в схеме ОЭ обычно не учитывается.

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы в схеме ОЭ

$$\beta = \left. \frac{dI_k}{dI_6} \right|_{U_{кб} = \text{const}}$$

Так как в транзисторе существует положительная обратная связь, обусловленная эффектом модуляции ширины базы, то во входные цепи схем замещения следовало бы ввести источник



напряжения, учитывающий это явление. Так как числовое значение коэффициента обратной связи мало ( $10^{-3} - 10^{-4}$ ), то обычно этот источник в схему замещения не вводят.

Получили также распространение формализованные модели транзистора. Они основаны на представлении транзистора в виде четырехполюсника, который может быть характеризован одной из шести систем уравнений, связывающих между собой входные и выходные токи и напряжения. Чаще всего используются следующие три системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= z_{11}\dot{I}_1 + z_{12}\dot{I}_2, \\ \dot{U}_2 &= z_{21}\dot{I}_1 + z_{22}\dot{I}_2; \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= y_{11}\dot{U}_1 + y_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= y_{21}\dot{U}_1 + y_{22}\dot{U}_2; \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Схемы замещения транзистора для систем  $z, y, h$ -параметров показаны на рис. 2.7, а, б, в соответственно. На высоких частотах используется также гибридная схема замещения (см. рис. 2.38).

Наиболее широко используется система  $h$ -параметров, так как эти параметры легко измерить и определить по ВАХ транзистора.  $h$ -параметры транзистора имеют следующий физический смысл:  $h_{11} = \dot{U}_1/\dot{I}_1 | \dot{U}_2=0$  — входное сопротивление транзистора в режиме короткого замыкания (к. з.) на выходе для переменного тока;  $h_{12} = \dot{U}_1/\dot{U}_2 | \dot{I}_1=0$  — коэффициент обратной связи по напряжению в режиме холостого хода (х. х.) на входе для переменного тока;  $h_{21} = \dot{I}_2/\dot{I}_1 | \dot{U}_2=0$  — коэффициент переда-

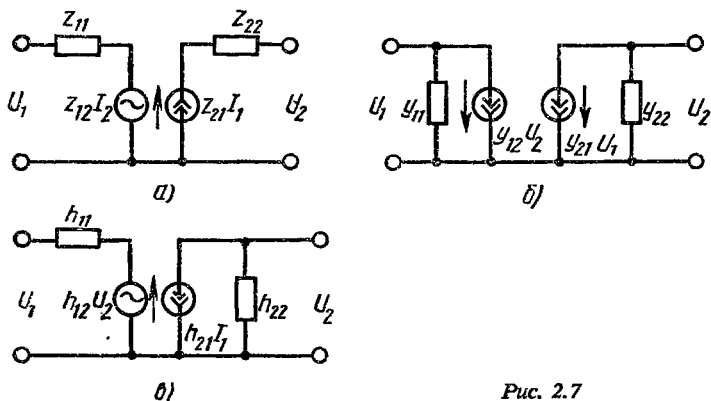


Рис. 2.7

чи тока в режиме к. з. на выходе для переменного тока;  $h_{22} = I_2/U_2 |_{I_1=0}$  — выходная проводимость транзистора в режиме х. х. на входе для переменного тока.

Значения  $h$ -параметров зависят от схемы включения транзистора,  $h$ -параметры транзистора связаны с их физическими параметрами в схеме ОБ следующими соотношениями:

$$r_3 = h_{116} (1 - h_{216}) h_{126} / h_{226}, \quad (2.24)$$

$$r_6 = h_{126} / h_{226}, \quad (2.25)$$

$$r_k = 1/h_{226}, \quad (2.26)$$

$$\alpha = |h_{216}|. \quad (2.27)$$

Влияние температуры на работу транзистора. Работа транзисторов сильно зависит от температуры, при которой находятся  $p$ - $n$ -переходы. Различают три основные причины нестабильности тока коллектора при изменении температуры. Прежде всего от температуры существенно зависит обратный ток коллекторного перехода  $I_{КБ0}$ . Обнаружено, что ток  $I_{КБ0}$  удваивается при изменении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$  для германиевых и на каждые  $7^\circ\text{C}$  для кремниевых транзисторов. Кроме того, напряжение база — эмиттер с ростом температуры уменьшается. Ориентировочно значение скорости этого уменьшения  $\Delta U_{БЭ} / \Delta T = -2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ . Наконец, коэффициент передачи тока базы  $\beta (h_{213})$  с увеличением температуры переходов увеличивается.

Наиболее вредное влияние на работу транзистора при изменении температуры оказывает увеличение тока  $I_{КБ0}$ . За счет этого фактора в наихудшем случае ток коллектора может возрасти настолько, что произойдет тепловой пробой коллекторного перехода транзистора.

Максимально допустимые электрические и тепловые параметры — это те параметры, которые не должны быть превышены при любых условиях эксплуатации и при которых обеспечивается заданная надежность.

*Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора*  $P_{К\text{max}}$  — наибольшая мощность, рассеиваемая в транзисторе при температуре окружающей среды  $T_c$  (или корпуса  $T_k$ ). При работе транзистора в режиме переключения, кроме мощности, рассеиваемой в коллекторном переходе, добавляется мощность, рассеиваемая в базе.

Значение  $P_{\text{max}}$ , допустимое при заданной температуре корпуса  $T_k$  или окружающей среды  $T_c$ , определяют по формулам

$$P_{\text{max}}(T_k) = (T_{\text{нmax}} - T_k) / R_{\text{ТПК}}, \quad (2.28)$$

$$P_{\text{max}}(T_c) = (T_{\text{нmax}} - T_c) / R_{\text{ТКС}}, \quad (2.29)$$

где  $T_{п\max}$  — максимально допустимая температура  $p$ - $n$ -перехода;  $R_{тпк}$  — тепловое сопротивление переход — корпус;  $R_{тпс}$  — тепловое сопротивление переход — окружающая среда.

**Максимально допустимые напряжения:**  $U_{кБ\max}$ ;  $U_{кЭ\max}$ ;  $U_{ЭБ\max}$ . Для большинства биполярных транзисторов указывается максимальное сопротивление между базой и эмиттером  $R_B$ , при котором допустимо данное значение  $U_{кЭ\max}$  в отсутствие запирающего смещения на базе.

**Максимально допустимые токи**  $I_{к\max}$ ;  $I_{Э\max}$ ;  $I_{Б\max}$  (регламентируется только для транзисторов большой и средней мощности).

**Частотные и импульсные свойства транзисторов.** С повышением частоты коэффициент передачи тока эмиттера уменьшается по модулю и становится комплексной величиной. Как следствие, происходит сдвиг по фазе между переменными составляющими тока коллектора и тока эмиттера. Частотные свойства транзисторов принято характеризовать рядом параметров.

**Предельной частотой коэффициента передачи тока**  $f_{h_{21}}$  называют такую частоту, на которой модуль коэффициента передачи тока уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз, т. е. на 3 дБ по сравнению с его низкочастотным значением. При включении транзистора по схеме ОБ эту частоту обозначают  $f_{h_{21б}}$  или иногда  $f_{\alpha}$ . В зависимости от значения этой частоты различают низкочастотные ( $f_{h_{21б}} \leq 3$  МГц), среднечастотные ( $3 \text{ МГц} \leq f_{h_{21б}} \leq 30$  МГц), высокочастотные ( $30 \text{ МГц} \leq f_{h_{21б}} \leq 300$  МГц) и СВЧ ( $f_{h_{21б}} \geq 300$  МГц)-транзисторы.

В схеме ОЭ предельную частоту передачи тока базы обозначают символом  $f_{h_{21э}}$  или  $f_{\beta}$ . Следует заметить, что частотные свойства транзистора в схеме ОЭ хуже, чем в схеме ОБ, так как частота  $f_{h_{21э}}$  примерно в  $h_{21э}$  раз ниже частоты  $f_{h_{21б}}$ .

**Граничной частотой коэффициента передачи тока базы** в схеме ОЭ называют такую частоту  $f_{гр}$  (или  $f_T$ ), на которой модуль коэффициента передачи тока базы равен единице. На любой частоте в диапазоне  $0,1f_{гр} < f < f_{гр}$  модуль коэффициента передачи тока изменяется со скоростью 6 дБ/октава, т. е. вдвое при изменении частоты в два раза. Для транзистора справедливы следующие соотношения:

$$f_{h_{21э}} \approx f_{h_{21б}}/h_{21э}; \quad f_{h_{21б}} \approx 1,2f_{гр}.$$

**Максимальной частотой генерации**  $f_{\max}$  называют наибольшую частоту, при которой транзистор способен работать в схеме автогенератора при оптимальной обратной связи. Будучи

выраженной в мегагерцах, приближенно частота  $f_{\max} \approx 200\sqrt{f_{\text{гр}}/\tau_{\text{к}}}$ . Здесь  $f_{\text{гр}}$  (МГц) — граничная частота,  $\tau_{\text{к}}$  (пс) — постоянная времени цепи обратной связи, характеризующая частотные и усилительные свойства транзистора, определяющая устойчивость усилительного каскада к самовозбуждению.

Важным параметром служит сопротивление базы транзистора  $r'_б$ , представляющее собой распределенное омическое сопротивление базовой области. Это сопротивление необходимо знать при определении входного сопротивления каскада. Сопротивление  $r'_б$  находят путем измерения постоянной времени цепи обратной связи  $\tau_{\text{к}}$ , поскольку  $\tau_{\text{к}} = r'_б C_{\text{к}}$ , где  $C_{\text{к}}$  — емкость коллекторного перехода.

При работе биполярного транзистора в качестве переключающего элемента (рис. 2.8, а) необходимо, чтобы в проводящем состоянии сопротивление участка коллектор — эмиттер было минимальным, а в непроводящем — максимальным. Когда транзистор выключен, т. е. эмиттерный переход смещен в обратном направлении, рабочая точка будет соответствовать точке А, которая находится на линии нагрузки, отвечающей сопротивлению резистора нагрузки  $R_{\text{н}}$  (рис. 2.8, б). Этот режим работы транзистора соответствует режиму отсечки. При увеличении тока базы рабочая точка перемещается по линии нагрузки в сторону к большим значениям коллекторного тока. При достижении базовым током значения  $I_{\text{б.вкл}}$  (точка В) коллекторный ток становится максимально большим, коллекторный переход открывается и транзистор переходит в режим насыщения. Этому моменту соответствует остаточное напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{\text{кэост}}$ .

Дальнейшее увеличение тока базы не вызывает роста тока коллектора, так как этот ток ограничивается сопротивлением

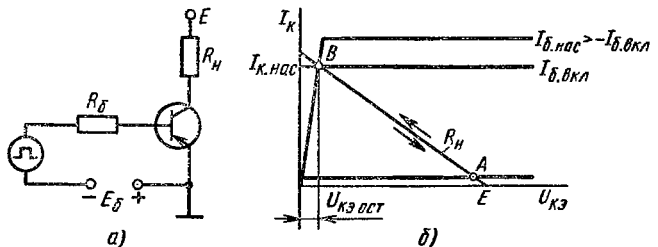


Рис. 2.8

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?

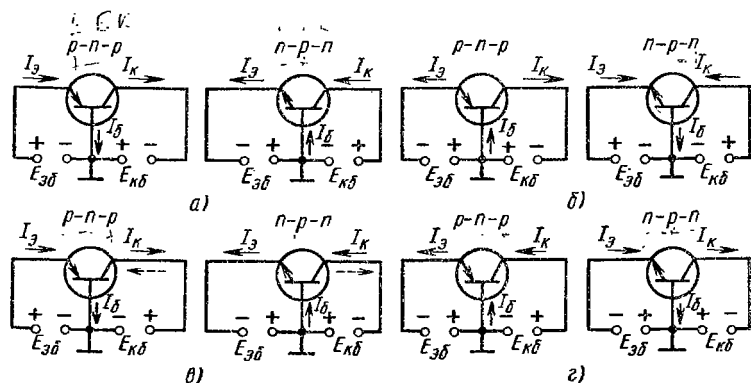


Рис. 2.9