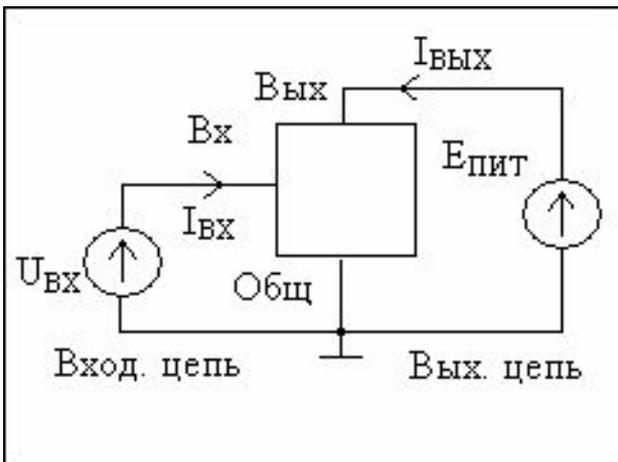


Глава 3. 3.1. ТРАНЗИСТОРЫ



Транзисторы – это полупроводниковые приборы с тремя выводами. Они предназначены для усиления, генерации и коммутации электрических сигналов.

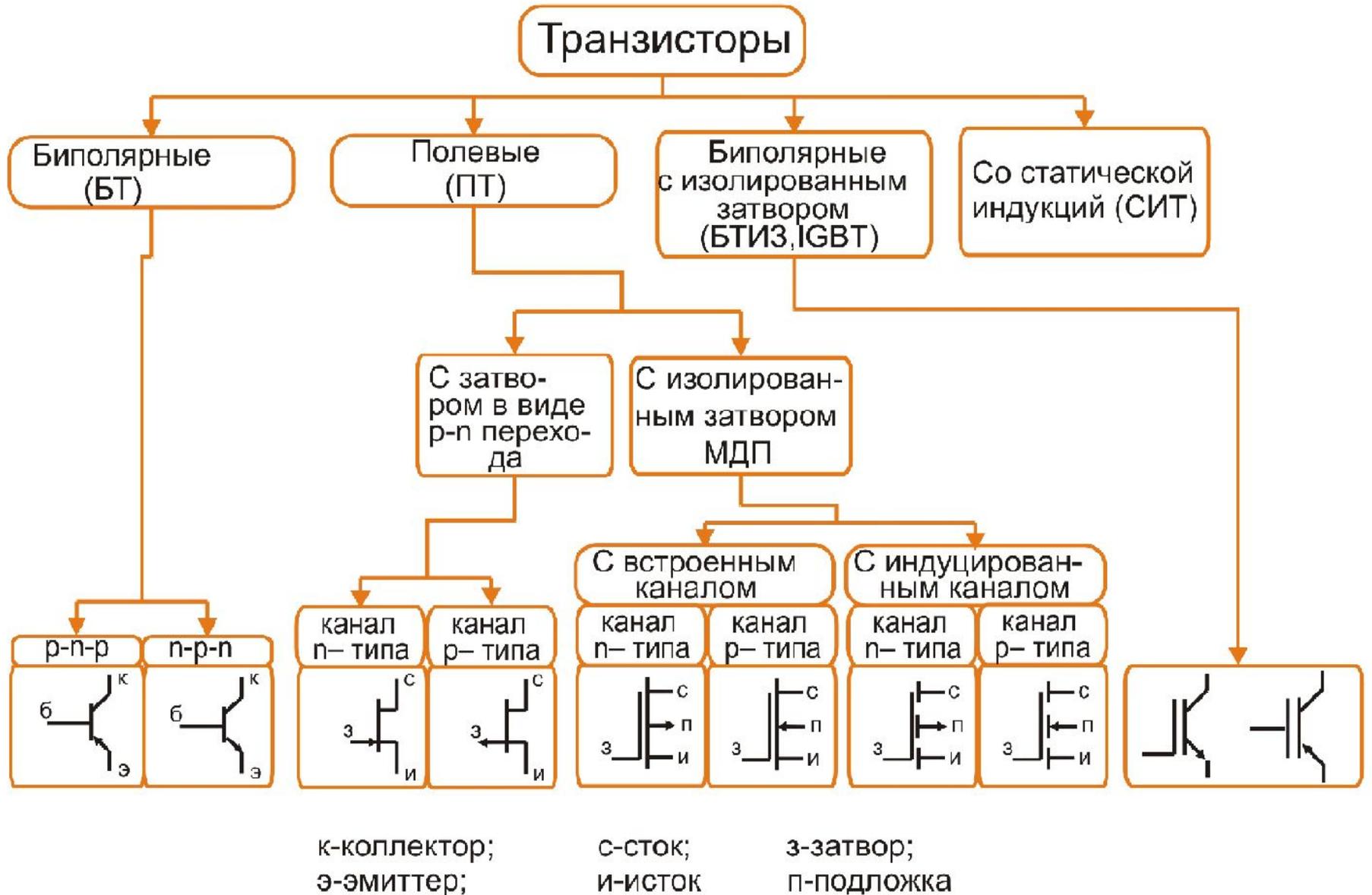
Транзистор представляет собой трехполюсный прибор - частным случаем четырехполюсника. Транзисторы имеют три вывода: входной - для подачи управляющего сигнала, выходной - выходной сигнал и общий.

Выходным сигналом транзистора является выходной ток. В зависимости от способа управления им транзисторы делятся на две группы:

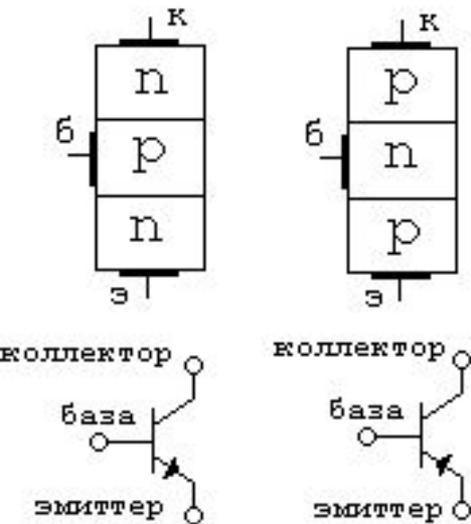
1. **Токовые:** $I_{\text{вых}} = kI_{\text{вх}}$. В них выходной ток пропорционален входному току. В создании выходного тока в таких транзисторах принимают участие два вида носителей заряда – электроны и дырки, а потому, их часто называют биполярными.

2. **Полевые:** $I_{\text{вых}} = S U_{\text{вх}}$. В них выходной ток пропорционален входному напряжению. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ создаёт в объёме транзистора электрическое поле, управляющее выходным током. В этих транзисторах в создании выходного тока $I_{\text{вых}}$ принимает участие один вид носителей заряда – электроны или дырки, а потому их иногда называют униполярными транзисторами.

Классификация транзисторов



3.1.1. Общие сведения о биполярных транзисторах



Биполярные транзисторы - это объем полупроводника с тремя чередующимися р и п областями и с двумя близко расположенными, а потому взаимодействующими р-п-переходами. В зависимости от чередования р и п –областей, различают два типа биполярных транзисторов: *р-п-р* и *п-р-п-типа*.

Структуры и условные обозначения данных типов транзисторов показаны на рис. 2.1. (Области эмиттера - Э, база -Б и коллектора-К, омический контакт - показан жирной чертой). Между эмиттером и базой возникает эмиттерный переход (ЭП), а между коллектором и базой – коллекторный переход (КП).

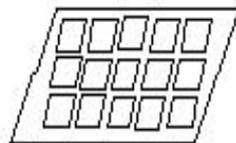
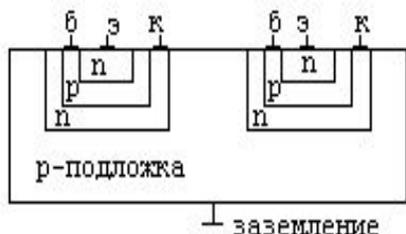
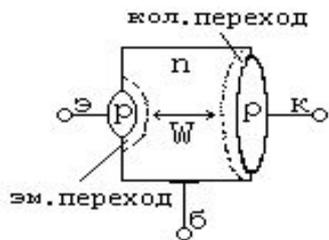
В зависимости от технологии изготовления биполярные транзисторы бывают: сплавные, эпитаксиально-диффузионные, планарные, мезатранзисторы и т. д.

В зависимости от распределения примесей в базе транзисторы бывают: диффузионные, при равномерном распределении примесей и дрейфовые при неравномерном распределении примесей.

Конструкция транзистора при сплавном и планарном методе изготовления показаны на рис.2.

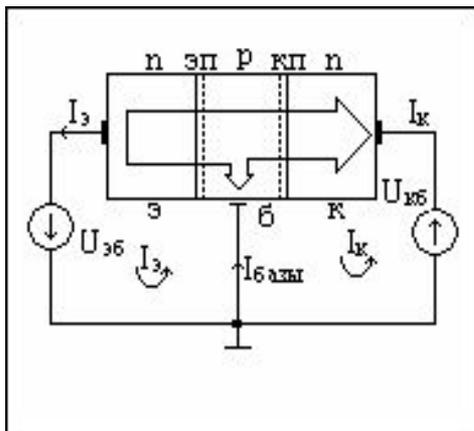
Для того чтобы конструкция работала, как транзистор, необходимо:

1. во первых - ширина базы W должна быть значительно меньше диффузионной длины L , т.е. $W \ll L$, толщина базы составляет (0.1-100 мкм);
2. во вторых - $S_{Э} \ll S_{К}$, где $S_{Э}$ – площадь эмиттерного перехода; $S_{К}$ – площадь коллекторного перехода.



Особенностью планарной технологии является то, что транзистор изготавливается путем многократной диффузии примесей только только на одну из сторон подложки. Кроме того, если на одной подложке сразу изготовить большое число транзисторов то они оказываются практически электрически изолированными друг от друга за счет двух обратно смещенных р-п переходов образованных между областями коллектора и подложкой. Это положено в основу изготовления интегральных схем

3.2. Принцип работы биполярного транзистора в активном режиме и соотношения для его токов



Физическая модель биполярного транзистора и схема его включения в активном режиме показана на рис.

Эмиттер – область сильно легирована. Она является инжектором носителей заряда в базу.

База – содержит малую концентрацию примесей ее толщина много меньше диффузионной длины $w \ll L$ (толщина базы $w = 1-10 \mu\text{м}$).

Коллектор – это область сильно легирована и предназначена для поглощения носителей заряда инжектируемых эмиттером.

При работе в активном (усилительном) режиме ЭП смещён в прямом направлении, а КП - в обратном. ЭП и КП располагаются в области базы. поскольку база слабо легирована по сравнению с соседними областями

Основные свойства транзистора определяются процессами, происходящими в базе. Принцип работы состоит в следующем.

При смещении ЭП в прямом направлении происходит ввод (инжекция) основных носителей заряда в базу, где они становятся неосновными – этот процесс называется - *инжекция*. За счет диффузии или сил электрического поля введенные неосновных носителей заряда движутся от границы ЭП к границе запертого КП.

Достигнув границы запертого КП неосновные носители заряда попадают в сильное ускоряющее поле и переносятся им в область коллектора, где они снова становятся основными носителями – это *экстракция*.

Для компенсации зарядов накапливающихся в области коллектора, от источника питания поступают заряды противоположного знака, они и создают управляемую составляющую тока коллектора αI_k в коллекторной цепи транзистора.

Кроме того через коллекторный переход протекает обратный, неуправляемый ток, создаваемый собственными неосновными носителями заряда КП – это собственный тепловой ток I_{k0} коллекторного перехода.

Часть неосновных носителей заряда не достигает КП, рекомбинируют с основными



$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{к}0}$$

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}} + I_{\text{к}0}^*$$

$$\beta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}$$

$\alpha = I_k / I_{\text{э}}$ - коэффициент передачи тока эмиттера, (α от 0,9 до 0,999)

$\beta = I_k / I_{\text{б}}$ - коэффициент передачи тока базы, (9 – 999).

3.3. Распределение концентрации носителей в базе. Влияние напряжений

В результате инжекции из эмиттера концентрация неосновных носителей в базе возрастает. Неравновесная концентрация электронов в начале базы (у эмиттерного перехода) и в конце базы (у коллекторного перехода) определяется выражениями:

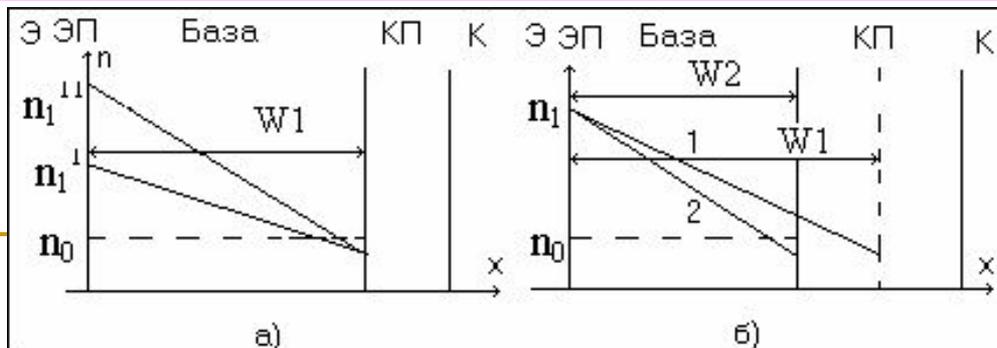
$$n_1 = n_0 \exp(U_{эб}/\phi_T), \quad n_2 = n_0 \exp(U_{кб}/\phi_T).$$

В активном режиме $U_{эб} > 0$, $U_{кб} < 0$, поэтому концентрация в начале базы $n_1 > n_0$, а в конце базы $n_2 < n_0$. Поскольку плотность тока диффузии в любом сечении базы одинакова, из (2.13) следует, что градиент концентрации в базе величина постоянная:

$$(dn/dx) = \text{const.}$$

Это значит, что распределение концентрации электронов в базе линейно (линия 1 на рис. 4.5а). Увеличение прямого напряжения $U_{эб}$ приводит к росту градиента концентрации (линия 2 на рис. 4.5а). При этом растет диффузионный ток эмиттера в соответствии с (2.13), а вместе с ним растут его составляющие: ток коллектора и ток базы.

Рассмотрим влияние напряжения на коллекторном переходе. С ростом напряжения $U_{кб}$ напряжение на коллекторном переходе становится более отрицательным (запирающим). При этом толщина коллекторного перехода увеличивается (см. параграф 2.5). Расширение коллекторного перехода приводит к уменьшению толщины базы и росту градиента концентрации (линия 2 на рис. 4.5б). Это явление называется *модуляцией толщины базы* или *эффектом Эрли*. Увеличение градиента концентрации вызывает рост тока эмиттера, т.е. проявляется влияние внутренней обратной связи. Следует заметить, что увеличение напряжения $U_{кб}$ и, соответственно, $U_{кэ}$ незначительно увеличивает ток эмиттера и ток коллектора, т.е. внутренняя обратная связь слабая.



3.4 Режимы работы биполярного транзистора

В зависимости от сочетания знаков и значений напряжений на p-n-переходах различают следующие области (режимы) работы транзистора:

активный режим — ЭП смещен в прямом а КП в обратном направлении.

В таком режиме - $I_{вых} = KI_{BX} + I_{K0}$, K – коэффициент передачи тока. Такой режим используется при работе транзистора в усилителях или генераторах;

режим отсечки — оба перехода смещены в обратном направлении $I_{BX} = 0$. Через транзистор протекает малый тепловой ток коллекторного перехода: $I_{вых} = I_{K0} \approx 0$. Такой режим используется в электронных ключах на транзисторах и соответствует разомкнутому состоянию ключа (транзистор заперт);

режим насыщения – оба перехода смещены в прямом направлении (транзистор открыт). Через транзистор протекает максимальный ток, ограниченный сопротивлением коллекторной цепи – ток коллектора насыщения $I_{Kнас} = E_K / R_K$. Такой режим используется в электронных ключах на транзисторах и соответствует замкнутому состоянию ключа;

инверсный режим — ЭП смещен в обратном, а КП в прямом направлении. Входным током считают ток коллектора I_K , а выходным – ток эмиттера $I_э$. $I_э = \alpha_I I_K$, где α_I – коэффициент передачи транзистора в инверсном режиме. $\alpha_I \ll 1$, а потому в усилительных схемах такой режим не применяется. Инверсное включение применяют в схемах двунаправленных переключателей, использующих симметричные транзисторы, в которых обе крайние области имеют одинаковые свойства.

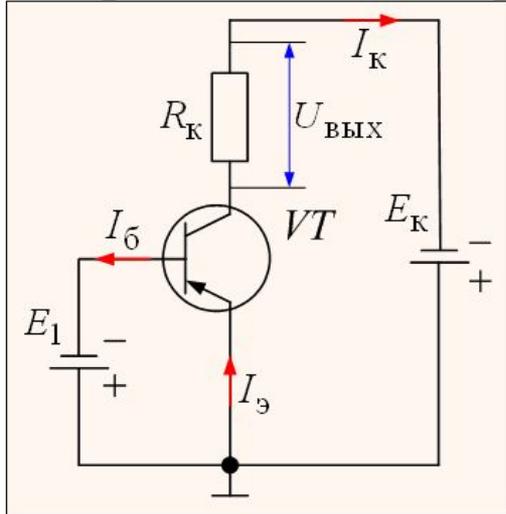


Рис. 3.22. Схема усилительного каскада

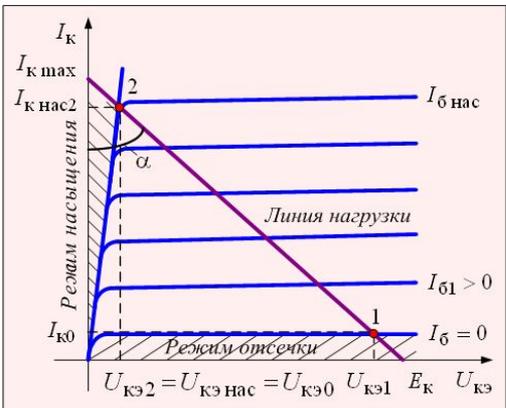


Рис. 3.23. Режимы работы биполярного транзистора

Определить режим работы транзистора

- В качестве примера рассмотрим n-p-n-транзистор (рис. 4.2), у которого напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ} = 0,6$ В, а напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ} = 0,4$ В.
- Так как $U_{бэ} = 0,6$ В положительно, то эмиттерный переход смещен в прямом направлении. Согласно второму закону Кирхгофа
- ,
- откуда напряжение между базой и коллектором
- Рис. 4.2. Схема, поясняющая работу n-p-n-транзистора в режиме насыщения
- Так как $U_{бк} = 0,2$ В положительно, то и коллекторный переход смещен в прямом направлении. Следовательно, транзистор работает в режиме насыщения.
- Режимы отсечки и насыщения используются при работе БТ в ключевых схемах, где реализуются два устойчивых состояния:
- «включено» (режим насыщения), «выключено» (режим отсечки).
- Активный режим – при работе БТ в усилителях и генераторах; инверсный активный режим – в схемах двунаправленных переключателей, построенных на основе симметричных n-p-n- и p-n-p-транзисторов, имеющих одинаковую степень легирования эмиттера и коллектора.

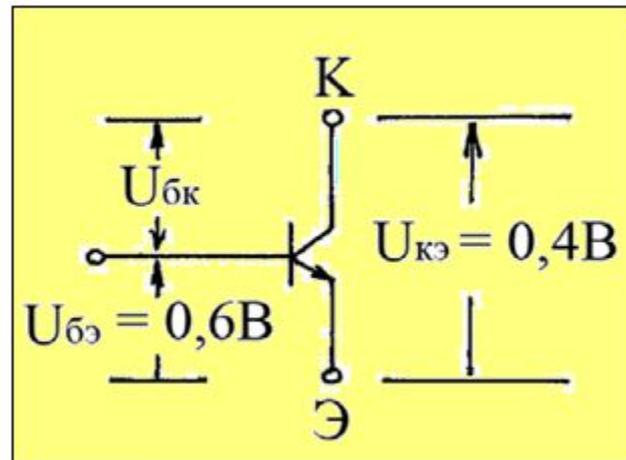


Рис. 4.2. Схема, поясняющая работу n-p-n-транзистора в режиме насыщения

$$U_{кэ} = U_{бэ} + U_{кб} = U_{бэ} - U_{бк}$$

$$U_{бк} = U_{бэ} - U_{кэ} = 0,6 - 0,4 = 0,2 \text{ В.}$$

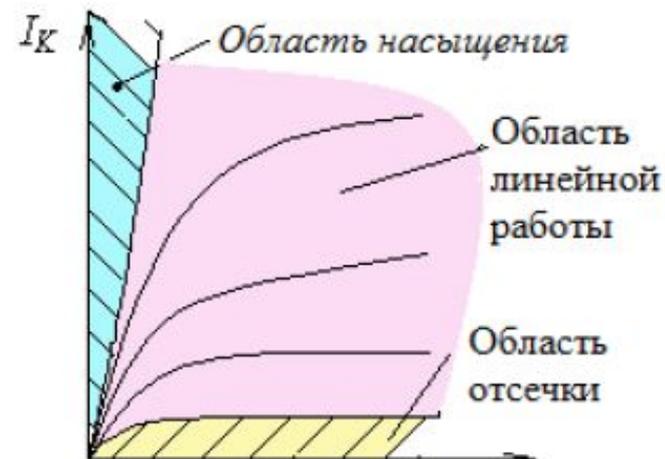


Рис 3.4

$U_{кэ}$

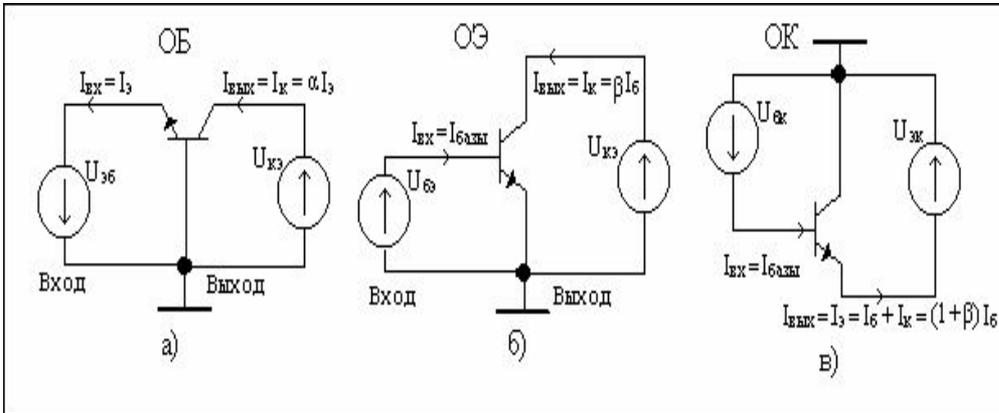
3.5 Схемы включения биполярного транзистора

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).

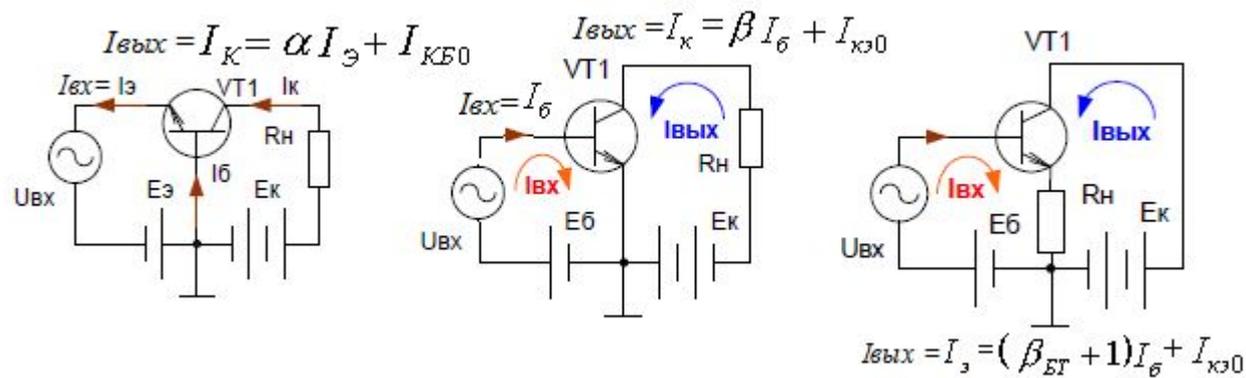
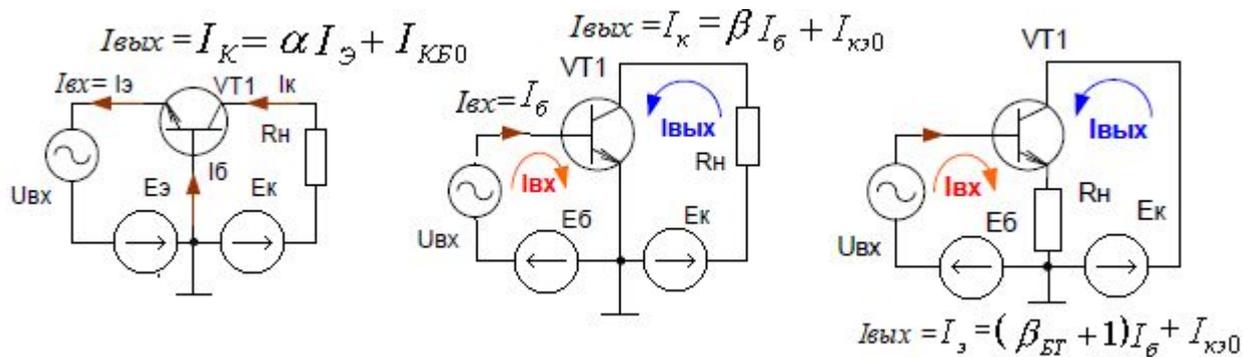
Наиболее часто применяется схема ОЭ, так как позволяет получить наибольший коэффициент усиления по мощности, высокие коэффициенты усиления по напряжению (с инвертированием фазы входного напряжения на 180°), по току и относительно высокое входное сопротивление.

Схему ОК называют эмиттерным повторителем, так как напряжение на эмиттере по полярности и величине 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 наименьшим входным сопротивлением и наибольшим выходным сопротивлением, поэтому часто используется как буферный усилитель для согласования низкого сопротивления нагрузки с высоким выходным сопротивлением каскада.

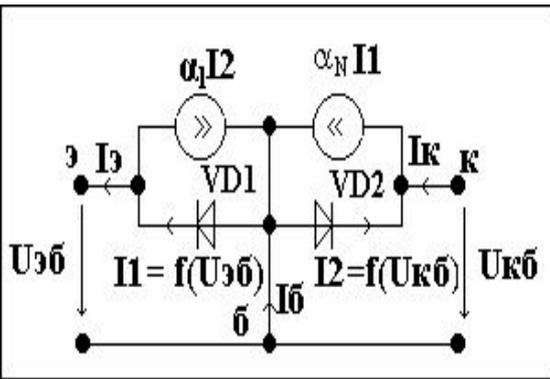
Схема ОБ обеспечивает усиление напряжения и мощности, но не усиливает ток (коэффициент усиления по току меньше единицы, но близок к ней). Подобно схеме ОЭ, она имеет высокое выходное сопротивление. В отличие от схемы ОЭ входное сопротивление этой схемы очень мало; последнее обстоятельство делает ее непригодной для усиления больших напряжений. Обычно схема ОБ применяется для усиления напряжений на очень высоких частотах.



ПАРАМЕТР	ОБ	ОЭ	ОК
Коэффициент передачи тока K_I	< 1	10...100	10...100
Коэффициент передачи напряжения K_U	10...1000	10...1000	< 1
Коэффициент усиления по мощности K_P	10...1000	$10^3 \dots 10^4$	10...100
Входное сопротивление $R_{ВХ}$	10...100 Ом	> 100 Ом	$> 10^4$ Ом
Выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$	> 100 кОм	> 10 кОм	0...100 Ом



3.6 Математическая модель транзистора



Она устанавливает аналитические зависимости между токами и напряжениями на выходах транзисторов. Для определения аналитических зависимостей между токами и напряжениями транзистор представляют эквивалентной схемой Эберса — Молла (рис. 2.3). Она состоит из двух идеальных р-п-переходов, включенных навстречу друг другу и отвечающих за ЭП и КП и двух зависимых источников тока, учитывающих передачу входного тока в выходную цепь. Объемные сопротивления слоев, емкости р-п-переходов и эффект модуляции ширины базы здесь не учитываются.

Токи эмиттера и коллектора, как следует из схемы, состоят из двух слагаемых:

$$i_э = I_э - \alpha_1 I_2, \quad (1) \quad i_э = I_{э0} \left(e^{\frac{U_э}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_1 I_{к0} \left(e^{\frac{U_к}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

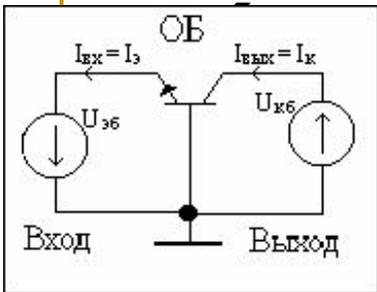
$$i_к = \alpha_N I_1 - I_2, \quad (2) \quad i_к = \alpha_N I_{э0} \left(e^{\frac{U_э}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_{к0} \left(e^{\frac{U_к}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

где $I_{э0}$, $I_{к0}$ — тепловые токи эмиттерного и коллекторного переходов; α_N — коэффициент передачи тока эмиттера в активном режиме; α_1 — коэффициент передачи тока коллектора при инверсном включении; $U_эБ$ и $U_КБ$ — напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах соответственно; $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал; I_1 , I_2 — токи через соответствующие р-п-переходы; $\alpha_N I_э$ — зависимый источник тока, который учитывает ток через коллекторный переход, который связан с током эмиттера $I_э$; $\alpha_1 I_к$ — зависимый источник тока, который учитывает ток через эмиттерный переход, который связан с током эмиттера $I_к$, при работе транзистора в инверсном режиме.

При нормальном включении биполярного транзистора, когда выходным током является $I_к$, можно записать, $I_к = \alpha_N I_э + I_{к0}$. При инверсном включении биполярного транзистора, когда выходным током является $-I_э = \alpha_1 I_к + I_{э0}$.

3.7 Вольтамперные характеристики

Х) биполярного транзистора



Для БТ, как четырехполюсника возможно 4 ВАХ- зависимости токов от напряжений на выводах.

Аналитически ВАХ $i=f(u)$ задаются уравнениями (1), (2).

Для наглядности ВАХ представляют в виде графиков. Графики, необходимы для графического выбора режима работы транзистора и определения его параметров.

Свойства БТ биполярного транзистора обычно характеризуют двумя ВАХ:

- входные ВАХ – это зависимость входного тока I_1 от входного напряжения U_1 при постоянстве выходного напряжения U_2 , т.е. $I_1=f(U_1)|U_2=const$;
- выходные ВАХ – это зависимость выходного тока I_2 от выходного напряжения U_2 при постоянстве входного тока I_1 , т.е. $I_2=f(U_2)|I_1=const$.

Все ВАХ измеряют в предположении, что приложенные напряжения и токи во времени постоянны, а потому их называют статическими ВАХ – см. схему.

Рассмотрим ВАХ для n-p-n – транзистора, для двух схем включения - с ОБ и ОЭ.

ВАХ БТ в схеме с ОБ

Входные ВАХ транзистора, это $I_э=f(U_эб)|U_кб=const$.

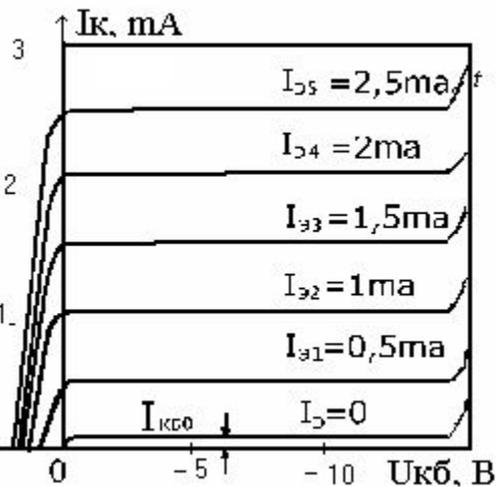
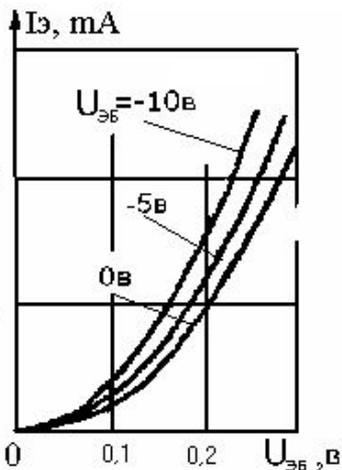
Ток эмиттера $I_э$ связан с движением основных носителей заряда через ЭП в прямом направлении.

При $U_кб = 0$ и $U_эб > 0$ ВАХ БТ совпадает с ВАХ p-n – перехода смещенного впрямом направлении.

При подаче запирающего напряжения на коллектор ($U_кб > 0$), входные характеристики,

незначительно смещаются влево, это обусловлено эффектом Эрли. Он состоит в модуляции ширины базы напряжением $U_кб$. При $U_кб$ состоит в том, что толщина базы w уменьшается, что ведет к росту тока эмиттера-

При $U_эб < 0$, $I_б=I_к0$. Этот ток мал и на ВАХ его не показывают.



Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с ОБ – это зависимость $I_k = f(U_{кб}) | I_э = \text{const}$. Ток коллектора связан с движением неосновных носителями заряда. При смещении КП в обратном направлении:

Если, $U_{кб} = 0$, $I_k = 0$, что соответствует обычной характеристики p-n-перехода, включенного в обратном направлении и соответствует режиму отсечки в работе транзистора.

2. При $U_{кб} > 0$, - это **линейный** (активный) режим работы транзистора.

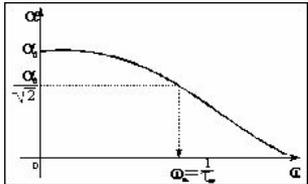
3. При $U_{кб} > U_{кб \text{ max}}$ наблюдается резкое возрастание коллекторного тока т.е.-пробой транзистора. Возможно два вида пробоя: лавинный – за счет ударной ионизация носителей заряда, и прокол базы – за счет смыкания коллекторного и эмиттерного переходов.

4. При коллекторный переход смещён в прямом направлении, а ток обусловленный неосновными носителями заряда стремиться к нулю.

При работе транзистора в активном режиме выходной ток определяется из соотношения $I_k = \alpha I_э + I_{к0}$, где $I_{к0}$ - тепловой ток коллекторного перехода транзистора с ОБ. Однако это выражение не учитывает наклона выходных ВАХ связанного с модуляцией толщины базы. Для учета этого эффекта, которое наиболее сильно проявляется при работе транзистора в активном режиме, в выражение вводят дополнительное слагаемое

$$I_k = \alpha I_э + I_{к0} + U_{кб} / r_k \text{ диф,}$$

где $r_k \text{ диф} = \Delta U_{кб} / \Delta I_k | I_э = \text{const}$ – дифференциальное сопротивление запертого коллекторного перехода в схеме с ОБ.



Усилительным параметром транзистора, включенного по схеме с общей базой, является α

- коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}; \alpha = 0.9 \div 0.999$$

Различают три вида параметров α

1. Статический - где α абсолютные значения I_K, I_E

2. Дифференциальный - $\alpha_{ДИФ} = \alpha_0 = \Delta I_E / \Delta I_K | U_{КБ} = \text{const}$. Практически в активном режиме при не слишком больших уровнях инжекции величина α мало меняется с изменением эмиттерного тока, и без большой погрешности можно полагать $\alpha_{ДИФ} = \alpha$. Поэтому в дальнейшем дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока также будем обозначать α .

3. Комплексный (динамический) - где $\alpha_{дин}$ комплексные амплитуды I_K, I_E

Комплексный коэффициент передачи, зависит от частоты $\alpha_{дин} = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega\tau_\alpha}$

где $\tau_\alpha = \frac{W^2}{2D}$ - постоянная времени транзистора;

D - коэффициент диффузии.

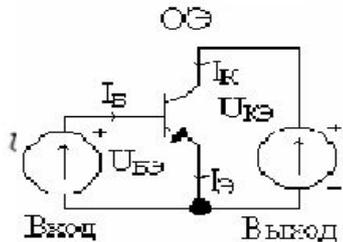
Амплитудно и фазо- частотные характеристики $\alpha(j\omega)$

имеют вид, $|\alpha(j\omega)| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_\alpha)^2}}$

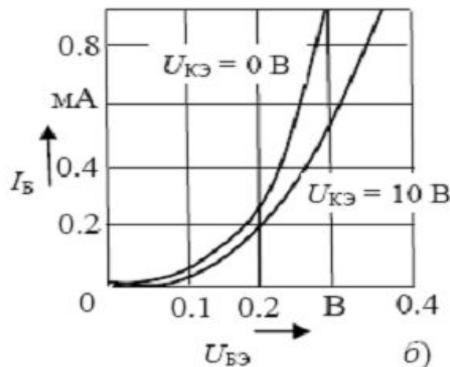
Выводы: с ростом частоты -

1. передаточные свойства биполярного транзистора ухудшаются;
2. появляется фазовый сдвиг (задержка) между выходным и входным сигналами.

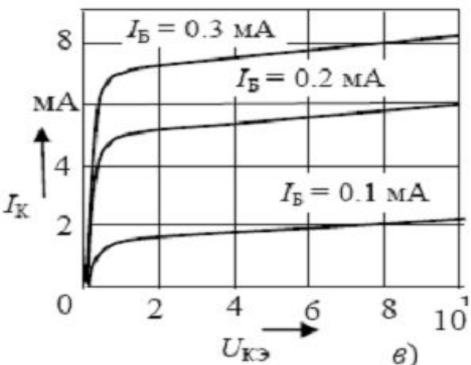
Вольтамперные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



а)



б)



в)

$$I_{Б} = f(U_{БЭ}) | U_{КЭ} = Const$$

Если $U_{БЭ} > 0$, переход база-эмиттер смещен в прямом направлении. Ток через переход связан с движением основных носителей заряда

1. При $U_{КЭ} = 0$, входная ВАХ транзистор совпадает с ВАХ p-n перехода смещённого в прямом направлении.
2. При $U_{КЭ} > 0$, ВАХ смещается вправо, это связано с тем, что через переход база-эмиттер протекает ток коллектора, создающий на нём напряжение.

Если $U_{БЭ} < 0$, то $I_{Б0} = -I^*_{к0}$. $I^*_{к0} \gg I_{к0}$ поэтому его показывают на ВАХ. Ток связан с движением неосновных носителей заряда.

Выходная ВАХ: $I_{К} = f(U_{КЭ}) | I_{Б} = const$. Выходной ток $I_{К}$ связан с движением неосновных носителей заряда.

Выходные характеристики транзистора включенного по схеме с ОЭ имеют ряд отличий по сравнению с транзистором, включенным по схеме с ОБ.

1. За счёт $U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ}$ ВАХ с ОЭ смещаются вправо.
2. Наклон рассматриваемых характеристик значительно больше чем прежде. Это связано с тем, что $U_{БЭ}$ зависит от тока $I_{К}$ протекающего через эмиттерный переход.
3. При $U_{КЭ} > U_{КЭmax}$, происходит пробой коллекторного перехода, причём, $U_{КЭmax}(ОЭ) < U_{КБmax}(ОБ)$.
4. При $I_{Б} = 0$, $I_{КЭ} = I^*_{к0} \gg I_{к0}$

Установим взаимосвязь между $I_{Б}$ и $I_{К}$. $\alpha = 0.9$ $\beta = 9$ $\alpha = 0.999$ $\beta = 999$

Учитывая, что: $I_{К} = \alpha I_{Э} + I_{к0} + U_{КБ} / r_{к\text{диф}}$ $\kappa = \alpha(I_{К} + I_{Б}) + I_{к0} + U_{КБ} / r_{к\text{диф}}$

Разрешим последнее относительно $I_{К}$. Получим $I_{К} = \alpha I_{Б} / (1 - \alpha) + I_{к0} / (1 - \alpha) + U_{КБ} / r_{к\text{диф}} (1 - \alpha)$ или

$$I_{К} = \beta I_{Б} + I^*_{к0} + U_{КБ} / r^*_{к\text{диф}}$$

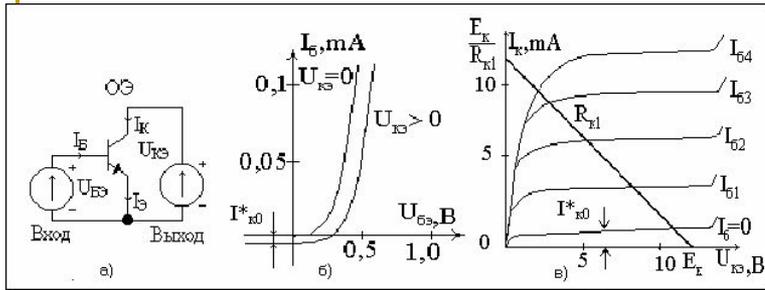
Где $\beta = I_{К} / I_{Б} = \alpha / (1 - \alpha)$ - коэффициент передачи тока базы, если $\alpha = 0.9$, то $\beta = 9$; если $\alpha = 0.999$, то $\beta = 999$,

$I^*_{к0} = I_{к0} / (1 - \alpha)$ - обратный ток колекторного перехода в схеме с ОЭ. $I^*_{к0} > I_{к0}$ - это связано с усилением

транзистором своего теплового тока - тока базы;

$r^*_{к\text{диф}} = r_{к\text{диф}} / (1 - \alpha)$ - дифференциальное сопротивление запертого коллекторного перехода в схеме с ОЭ.

$r^*_{к\text{диф}} < r_{к\text{диф}}$ этим и объясняется заметный наклон выходных ВАХ.



Усилительные свойства транзистора, включённого с ОЭ,

характеризуются параметром β - коэффициент передачи тока базы.

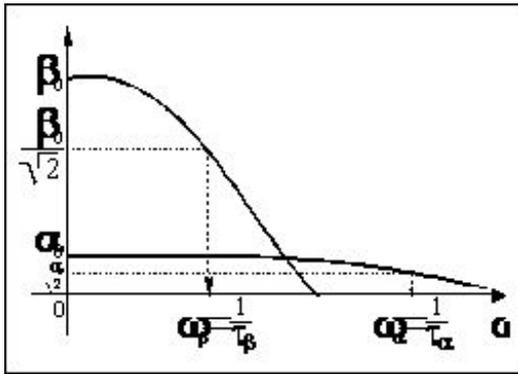
Различают три коэффициента передачи тока базы:

Статический коэффициент передачи $\beta = I_K / I_B | U_{КЭ} = \text{const}$.

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы:

$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B | U_{КЭ} = \text{const}$

Динамический коэффициент передачи $\beta(j\omega) = \frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha(j\omega)}{1 - \alpha(j\omega)}$



$$\frac{\alpha_0}{1 + j\omega\tau_\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0 + 1 + j\omega\tau_\alpha} = \frac{1 - \alpha_0}{1 + j\omega\tau_\alpha} = \frac{\beta}{1 + j\omega\tau_\beta}; \quad (\tau_\beta > \tau_\alpha)$$

τ_β - постоянная времени транзистора включенного по схеме с ОЭ.

Амплитудно и фазо-частотные характеристики $\beta(j\omega)$ имеют вид

$$\beta(\omega) = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_\beta)^2}} \quad \phi_\beta(\omega) = \text{arctg}(-\omega\tau_\beta).$$

$\omega_\beta = (\tau_\beta)^{-1}$ - граничная частота транзистора включенного по схеме с ОЭ,

$\omega_\beta < \omega_\alpha$, $\omega_\beta = (1 - \alpha) \omega_\alpha$

Схемы замещения и параметры транзистора

Физические эквивалентные схемы транзистора и их параметры

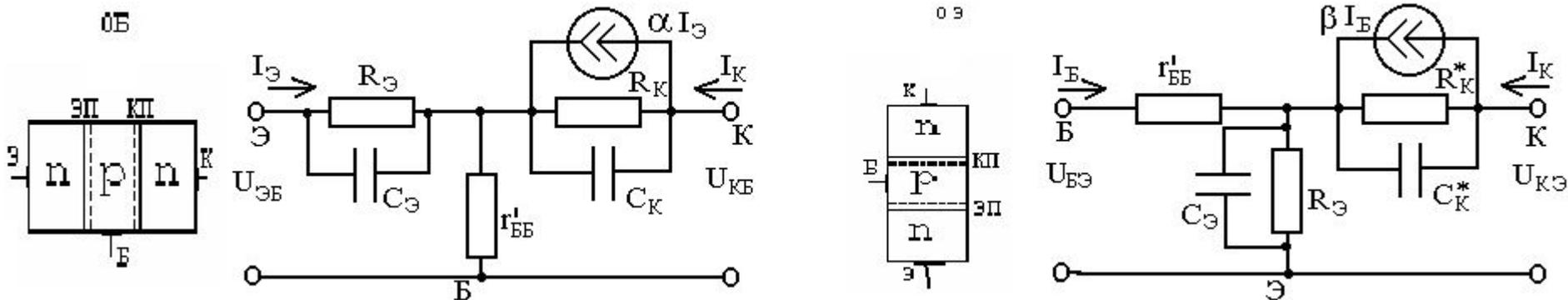
Для аналитического расчета цепей с транзисторами широко используют физические схемы замещения. При малых сигналах, воздействующих на транзистор, его можно считать линейным элементом и пользоваться линейными схемами замещения. Получили распространение физические и формализованные модели транзистора.

Физические схемы замещения транзистора составляются по физическим моделям транзистора, при этом областям транзистора, в соответствии с процессами в них происходящими, ставят элементы электрических схем.

На рис. 2.6, а, б показаны Т-образные схемы замещения для переменных токов и напряжений для схем с ОБ и ОЭ соответственно.

Элементы этих схем означают следующее:

- r_B – объемное сопротивление области базы; объемными сопротивлениями областей эмиттера и коллектора пренебрегаем, т.к. их сопротивления малы;
- $R_{э} = dU_{эб}/dI_{э} | U_{кэ} = \text{const}$ – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода. Оно зависит от постоянной составляющей тока эмиттерного тока $R_{э} \approx \rho_T / I_{э} = 0,026 / I_{э}$;
- .(1.10) Числовое значение лежит в пределах от единиц до десятков Ом;
- $R_{к} = \Delta U_{кб} / \Delta I_{к} | I_{э} = \text{const}$ – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода транзистора с ОБ, учитывает зависимость коллекторного тока от напряжения. Значения лежат в пределах 0,5-1 Мом;
- $R_{к}^*$ – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода транзистора с ОЭ;
- и — это емкости эмиттерного и коллекторного переходов транзистора с ОБ. В схеме ОЭ: ;
- $\alpha I_{э}$ – зависимый источник тока, учитывает передачу эмиттерного тока через базу в область коллектора;
- $\beta I_{б}$ – зависимый источник тока, учитывает управление тока коллектора током базы.





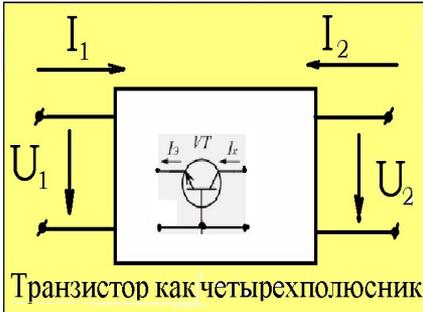
В Т-образной схеме замещения транзистора ОЭ (рис. 2.6,6) сопротивления $g_э$ и $g_к$, имеют тот же физический смысл и тот же порядок величин, что и в схеме ОБ. Поскольку входной ток в схеме ОЭ — ток базы, в выходную цепь введен источник тока $\beta I_б$, где $\beta = \Delta I_к / \Delta I_б | U_{кэ} = \text{const}$ - дифференциальный коэффициент передачи тока базы в схеме ОЭ

Сопротивление $g^*_к = g_к / (1 + \beta)$, 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 $C^*_к = (1 + \beta) C_к$. Увеличение емкости $C^*_к$ приводит к еще большему ее влиянию на высоких частотах, чем влияние емкости $C_э$. В связи с этим емкость $C_э$ в схеме ОЭ можно не учитывать.

Поскольку на высоких частотах емкость $C^*_к$ шунтирует большое сопротивление $g_к$, она сильно влияет на работу транзистора, а емкость $C_э$ шунтирует малое сопротивление $g_э$ и ее влияние незначительно. Емкость $C_к$ учитывают при частотах, составляющих десятки килогерц, а емкость $C_э$ — 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.

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. Но т.к. числовое значение коэффициента обратной связи мало ($\sim 10^{-3}$ - $\sim 10^{-4}$), то обычно этот источник в схему замещения не вводят.

Формальные схемы замещения транзистора и их параметры



Они основаны на представлении транзистора в виде четырехполюсника, который может быть охарактеризован одной из шести систем уравнений, связывающих между собой входные и выходные токи и напряжения. Чаще всего используются следующие три системы уравнений в которых Y, Z, H являются параметрами.

Наиболее широко используется система H - параметров т.к. они наиболее удобны для измерений. Система уравнений, устанавливающая связь токов и напряжений с H -параметрами, имеет вид:

$$U_1 = H_{11}I_1 + H_{12}U_2; I_1 = H_{21}I_1 + H_{22}U_2;$$

$$H_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2 = 0}$$

- входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе для переменной составляющей тока;

$$H_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1 = 0}$$

- коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе на входе для переменной составляющей тока;

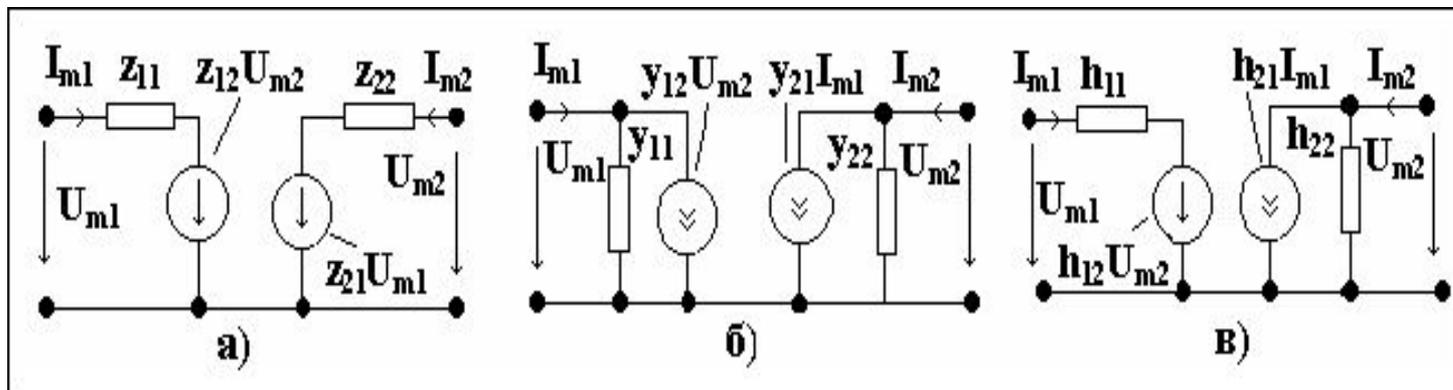
$$H_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2 = 0}$$

- коэффициент передачи по току при коротком замыкании на выходе;

$$H_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1 = 0}$$

- выходная проводимость транзистора при холостом ходе на входе для переменной составляющей тока.

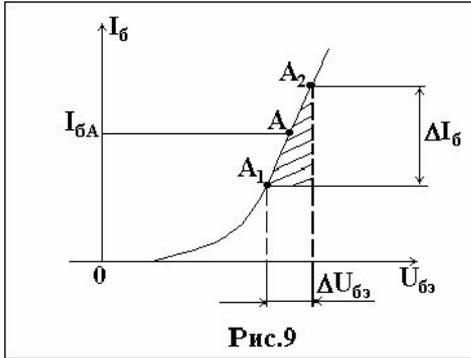
Поскольку h -параметры измеряются наиболее просто, то они наиболее часто, приводятся в технических условиях и справочниках по транзисторам. Значения h -параметров зависят от схемы включения транзистора, поэтому в обозначении параметров вводится третий индекс («Б», «Э», «К»). Формальные схемы замещения составляют по основным уравнениям четырехполюсника. Схемы замещения транзистора для систем Z , Y и H -параметров показаны на рис. .



Покажем связь между h -параметрами формальной схемы замещения (рис.) транзистора для схем с ОБ и ОЭ с параметрами физических схем замещения (рис. и рис.).

$$\begin{aligned}
 h_{11б} &= r_{э \text{ диф}} + r_{б}(1 - \alpha) ; h_{11э} = r_{б} + r_{э \text{ диф}}(\beta + 1); \\
 h_{21б} &= \alpha r_{к \text{ диф}} / (r_{к \text{ диф}} + r_{б}) = \alpha ; h_{21э} = \beta r_{к \text{ диф}} / (r_{к \text{ диф}} + r_{э \text{ диф}}) = \beta; \\
 h_{12б} &= r_{б} / (r_{к \text{ диф}} + r_{б}) = r_{б} / r_{к \text{ диф}} ; h_{12э} = (\beta + 1) r_{к \text{ диф}} / r_{э \text{ диф}} ; \\
 h_{22б} &= 1 / (r_{к \text{ диф}} + r_{б}) = 1 / r_{к \text{ диф}} ; h_{22э} = (\beta + 1) / r_{к \text{ диф}} = 1 / r_{к \text{ диф}}.
 \end{aligned}$$

Методика графического определения h – параметров транзистора



Располагая вольт-амперными характеристиками транзистора, можно графическим путем определить низкочастотные значения h -параметров. Для определения h -параметры необходимо задать рабочую точку, например А ($I_{BА}$, $U_{кэА}$), в которой требуется найти параметры.

Параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$ находят по входной характеристике $U_{бэ} = f(I_B) | U_{кэ} = \text{const}$.

Определим $h_{11э}$ для заданной рабочей точки А ($I_{BА}$, $U_{кэА}$). На входной характеристике находим точку А, соответствующую заданной рабочей точке (рис.9).

Выбираем вблизи рабочей точки А две вспомогательные точки А1 и А2 (приблизительно на одинаковом расстоянии), определим по ним $\Delta U_{бэ}$ и ΔI_B и рассчитаем входное дифференциальное сопротивление, по формуле: $h_{11э} = (\Delta U_{бэ} / \Delta I_B) | U_{кэ} = \text{const}$.

Приращения $\Delta U_{бэ}$ и ΔI_B выбираю так, чтобы не выходить за пределы линейного участка, их можно примерно принять за (10-20)% от значений рабочей точки.

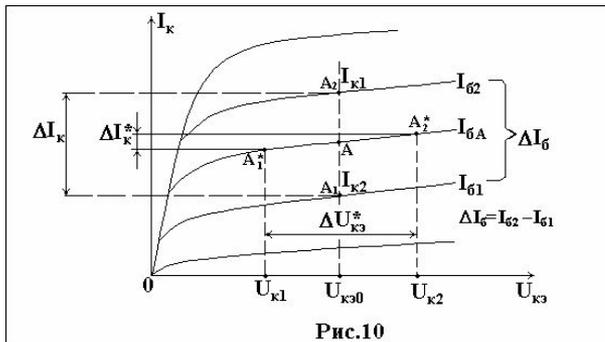
Графическое определение параметра $h_{12э} = \Delta U_{бэ} / \Delta U_{кэ}$ затруднено, так как семейство входных характеристик при различных $\Delta U_{кэ} > 0$ практически сливается в одну (рис.7,а).

Параметры $h_{22э}$ и $h_{21э}$ определяются из семейства выходных характеристик транзистора $I_{к} = f(U_{кэ})$ (рис.10).

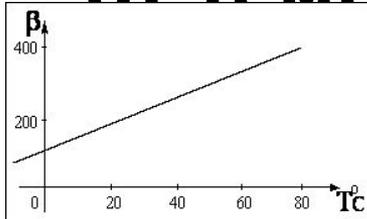
Параметр $h_{21э} = (\Delta I_{к} / \Delta I_B) | U_{кэ} = \text{const}$ находится в заданной рабочей точки А ($I_{BА}$, $U_{кэА}$). Приращение тока базы ΔI_B следует брать вблизи выбранного значения тока базы $I_{BА} | U_{кэ} = U_{кэА}$, как $\Delta I_B = I_{B2} - I_{B1}$. Этому приращению ΔI_B соответствует приращение коллекторного тока $\Delta I_{к} = I_{к2} - I_{к1}$. Тогда дифференциальный коэффициент передачи тока базы рассчитаем по формуле $h_{21э} = (\Delta I_{к} / \Delta I_B) | U_{кэ} = \text{const}$.

Параметр $h_{22э} = (\Delta I_{к} / \Delta U_{кэ}) | I_B = \text{const}$ определяется по наклону выходной характеристики (рис.10) в заданной рабочей точки А ($I_{BА}$, $U_{кэА}$), где $\Delta U_{кэ} | I_B = I_{BА} = U_{к2} - U_{к1}$ – приращение коллекторного напряжения, вызывающие приращение коллекторного тока $\Delta I_{к}$. При этом из семейства выходных характеристик следует выбирать ту характеристику, которая снята при выбранном значении тока базы $I_B = I_{BА}$.

Если рабочая точка не совпадает ни с одной траекторией приведенной на графике, то такую траекторию надо провести самостоятельно, между и по аналогии с соседними, значения тока базы которых известно, и присвоить ей значение тока базы равно $I_{BА}$.



Зависимости характеристик и параметров транзистора от температуры и положения рабочей



Коэффициент транзистора сильно зависит от температуры, при которой находится р-п-переходы. Различают три основные причины нестабильности тока коллектора при изменении температуры. Прежде всего от температуры существенно зависит обратный ток коллекторного перехода I_{k0} .

Установлено, что ток I_{k0} удваивается при изменении температуры на каждые 10°C для германиевых и на каждые 7°C для кремниевых транзисторов. Кроме того, напряжение база — эмиттер $U_{бэ}$ с ростом температуры уменьшается.

Ориентировочно значение этого уменьшения $\Delta U_{бэ}/\Delta T = -2,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

Наконец, коэффициент передачи ток β с увеличением температуры переходов увеличивается. Наиболее вредное влияние на работу транзистора при изменении температуры оказывает увеличение тока I_{k0} . За счет этого фактора в наихудшем случае ток коллектора может возрасти настолько, что произойдет тепловой пробой коллекторного перехода транзистора.

1) *Температурная зависимость:*

С повышением температуры, ВАХ транзистора смещается вверх, это связано с тем, что в состав коллекторного тока входит тепловой ток коллекторного перехода, который существенно зависит от температуры. При включении транзистора по схеме с общим эмиттером

$$I_K \sim I_{K_0}^* = \frac{I_{K_0}}{1 - \alpha_0}$$

эта зависимость значительно сильнее, чем при включении по схеме с общей базой.

Рассмотрим зависимость $\beta(T)$ β возрастает, так как с увеличением температуры, увеличивается коэффициент

диффузии, то есть скорость переноса зарядов в область базы. Напряжение возрастает, следовательно, время нахождения в области базы меньше, а значит, возможность рекомбинации уменьшается.

2) *Частотная зависимость* – с ростом частоты усилительные свойства транзистора ухудшаются (см. График *)

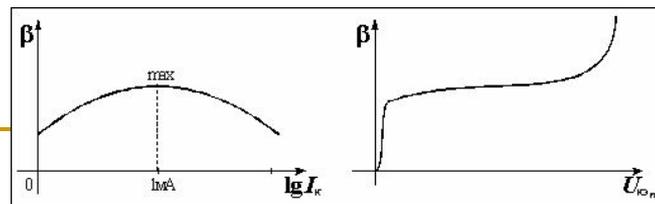
3) *Зависимость параметров транзистора от положения рабочей точки.* Рабочая точка транзистора – это совокупность постоянных напряжений и токов на выводах транзистора

$$PT(I_{K_{PT}}, I_{KЭ_{PT}})$$

Спад β при малых I_K связан с рекомбинацией в эмиттерном переходе. Спад β при больших I_K связан с уменьшением коэффициента инжекции при высоких плотностях эмиттерного тока.

При малых $U_{кэ}$ уменьшение β связано с эффектом Эрли, в результате которого происходит расширение толщины базы.

При больших $U_{кэ}$ β резко возрастает, это связано с пред пробойным состоянием транзистора.



Собственные шумы ЭЛЕКТРОННЫХ приборов.

Электронные приборы имеют свои собственные шумы. Это один из видов помех. Они искажают и маскируют сигнал, уменьшают чувствительность приборов (минимальный уровень сигнала, на который прибор еще реагирует). Полностью устранить шумы невозможно, но попытаться снизить необходимо. Существуют следующие виды шумов.

Тепловой шум. Тепловое хаотическое движение электронов существует в каждом проводнике. Это и есть те случайные флуктуации, которые создают тепловой шум. Средний квадрат ЭДС тепловых шумов равен (формула Найквиста): $\overline{e_o^2} = 4kTR \cdot \Delta F$

где R - величина шумящего сопротивления, ΔF - полоса частот, в которой измеряются шумы, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Чем больше сопротивление проводника (резистора) и его температура, тем больше уровень шумов. ЭДС шумов в полосе 1Гц называют удельным напряжением шумов:

$$\frac{E_o}{\sqrt{\Delta F}} = \sqrt{4kTR}$$

Дробовой шум. Он обусловлен дискретной природой материи, т.е. флуктуациями числа электронов, поступающих в рабочую среду прибора в единицу времени. Шумовой ток, вызванный дробовым эффектом:

$$I_o = \sqrt{2q \cdot I_0 \cdot \Delta F}$$

где q - заряд электрона, I_0 - среднее значение тока.

Шум токораспределения. Величина, показывающая соотношение между токами электродов, называется коэффициентом токораспределения. Коэффициент не остается постоянным, а колеблется возле средней величины, то есть меняется случайным образом.

Микрофонный эффект. Он обусловлен механическим дребезжанием электродов. Возникает, в основном, в ламповых приборах.

Способы оценки шумов.

Рассмотрим основные параметры, оценивающие уровень шумов.

Удельное напряжение шумов на входе. Эквивалентное напряжение шумов на входе $U_{ш.вх.экв.}$ - это такое напряжение шума, которое нужно было бы подать на вход эквивалентного, но не шумящего прибора, чтобы на выходе получить такое же напряжение шумов, какое есть на выходе реального шумящего прибора.

Удельное напряжение шумов на входе $U_{ш.вх.уд.}$ Эквивалентное напряжение шумов на входе, деленное на корень из полосы частот:

$$U_{ш.вх.уд} = U_{ш.вх.экв} / (\Delta F)^{1/2}$$

Шумовое сопротивление (эквивалентное шумовое сопротивление). Чаще всего применяется для оценки уровня шума антенн:

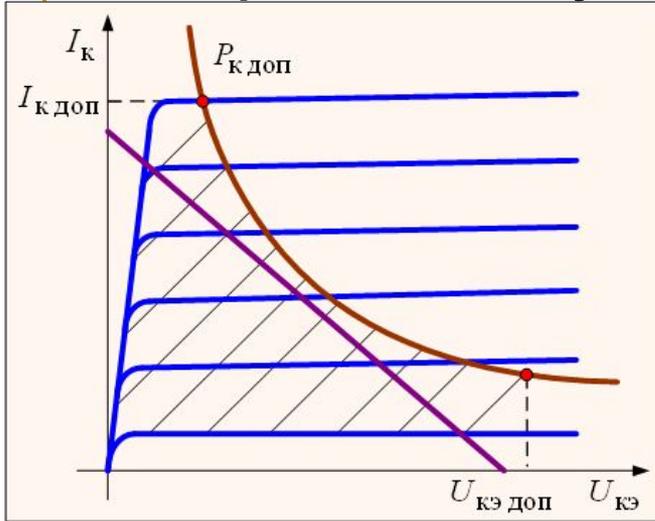
$$R_{ш.вх.экв} = U_{ш.вх.экв} / (4kT \Delta F)$$

Коэффициент шума - это величина, показывающая отношение мощности шумов на выходе прибора к мощности шумов на выходе, созданных источником шума. Иначе говоря, $K_{ш}$ показывает, во сколько раз отношение сигнал-шум на входе $h_{вх.2}$ лучше, чем на выходе.

$$K_{ш} = P_{ш.вых.} / (P_{ш.вых.ист.}) = h_{2вх} / h_{2вых.}$$

Обычно $K_{ш}$ измеряется в децибелах: $K_{ш} = 10 \lg P_{ш.вых.} / (P_{ш.вых.ист.})$, дБ.

Предельно допустимые параметры транзистора



— это такие параметры, которые не должны быть превышены при любых условиях эксплуатации и при которых обеспечивается заданная надежность. К ним относят:

Максимально допустимые напряжения: $U_{кб\ max}$, $U_{кэ\ max}$, $U_{эб\ max}$.

Максимально допустимые токи $I_{к\ max}$ $I_{э\ max}$ $I_{б\ max}$

Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора $P_{к\ тлх}$

— 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_{max} , допустимое при заданной температуре корпуса T_k или окружающей среды T_c , определяют по формулам

$$P_{max}(T_k) = (T_n\ max - T_k) / R_{т\ пк} \quad P_{max}(T_c) = (T_n\ max - T_c) / R_{т\ пс}$$

где $T_n\ птах$ — максимально допустимая температура p-n-перехода; $R_{т\ пк}$ — тепловое сопротивление переход—корпус; $R_{т\ пс}$ — тепловое сопротивление переход—окружающая среда.

Предельная частота усиления по току — частота, при которой f_a и f_β .

коэффициент усиления по току β или α уменьшается до 0,7 (в $\sqrt{2}$ раз) своего значения на низких ω в зависимости от значения этой частоты различают низкочастотные ($f_a < 3\ \text{МГц}$), среднечастотные ($3\ \text{МГц} < f_a < 30\ \text{МГц}$), высокочастотные ($30\ \text{МГц} < f_a < 300\ \text{МГц}$) и СВЧ ($f_a > 300\ \text{МГц}$)-транзисторы.

Максимальной частотой генерации f_{max} это наибольшая частота, при которой транзистор способен работать в схеме автогенератора при оптимальной обратной связи.

Важным параметром служит сопротивление базы транзистора $г_b$, представляющее собой распределенное омическое сопротивление базовой области. Это сопротивление необходимо знать при определении входного сопротивления каскада. Сопротивление $г_b$ находят путем измерения постоянной времени цепи обратной связи t_k , поскольку $t_k = г_b C_k$, где C_k — емкость коллекторного перехода.

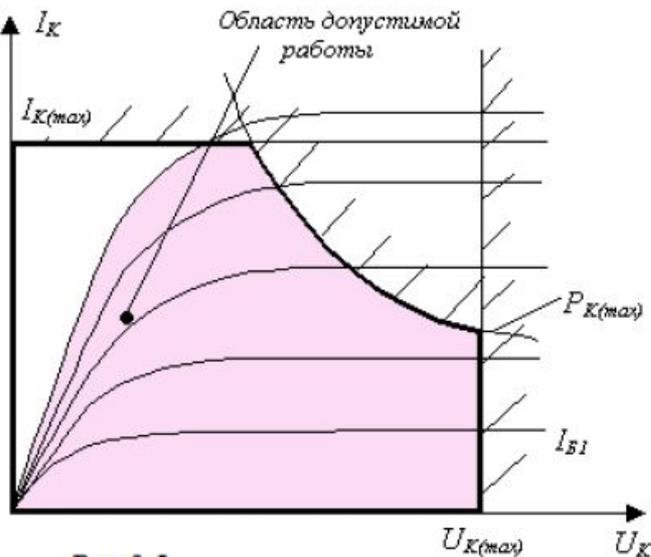
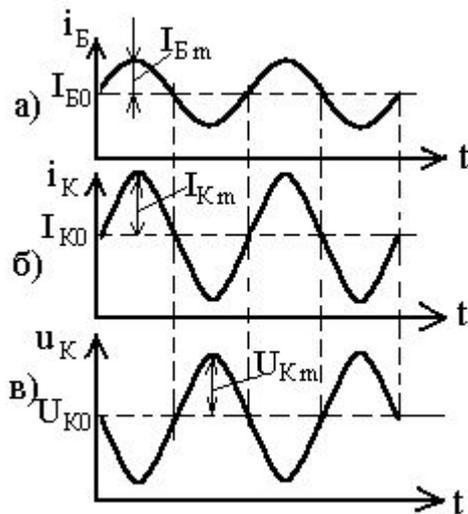
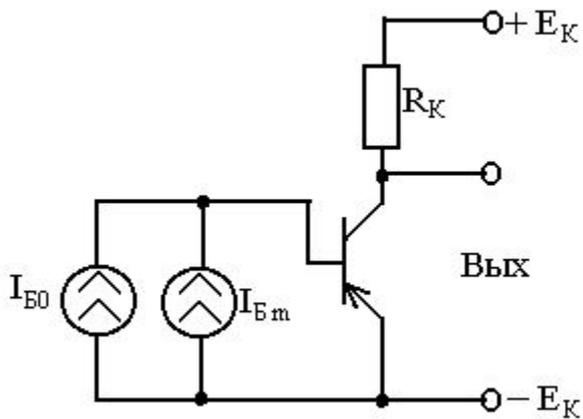


Рис 3.5

Работа транзистора в усилительном режиме



8.2 Работа транзистора в режиме переключения

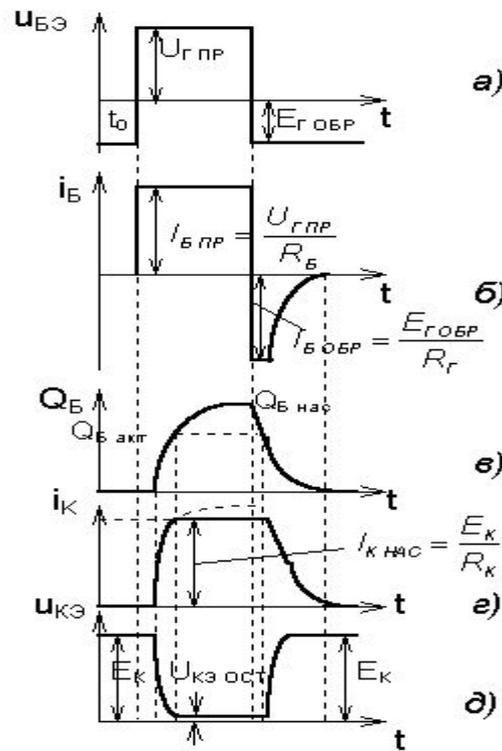
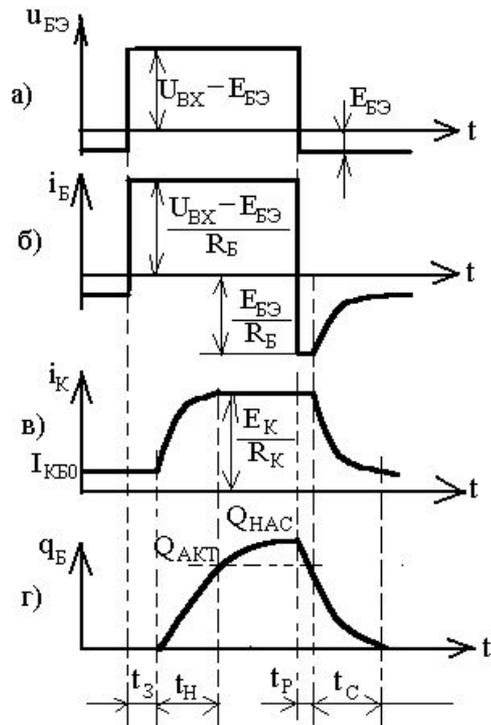
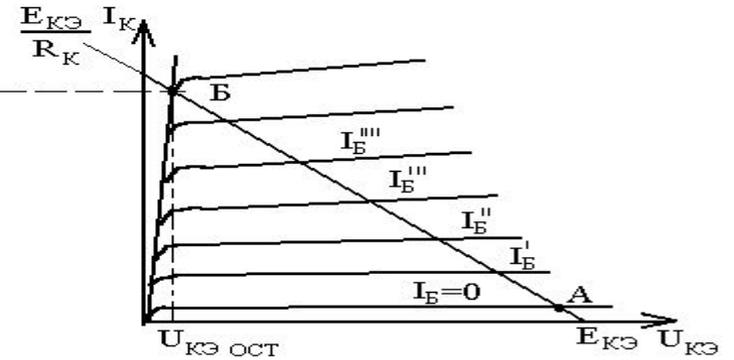
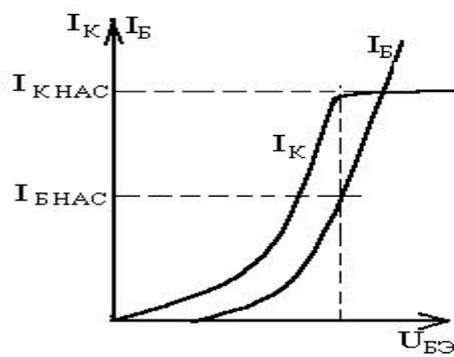
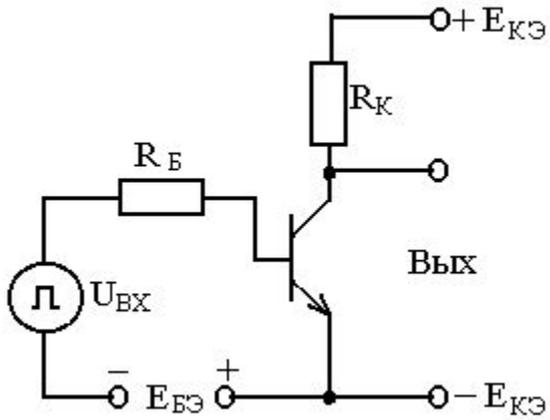
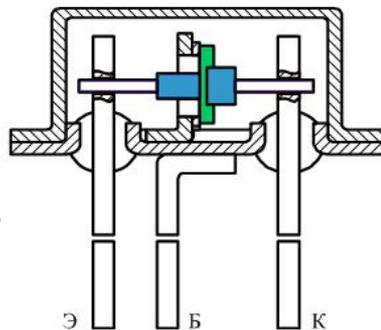
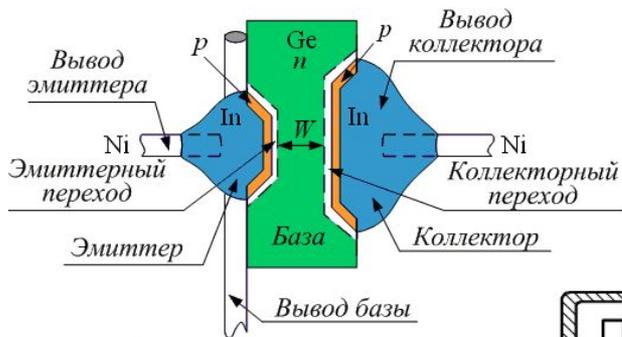
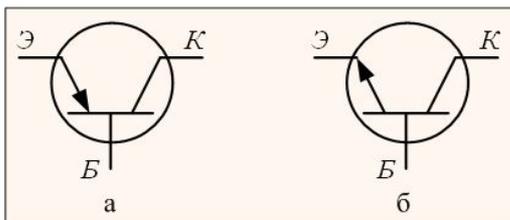
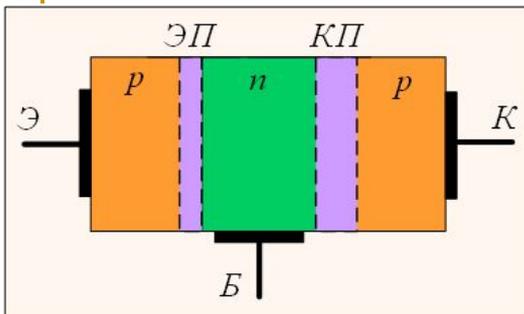


Рис. 3.48

3.1. Структура и основные режимы работы

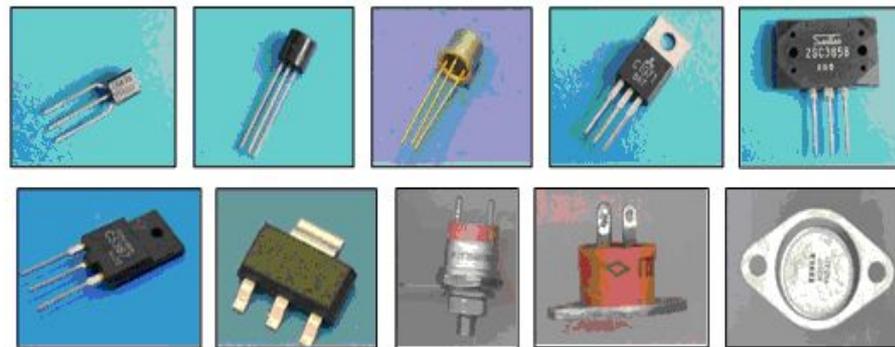


- Биполярный транзистор** (обычно его называют просто транзистором) – это полупроводниковый прибор с двумя или более взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов.
- Транзистор (полупроводниковый триод) был создан американскими учеными Дж. Бардином, В. Браттейном и У. Шокли в 1948 году. Это событие имело громадное значение для полупроводниковой электроники. Транзисторы могут работать при значительно меньших напряжениях, чем ламповые триоды, и не являются простыми заменителями последних, а их можно использовать помимо усиления и генерирования сигналов переменного тока в качестве ключевых элементов. Определение «биполярный» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, к которым принимают участие носители заряда, как электроны, так и дырки.
- Структура биполярного транзистора изображена на рис. 3.1. Он представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности. На границах этих областей возникают электронно-дырочные переходы. От каждой области полупроводника сделаны токоотводы (омические контакты). Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют базой (Б). Примыкающие к базе области обычно делают неодинаковыми. Одну из областей делают так, чтобы из неё наиболее эффективно проходила инжекция носителей в базу, а другую – так, чтобы *p-n*-переход между базой и этой областью наилучшим образом собирал инжектированные в базу носители, то есть осуществлял экстракцию носителей из базы.
- Рис. 3.1. Схематическое изображение структуры биполярного транзистора
- Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют **эмиттером** (Э), а *p-n*-переход между базой и эмиттером – **эмиттерным** (ЭП). Область транзистора, основным назначением которой является собирание, экстракция носителей заряда из базы, называют **коллектором** (К), а *p-n*-переход между базой и коллектором – **коллекторным** (КП). В зависимости от типа электропроводности крайних слоев (эмиттера и коллектора) различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n* типа. В обоих типах транзисторов физические процессы аналогичны, они различаются только типом инжектируемых и экстрагируемых носителей и имеют одинаково широкое применение.
- На принципиальных электрических схемах транзисторы изображают условными графическими обозначениями, представленными на рис. 3.2.

Рис. 3.2. Условные обозначения транзисторов:
а – транзистор *p-n-p* типа; б – транзистор *n-p-n* типа

Конструктивно биполярные транзисторы оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах (рис. 3.3).

Рис. 3.3. Конструктивное оформление биполярного транзистора



Режимы работы биполярного транзистора

- При работе транзистора к его электродам прикладываются напряжения от внешних источников питания. В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, каждый из $p-n$ -переходов может быть смещен в прямом или в обратном направлении, исходя из этого, возможны четыре режима работы транзистора (табл. 3.1).
- Таблица 3.1
- Режимы работы биполярного транзистора
-
- Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на коллекторном переходе напряжение обратное, и он собирает носители из базы, то такое включение транзистора называют нормальным, а транзистор работает в *активном (усилительном) режиме*.
- В режиме насыщения оба $p-n$ -перехода включены в прямом направлении, переходы насыщены подвижными носителями заряда, их сопротивления малы.
- В режиме отсечки оба $p-n$ -перехода включены в обратном направлении. В электродах транзистора протекают тепловые токи обратновключенных переходов.
- Если же на коллекторном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на эмиттерном переходе напряжение обратное, и он осуществляет экстракцию носителей из базы, то такое включение транзистора называют *инверсным*, а транзистор работает в *инверсном режиме*.
- При инверсном включении транзистора необходимо учитывать следующие особенности:
- Поскольку эмиттерный переход по площади меньше, чем коллекторный, то из того количества носителей, которые инжектируются коллекторным переходом, меньшее количество собирается эмиттерным переходом, что снижает величину тока этого перехода.
- Это приводит к изменению заряда носителей в базе и, следовательно, к изменению барьерной ёмкости переходов, т. е. к изменению частотных свойств транзистора.
- При меньшей площади эмиттерного перехода необходимо снижать величину его тока, чтобы оставить прежней температуру нагрева полупроводниковой структуры.

- Биполярные транзисторы широко используются в цифровой технике в качестве электронных ключей. В этих устройствах используются сигналы в виде почти прямоугольных (трапецеидальных) импульсов большой амплитуды. В общем случае для описания работы транзистора в импульсном (ключевом) режиме необходимо использовать нелинейные динамические модели транзистора (например, динамические компьютерные модели Эберса - Молла). Однако в большинстве случаев ограничиваются расчетом амплитуды и длительности фронтов импульсных сигналов.
- Рассмотрим схему транзисторного ключа на биполярном транзисторе (рис. 3.47). В цепь базы транзистора включен источник импульсных сигналов - генератор прямоугольных импульсов $uГ$ с внутренним сопротивлением $RГ$. В цепи коллектора включена нагрузка $RК$ и поэтому напряжение на коллекторе $uКЭ = EK - iКRК$. Ограничим рассмотрение работы схемы случаем включения в цепь базы генератора тока, то есть будем предполагать, что внутреннее сопротивление генератора $RГ$ значительно больше входного сопротивления открытого транзистора и, следовательно, $iБ = iК$. При анализе схемы учтены также влияние емкостей $CЭ$ - эмиттерного и $СК$ - коллекторного переходов. Временные диаграммы, отражающие процессы, протекающие в схеме, представлены на рис. 3.48. До момента времени $t0$ $uГ = EG ОБР$ и токи $iБ$ и $iК$ равны нулю (тепловыми токами в цепи коллектора пренебрегаем). Это исходное состояние иллюстрирует точка А (рис.3.49). Она находится на пересечении нагрузочной линии с выходной характеристикой, снятой при $iБ=0$ (транзистор находится в режиме отсечки).
- В момент времени $t0$ включается напряжение $uГ ПР$ и в цепи базы возникает ток (рис.3.48,,б). При этом ток коллектора $iК$ возникает с задержкой $tЗ$ (рис.3.48,г). Время задержки $tЗ$ определяется тем, что коллекторный ток может появиться только после того, как электроны, переходящие из эмиттера в базу, достигнут коллекторного перехода. Это станет возможным, когда напряжение на эмиттерном переходе, по мере заряда барьерных емкостей, достигнет пороговой величины U^* , и он откроется. Практически интервал $tЗ$ мал, и им часто пренебрегают. В интервале времени $t2 - t1 = tф$, называемым временем фронта, коллекторный ток возрастает по экспоненциальному закону и достигает установившейся величины. Увеличение коллекторного тока определяется увеличением прямого напряжения на эмиттерном переходе (заряжается емкость $CЭ$) и увеличением количества электронов, переходящих из эмиттера в базу и далее в коллектор (заряд электронов в базе QB возрастает - рис. 3.48,в). Рабочая точка (рис. 3.49) перемещается вверх по нагрузочной линии (транзистор находится в активном режиме). В зависимости от величины конечное положение рабочей точки может быть или в активном режиме, или в режиме насыщения. Практический интерес представляет случай, когда рабочая точка глубоко заходит в режим насыщения. Таким образом, напряжение $uГ$ должно быть таким по величине, чтобы обеспечить $iБ ПР > iБ min$. ($iБ min$ - минимальное значение тока базы, при котором транзистор переходит в режим насыщения).
- Величину называют глубиной насыщения. Время фронта $tф$ зависит, как отмечалось выше, от времени заряда емкости $CЭ$, а также от времени разряда емкости $СК$, так как по мере роста $iК$ напряжение $uКЭ$ уменьшается (рис.3.48 д). Кроме того, на величину времени $tф$ оказывает влияние величина $iБ ПР$, так как от величины базового тока зависит скорость заряда емкости $CЭ$. Зависимость тока коллектора в интервале $tф$ от времени аппроксимируют обычно выражением:

$$(3.77)$$
- где $iК ПР = h21Э iБ ПР$ - величина тока коллектора, соответствующая току базы $iБ ПР$ в статическом режиме (физически ток $iК ПР$ может быть достигнут, если транзистор не переходит в режим насыщения $iБ ПР < iБ min$); $tрас$ - постоянная времени нарастания тока коллектора в схеме ОЭ с учетом перезаряда емкости $СК$ (см.3.76).
- Длительность фронта $tф$ равна:

$$(3.78)$$
- Из (3.78) следует, что, так как фронт заканчивается при переходе транзистора в режим насыщения. Длительность фронта уменьшается при увеличении $iБ ПР$. В последующие после $t2$ моменты времени ток коллектора $iК$ и напряжение $uКЭ$ остаются постоянными, однако заряд в базе транзистора QB продолжает нарастать (рис. 3.48,в) за счет инъекции электронов через открытые эмиттерный и коллекторный переходы (транзистор работает в режиме насыщения и токи определяются внешними по отношению к транзистору элементами схемы).
- Рассмотрим теперь процессы, происходящие в схеме после переключения напряжения генератора на $uОБР$ (момент времени $t3$, (рис.3.48,а), В интервале времени $t3 - t4$, называемом временем рассасывания $tрас$, происходит рассасывание накопленного в базе заряда электронов, заряд уменьшается вследствие рекомбинации и ухода электронов во внешнюю цепь, что сопровождается появлением тока $iБ ОБР$ (рис.3.48,б). Транзистор насыщен, при этом коллекторный переход остается в открытом состоянии и в цепи коллектора течет ток $К НАС$. Ток базы $iБ ОБР$ также определяется внешней цепью. В момент времени $t4$ заряд в базе QB уменьшается до значения $QB АКТ$ и коллекторный переход закрывается (транзистор переходит в активный режим работы). В интервале времени $t4 - t5$, называемом временем среза $tс$, происходит дальнейшее рассасывание заряда QB , разряжается $CЭ$, заряжается емкость $СК$, рабочая точка перемещается из положения В в положение А (рис. 3.49). Транзистор переходит в режим отсечки (оба перехода заперты), ток коллектора $iК$ и ток базы $iБ ОБР$ уменьшаются до нуля, а напряжение $uКЭ$ возрастает до величины $EК$.
- Величины $tрас$ и $tс$ могут быть найдены из выражений, справедливых при $iБ ОБР \gg iБ min$; (3.79)
- (3.80)
- где: $tп$ - время жизни электронов в базе в режиме насыщения;
- Из (3.79) следует, что для уменьшения времени рассасывания необходимо уменьшать время жизни неосновных носителей $tп$ (электронов) в базе (для этого структуры импульсных транзисторов легируют золотом). Кроме того, можно уменьшить $iБ ПР$ (хотя при этом будет увеличиваться время фронта $tф$) и увеличивать $iБ ОБР$. Величины $tз$, $tф$, $tрас$, $tс$ для импульсных транзисторов приводятся в справочной литературе, а формулы (3.77...3.80) используются для пересчета параметров в конкретных схемах. Измерения произведены при одних значениях $iБ ПР$, $iБ ОБР$, $iБ min$, а параметры нужны при других. Для современных быстродействующих маломощных импульсных транзисторов $tз$, $tф$, $tрас$, $tс$ составляют единицы и десятые доли наносекунд (для мощных - существенно больше).

– если $U_K > U_{K \max}$, ВОЗМОЖЕН пробой коллекторного $p-n$ перехода;

– если $I_K > I_{K \max}$, ВОЗМОЖЕН перегрев эмиттерного $p-n$ перехода;

– если $P_K > P_{K \max}$ работа транзистора невозможна из-за перегрева коллекторного $p-n$ -перехода. Область работы транзистора ограничивают все три условия (рис. 3.5).
