

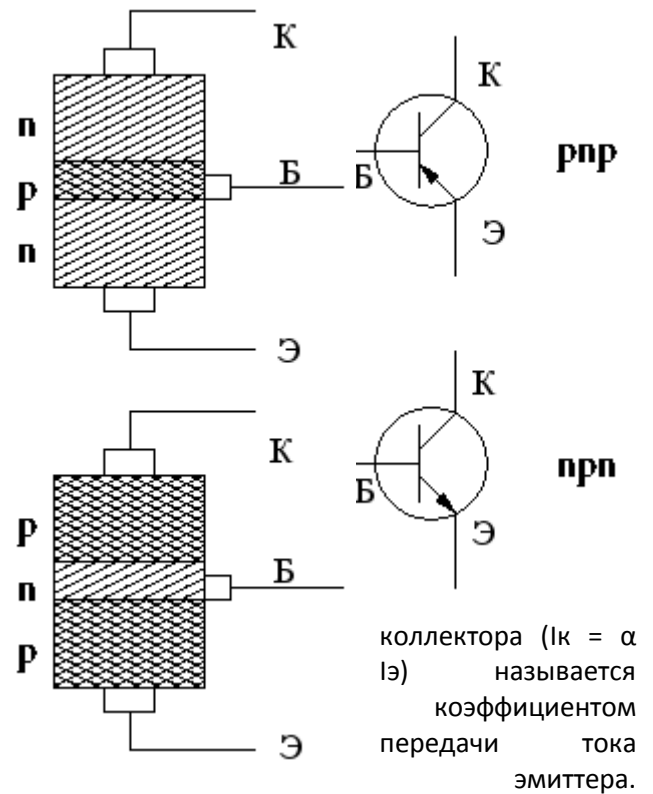
## Б8 1.Биполярные транзисторы. Режимы работы биполярного транзистора.

**Биполярный транзистор** — трёхэлектродный полупроводниковый прибор, один из типов транзистора. Электроды подключены к трём последовательно расположенным слоям полупроводника с чередующимся типом примесной проводимости. По этому способу чередования различают  $n p n$  и  $p n p$  транзисторы ( $n$  (negative) — электронный тип примесной проводимости,  $p$  (positive) — дырочный). В биполярном транзисторе, в отличие от других разновидностей, основными носителями являются электроны, и дырки (от слова «би» — «два»). Схематическое устройство транзистора показано на втором рисунке.

Электрод, подключённый к центральному слою, называют базой, электроды, подключённые к внешним слоям, называют коллектором и эмиттером. На простейшей схеме различия между коллектором и эмиттером не видны. В действительности же коллектор отличается от эмиттера, главное отличие коллектора — большая площадь  $p - n$ -перехода. Кроме того, для работы транзистора абсолютно необходима малая толщина базы.

### Принцип действия транзистора

В активном режиме работы транзистор включён так, что его эмиттерный переход смещён в прямом направлении (открыт), а коллекторный переход смещён в обратном направлении. Для определённости рассмотрим  $p n p$  транзистор, все рассуждения повторяются абсолютно аналогично для случая  $n p n$  транзистора, с заменой слова «электроны» на «дырки», и наоборот, а также с заменой всех напряжений на противоположные по знаку. В  $p n p$  транзисторе электроны, основные носители тока в эмиттере, проходят через открытый переход эмиттер-база (инжектируются) в область базы. Часть этих электронов рекомбинирует с основными носителями заряда в базе (дырками), часть диффундирует обратно в эмиттер. Однако, из-за того что базу делают очень тонкой и сравнительно слабо легированной, большая часть электронов, инжектированных из эмиттера, диффундирует в область коллектора. Сильное электрическое поле обратного смещённого коллекторного перехода захватывает электроны (напомним, что они — неосновные носители в базе, поэтому для них переход открыт), и проносит их в коллектор. Ток коллектора, таким образом, практически равен току эмиттера, за исключением небольшой потери на рекомбинацию в базе, которая и образует ток базы ( $I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}$ ). Коэффициент  $\alpha$ , связывающий ток эмиттера и ток



Численное значение коэффициента  $\alpha$  0.9 — 0.999. Чем больше коэффициент, тем эффективней транзистор передает ток. Этот коэффициент мало зависит от напряжения коллектор-база и база-эмиттер. Поэтому в широком диапазоне рабочих напряжений ток коллектора пропорционален току базы, коэффициент пропорциональности равен  $\beta = \alpha / (1 - \alpha) = (10 - 1000)$ . Таким образом, изменяя малый ток базы, можно управлять значительно большим током коллектора.

## Режимы работы биполярного транзистора

**Нормальный активный режим** Переход эмиттер — база включен в прямом направлении (открыт), а переход коллектор — база — в обратном (закрит)  
**Инверсный активный режим** Эмиттерный переход имеет обратное включение, а коллекторный переход — прямое. **Режим насыщения** Оба  $p - n$  перехода смещены в прямом направлении (оба открыты). **Режим отсечки** В данном режиме оба  $p - n$  перехода прибора смещены в обратном направлении (оба закрыты).

### Основные параметры транзистора:

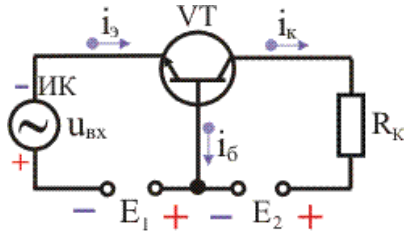
Коэффициенты усиления: по току  $k_I = \Delta I_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{ВХ}}$  по напряжению  $k_U = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$  по мощности  $k_P = \Delta P_{\text{ВЫХ}} / \Delta P_{\text{ВХ}}$

Сопротивления: входное  $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$  выходное  $R_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВЫХ}}$

Схемы включения

**Схема включения с общей базой** Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями: коэффициент усиления по току  $I_{вых}/I_{вх}$ . Для схемы с общей базой  $I_{вых}/I_{вх}=I_к/I_б=\alpha$  [ $\alpha<1$ )] входное сопротивление  $R_{вхб}=U_{вх}/I_{вх}=U_{бэ}/I_б$ . Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и составляет десятки Ом, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

**Недостатки схемы с общей базой** : Схема не усиливает ток, так как  $\alpha < 1$  Малое входное сопротивление Два разных источника напряжения для питания.



$I_{вых}=I_к$   $I_{вх}=I_б$   $U_{вх}=U_{бэ}$   $U_{вых}=U_{кз}$

**Достоинства:** Большой коэффициент усиления по току Большое входное сопротивление Можно обойтись одним источником питания

**Недостатки:** Худшие температурные и частотные свойства по сравнению со схемой с общей базой.

Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

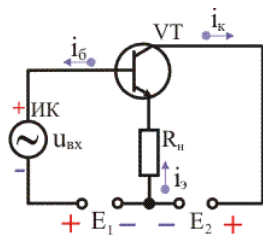
**Схема с общим коллектором**

$I_{вых}=I_э$   $I_{вх}=I_б$   $U_{вх}=U_{бк}$   $U_{вых}=U_{кэ}$

**Достоинства:** Большое входное сопротивление Малое выходное сопротивление

**Недостатки:** Не усиливает напряжение

Схему с таким включением называют «эмиттерным повторителем»



**Достоинства:** Хорошие температурные и частотные свойства.

**Схема включения с общим эмиттером**

Основные показатели биполярного транзистора для различных схем его включения

Вид схемы	Токи			Напряжения			Основные параметры			Примечание
	$I_{вх}$	$I_{вх}$	$I_{вых}$	$U_{вх}$	$U_{вх}$	$U_{вых}$	$k_I$	$k_U$	$R_{вх}$	
с общей базой	$I_э$	$I_к$	$I_к$	$U_{бэ}$	$U_{бк}$	$U_{кэ}$	$\alpha$	$\frac{R_{нб}}{R_{вхб}}$	$\frac{U_{кэ}}{I_э}$	$k_I < 1, k_U > 1$
с общим эмиттером	$I_б$	$I_к$	$I_к$	$U_{бэ}$	$U_{бк}$	$U_{кэ}$	$\beta$	$\frac{R_{нб}}{R_{вхб}}$	$\frac{U_{кэ}}{I_э}(\beta+1)$	$k_I > 1, k_U > 1$
с общим коллектором	$I_б$	$I_к$	$I_э$	$U_{бэ}$	$U_{бк}$	$U_{кэ}$	$\beta+1$	$\frac{R_{нб}}{R_{нб}+R_{вхб}}$	$R_{нб}(\beta+1)$	$k_I > 1, k_U < 1$

2. Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером. Передаточная хар-ка и схема замещения.

Усилительный каскад с общим эмиттером. Самым распространенным включением есть схема с ОЭ. Все

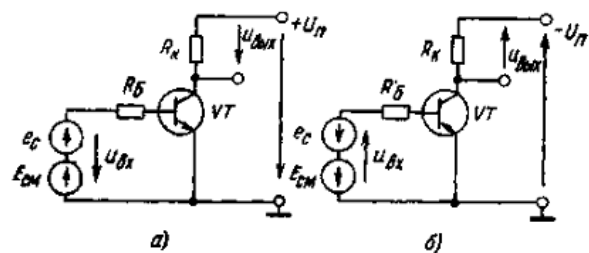


Рис. 6.1. Обобщенная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе типов п-р-п (а) и р-п-р (б)

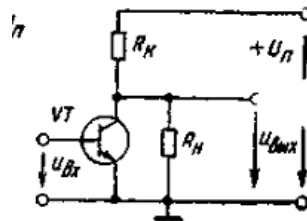


Рис. 6.2. Усилительный каскад с внешней нагрузкой

разновидности этой схемы можно свести к виду рис 6.1 а) для п-р-п и б) для р-п-р. Вых напряжение также может сниматься с дополнительного резистора Rн. рис 6.2

В подключении рис 6.1 а) выходное напр имеет такую

же фазу и равно

$u_{вых} = i_к R_к.$

В подключении

Рис 6.2 фазы отличаются на  $\pi$

$$u_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{п}} - i_{\text{к}} R_{\text{к}}}{1 + R_{\text{к}}/R_{\text{н}}}$$

$R_{\text{б}}$  – балластный резистор, служит для линеаризации входной хар-ки. Причем  $R_{\text{б}} \gg R_{\text{вх}}$ . Тогда

$$i_{\text{к}} = i_{\text{б}} h_{213} = h_{213} u_{\text{вх}} / (R_{\text{б}} + R_{\text{н}}) \approx h_{213} u_{\text{вх}} / R_{\text{б}}$$

На вход подают  $u_{\text{вх}} = u_{\text{с}} + U_{\text{см}}$ , то есть сигнал и смещение, которое обеспечивает требуемый режим работы каскада.

Для построения схем используют ВАХ входную и выходную.

Используя метод пересечения на входной хар-ке а) находят точку покоя П.

На выходной ей будет соответствовать точка П. Эти точки соответствуют напряжениям и токам покоя базы.

Если изменить входное напряжение это вызовет  $\Delta U_{\text{бз}}$  относительно напряжения покоя, а это в свою очередь  $\Delta U_{\text{кз}}$  (на графиках). То есть существует пропорциональность.

$$K_{U_{\text{к}}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$$

Для данной схемы  $h_{123} = h_{223} = 0$  (нет ОС)

Тогда

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{кз}} = h_{213} \Delta I_{\text{б}} R_{\text{к}};$$

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{бз}} = \Delta I_{\text{б}} R_{\text{вх}}.$$

Коэффициент усиления

$$K_{U_{\text{к}}} = h_{213} R_{\text{к}} / R_{\text{вх}}.$$

С учетом балластного сопротивления

$$K_{U0} = K_{U_{\text{к}}} K_{\text{дел}} = h_{213} R_{\text{к}} / (R_{\text{б}} + R_{\text{н}}),$$

Входное и выходное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{б}} + R_{\text{вх}} \approx R_{\text{б}};$$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых т}} = 1/h_{223},$$

Для схемы на рис 6.2

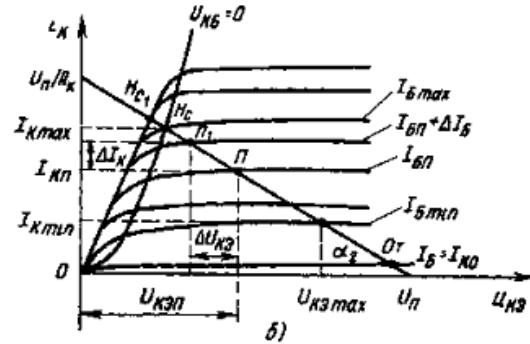
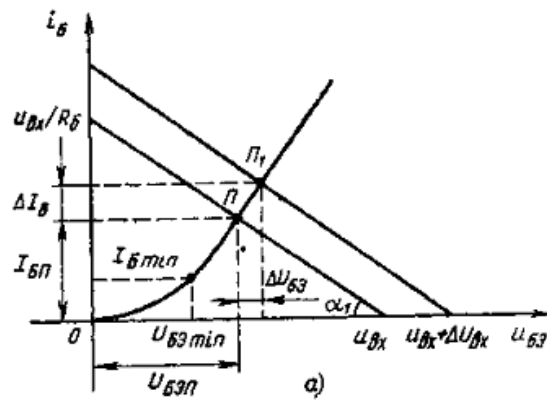
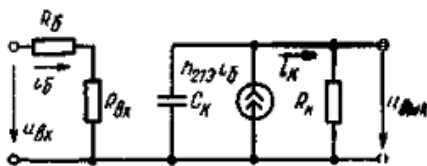
$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых т}} R_{\text{к}} / (R_{\text{вых т}} + R_{\text{к}}) \approx R_{\text{к}}.$$

Передаточная функция:

$$W(p) = K_{U0} / (Tp + 1), \quad (6.12)$$

где  $K_{U0}$  — коэффициент усиления каскада по постоянному току, который определяется из (6.5);  $T = \tau_{\alpha} / (1 - \alpha) + C_{\text{к}} R_{\text{к}}$  — постоянная времени каскада. Следовательно, частотная характеристика каскада в области высоких частот имеет одну асимптоту с наклоном — 20 дБ/дек.

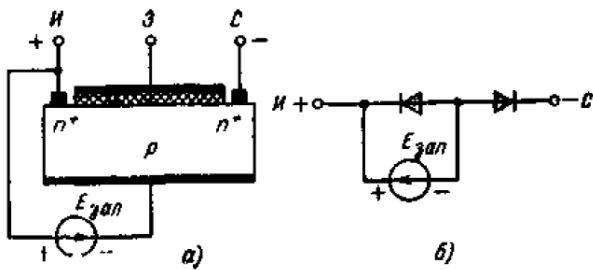
Схема замещения:



### 3. Особенности работы полевого транзистора в ключевом режиме при изменении полярности напряжения сток-исток..doc

Работа полевого транзистора при смене полярности напряжения сток-исток.

Вольтамперная характеристика полевых транзисторов при малых напряжениях  $U_{\text{си}}$  показывает что, выходные характеристики практически линейны, причем их наклон пропорционален управляющему напряжению ( $U_{\text{зи}}$ ). При смене напряжения на стоке в некоторых пределах эта линейность не нарушается. Эта особенность позволяет использовать полевой транзистор как в схемах коммутации при изменяющейся полярности входного напряжения  $e_{\text{вх}}$ , так и схемах аналоговых управляемых делителей напряжения, работающих в цепях постоянного или переменного тока. Определим максимально допустимое обратное напряжение  $U_{\text{си}}$ . Для полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом максимальное сечение токопроводящего канала при смене полярности напряжения сток—исток сохраняется при условии отсутствия прямого тока р-п-перехода. Для кремниевого транзистора можно полагать, что это условие выполняется, если р-п-переход между затвором и стоком смещен в прямом направлении не более чем на 0,4...0,5В ( $U_{\text{эс}} < 0,4...0,5\text{В}$ ) или  $|U_{\text{си инв}}| \leq |U_{\text{зи}}| + 0,4...0,5\text{В}$ .



10.20 Топология (а) и схема замещения (б) полевого транзистора с дополнительным источником смещения

Для МДП-транзисторов этот диапазон может быть расширен при условии, если на подложку относительно истока подать запирающее напряжение (рис. 10.20). В этом случае  $|U_{\text{си инв}}| \leq |U_{\text{ззп}}| + 0.4 \dots 0.5 \text{ В}$ . Начальные участки выходных характеристик полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом и изолированным затвором приведены соответственно на рис. 10.21, а, б.

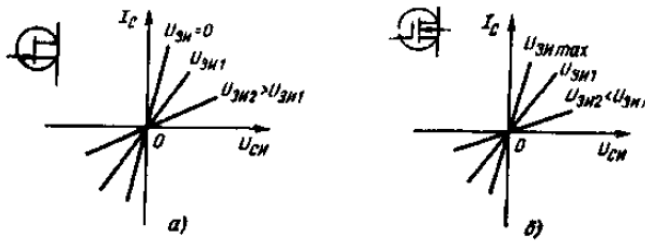


Рис. 10.21. Начальные участки выходных ВАХ полевого транзистора с р-п-переходом (а) и МДП-транзистора (б)

В соответствии с приведенными характеристиками для полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом  $R_{\text{min}}$  соответствует  $U_{\text{зи}} = 0$  (рис. 10.21, а), а для полевых транзисторов с изолированным затвором  $R_{\text{min}}$  соответствует  $U_{\text{зи max}}$  (рис. 10.21, б).