

# БИЛЕТ №9

## 1. Биполярные транзисторы. Схемы включения.

### Основные параметры.

**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 npn и pnp транзисторы (n (negative) — электронный тип примесной проводимости, p (positive) — дырочный). В биполярном транзисторе, в отличие от других разновидностей, основными носителями являются и 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 npn транзистор, все рассуждения повторяются абсолютно аналогично для случая pnp транзистора, с заменой слова «электроны» на «дырки», и наоборот, а также с заменой всех напряжений на противоположные по знаку. В npn 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 ( $I_э = I_б + I_к$ ). Коэффициент  $\alpha$ , связывающий ток эмиттера и ток коллектора ( $I_к = \alpha I_э$ ) называется коэффициентом передачи тока эмиттера. Численное значение коэффициента  $\alpha$  0.9 —

0.999. Чем больше коэффициент, тем эффективнее 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

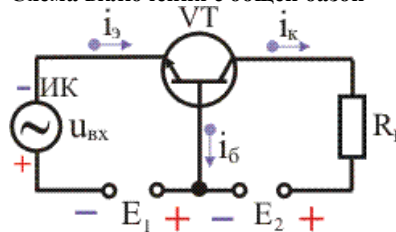
**Нормальный активный режим** Переход эмиттер — база включен в прямом направлении (открыт), а переход коллектор — база — в обратном (закрыт). **Инверсный активный режим** Эмиттерный переход имеет обратное включение, а коллекторный переход — прямое. **Режим насыщения** Оба p-n перехода смещены в прямом 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  $k_I = \Delta I_{вых} / \Delta I_{вх}$  по напряжению  $k_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$  по мощности  $k_P = \Delta P_{ввых} / \Delta P_{вх}$   
Сопровождающие: входное  $R_{вх} = U_{вх} / I_{вх}$  выходное  $R_{ввых} = U_{ввых} / I_{ввых}$

### Схемы включения

#### Схема включения с общей базой

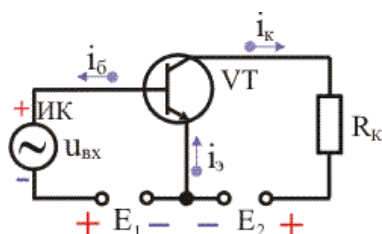


Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями: коэффициент усиления по току  $I_{ввых} / I_{вх}$ . Для схемы с общей базой  $I_{ввых} / I_{вх} = I_к / I_э = \alpha$  ( $\alpha < 1$ ) входное сопротивление

$R_{вх} = U_{вх} / I_{вх} = U_{бэ} / I_э$ . 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.

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

#### Схема включения с общим эмиттером

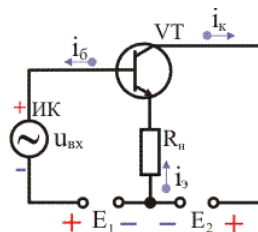


$I_{ввых} = I_к$   $I_{вх} = I_б$   $U_{вх} = U_{бэ}$   $U_{ввых} = U_{кэ}$

**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

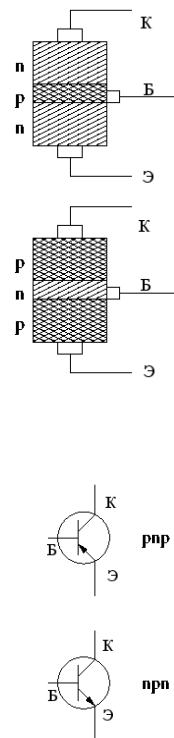


$I_{ввых} = I_э$   $I_{вх} = I_б$   $U_{вх} = U_{бэ}$   $U_{ввых} = U_{кэ}$

**Достоинства:** Большое входное сопротивление Малое выходное сопротивление **Недостатки:** Не усиливает напряжение Схему с таким включением также называют «эмиттерным повторителем».

Вид схемы	Напряжения		Токи		Основные параметры		Примечание
	$U_{вх}$	$U_{ввых}$	$I_{вх}$	$I_{ввых}$	$k_U$	$k_I$	
с общей базой	$U_{эб}$	$U_{кб}$	$I_э$	$I_к$	$\alpha$	$\beta$	$k_I < 1$ , $k_U > 1$
с общим эмиттером	$U_{эб}$	$U_{кб}$	$I_э$	$I_к$	$\beta$	$\alpha$	$k_I > 1$ , $k_U > 1$
с общим коллектором	$U_{эб}$	$U_{кб}$	$I_э$	$I_к$	$\beta + 1$	$\alpha$	$k_I > 1$ , $k_U < 1$

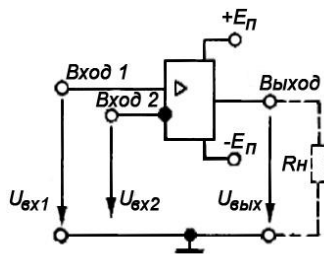
Основные показатели биполярного транзистора для различных схем его включения



## 2. Операционные усилители

**Операционный усилитель (ОУ)** — унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, удовлетворяющий следующим требованиям к электрическим параметрам (на практике ни одно из перечисленных требований не может быть удовлетворено полностью):

- коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  стремится к бесконечности ( $K_U \rightarrow \infty$ );
- входное сопротивление стремится к бесконечности ( $R_{вх} \rightarrow \infty$ );
- выходное сопротивление стремится к нулю ( $R_{ввых} \rightarrow 0$ );



- если входное напряжение равно нулю, то выходное напряжение также равно нулю ( $U_{ВХ} = 0 \rightarrow U_{ВЫХ} = 0$ );

- бесконечная полоса усиливаемых частот ( $f_B \rightarrow \infty$ ).

Достоверность допущений об идеальности свойств в каждом конкретном случае подтверждается сопоставлением реальных параметров ОУ и требований к разрабатываемым электронным средствам (ЭС). Так, если требуется разработать усилитель с коэф. усил. 10, то стандартный ОУ с коэф. усил. 25000 можно рассматривать как идеальный.

**Операционный усилитель** — это аналоговая интегральная схема, снабженная, как минимум, пятью выводами. Два вывода ОУ используются в качестве входных, один вывод является выходным, два оставшихся вывода используются для подключения источника питания ОУ. С учетом фазовых соотношений входного и выходного сигналов один из входных выводов (вход 1) называется неинвертирующим, а другой (вход 2)—инвертирующим. Выходное напряжение  $U_{вых}$  связано с входными напряжениями  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  соотношением

$$U_{вых} = K_{УО} (U_{вх1} - U_{вх2})$$

где  $K_{УО}$  — собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Из приведенного выражения следует, что ОУ воспринимает только разность входных напряжений, называемую дифференциальным входным сигналом, и нечувствителен к любой составляющей входного напряжения, воздействующей одновременно на оба его входа (сифазный входной сигнал).

Как было отмечено ранее,  $K_{УО}$  в ОУ должен стремиться к бесконечности, однако на практике он ограничивается значением 105...106 или 100... 120 дБ.

В качестве источника питания ОУ используют двухполярный источник напряжения (+  $E_{п}$ , -  $E_{п}$ ). Средний вывод этого источника, как правило, является общей шиной для входных и выходных сигналов и в большинстве случаев не подключается к ОУ. В реальных ОУ напряжение питания лежит в диапазоне  $\pm 3В... \pm 18 В$ .

Использование источника питания со средней точкой предполагает возможность изменения не только уровня, но и полярности как входного, так и выходного напряжений ОУ.

Реальные ОУ обычно снабжаются большим числом выводов, которые используются для подключения внешних цепей частотной коррекции, формирующих требуемый вид ЛАЧХ усилителя.

Реализация перечисленных выше требований к электрическим параметрам ОУ невозможна на основе схемы однокаскадного усилителя. Поэтому реальные ОУ строятся на основе двух- или трехкаскадных усилителей постоянного тока. Функциональная схема включает в себя входной, согласующий и выходной каскады усиления.

## Основные параметры операционных усилителей.

$$K_{УО} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}}$$

### Коэффициент усиления по напряжению

характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал. Типовое значение до 105...106 или 100...120 дБ.

**Входное напряжение смещения** — это напряжение, обусловленное неидентичностью напряжений эмиттерных переходов транзисторов входного дифференциального усилителя. Наличие этого напряжения

приводит к нарушению условия  $U_{ВХ} = 0 \rightarrow U_{ВЫХ} = 0$ . Численно

определяется как напряжение, которое необходимо приложить ко входу усилителя, чтобы его выходное напряжение было равно нулю. Иногда это напряжение называют напряжением сдвига нуля (УСМ).

Типовое значение этого напряжения единицы — десятки милливольт.

**Входной ток  $I_{ВХ}$**  (входной ток смещения) — ток, протекающий во входных выводах ОУ и необходимый для обеспечения требуемого

режима работы его транзисторов по постоянному току. Типовое значение этого тока единицы микроампер — сотни наноампер.

**Разность входных токов  $\Delta I_{ВХ}$**  (ток сдвига). Природа этого тока кроется, в основном, в неодинаковости коэффициентов передачи тока  $h_{21Э}$  транзисторов входного каскада ОУ. Численно он равен модулю

$$\Delta I = |I_{\hat{A}\hat{O}1} - I_{\hat{A}\hat{O}2}|$$

разности входных токов усилителя. Типовое значение параметра — от единиц микроампер до единиц и десятых долей наноампера.

**Входное сопротивление  $R_{вх}$** . Различают дифференциальное  $R_{вхдиф}$  и сифазное  $R_{вхсин}$ .

$R_{вхдиф}$  определяется как сопротивление между входами усилителя, а  $R_{вхсин}$  — как сопротивление между объединенными входными выводами и нулевой шиной.

Повышают входное сопротивление дифференц. усилителя снижением базовых токов покоя транзисторов VT1 и VT2 (см. рис. 7.3) до малых значений (единицы наноампер), но это ухудшает работу дифференц. усилителя из-за уменьшения его динамического

диапазона (выраженного в децибелах отношения максимального сигнала к минимальному). Для предотвращения этого в качестве VT1 и VT2 применяют супербета транзисторы, отличающиеся большими коэффициентами усиления по току (единицы тысяч) за счет использования в них предельно тонкой базы. Однако применение таких транзисторов усложняет задачу стабилизации дифференциального усилителя. Поэтому в ряде случаев повышение входного сопротивления ОУ достигается использованием в его входном канале полевых транзисторов. Типовое значение входного сопротивления — сотни килоом.

**Выходное сопротивление  $R_{вых}$**  — это сопротивление усилителя, рассматриваемого как эквивалентный генератор. Типовое значение выходного сопротивления — сотни ом.

**Коэффициент подавления сифазного сигнала  $K_{п.сф}$**  определяет степень подавления (ослабления) сифазной составляющей входного сигнала. Его типовое значение — 50...70 дБ.

### Максимальная скорость изменения выходного напряжения (V)

характеризует частотные свойства усилителя при его работе в импульсных схемах; измеряется при подаче на вход ОУ напряжении ступенчатой формы. Типовое значение скорости изменения выходного напряжения — единицы вольт/микросекунд.

**Частота единичного усиления  $f_{max}$**  — это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице. Обычно эта частота не превышает нескольких мегагерц.

Кроме перечисленных обычно задаются и предельно допустимые значения основных эксплуатационных параметров:

- максимально допустимое напряжение питания;
- максимально допустимый выходной ток;
- диапазон рабочих температур;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность;
- максимально допустимое входное сифазное напряжение;
- макс. допуст. входное дифференц. напряжение и др.

Перечисленные параметры сильно зависят от условий эксплуатации. Эти зависимости обычно задаются графически.