

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 npr 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 pnp транзистор, все рассуждения повторяются абсолютно аналогично для случая npr транзистора, с заменой слова «электроны» на «дырки», и наоборот, а также с заменой всех напряжений на противоположные по знаку. В pnp 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 α , связывающий ток эмиттера и ток коллектора ($I_к = \alpha I_э$) называется коэффициентом передачи тока эмиттера. Численное значение коэффициента α 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 (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:

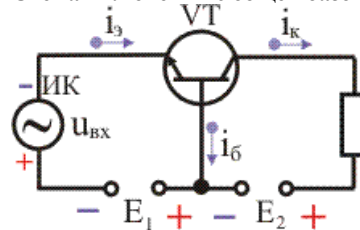
Коэффициенты усиления: по току $k_I = \Delta I_{вых} / \Delta I_{вх}$ по напряжению

$k_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$ по мощности $k_P = \Delta P_{вых} / \Delta P_{вх}$

Сопротивления: входное $R_{вх} = U_{вх} / I_{вх}$ выходное $R_{вых} = U_{вых} / I_{вых}$

Схемы включения

Схема включения с общей базой



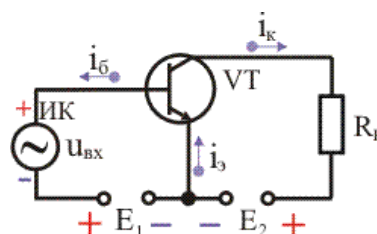
Любая схема включения транзистора характеризуется двумя основными показателями: коэффициент усиления по току $I_{вых} / I_{вх}$. Для схемы с общей базой $I_{вых} / I_{вх} = I_к / I_э = \alpha$ ($\alpha < 1$) входное сопротивление

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

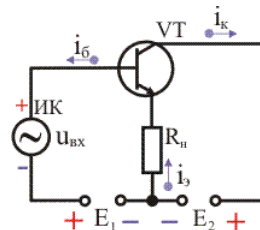


$I_{вых} = I_к$ $I_{вх} = I_б$ $U_{вх} = U_{бэ}$ $U_{вых} = U_{кэ}$

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



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

Достоинства: Большое входное сопротивление Малое выходное сопротивление

Недостатки: Не усиливает напряжение Схему с таким включением также называют «эмиттерным повторителем».

Основные показатели биполярного транзистора для различных схем его включения

Вид схемы	Токи		Напряжения		Основные параметры		Примечание
	$I_{\text{вх}}$	$I_{\text{вых}}$	$U_{\text{вх}}$	$U_{\text{вых}}$	k_I	k_U	
общей базой	$I_{\text{Э}}$	$I_{\text{К}}$	$U_{\text{ЭБ}}$	$U_{\text{н}}$	α	$\frac{R_{\text{н}}}{\alpha R_{\text{вхБ}}}$	$\frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Э}}}$ $k_I < 1, k_U > 1$
общим эмиттером	$I_{\text{Б}}$	$I_{\text{К}}$	$U_{\text{ЭБ}}$	$U_{\text{н}}$	β	$\frac{R_{\text{н}}}{\beta R_{\text{вхБ}}}$	$\frac{U_{\text{ЭБ}} (\beta + 1)}{I_{\text{Э}}}$ $k_I > 1, k_U > 1$
общим коллектором	$I_{\text{Б}}$	$I_{\text{Э}}$	$U_{\text{КБ}}$	$U_{\text{н}}$	$\beta + 1$	$\frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{вхБ}}}$	$R_{\text{н}} (\beta + 1)$ $k_I > 1, k_U < 1$

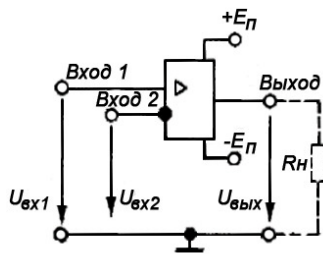
2. Операционные усилители

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 ($R_{вых} \rightarrow 0$);



- 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

$$U_{ВЫХ} = KU_0 (U_{ВХ1} - U_{ВХ2})$$

где KU_0 — 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, KU_0 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 (+ Еп, - Еп). 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.

$$K_{U0} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}}$$

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 h21Э 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 $R_{ВХсиф}$.

$R_{ВХдиф}$ определяется как сопротивление между входами усилителя, а $R_{ВХсиф}$ — 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 напряжения ступенчатой формы. Типовое значение скорости изменения выходного напряжения — единицы вольт/микросекунд.

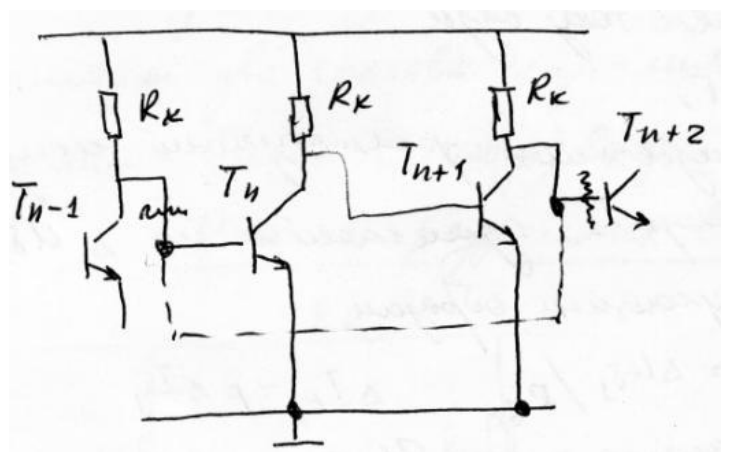
Частота единичного усиления f_{max} — это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице. Обычно эта частота не превышает нескольких мегагерц.

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.

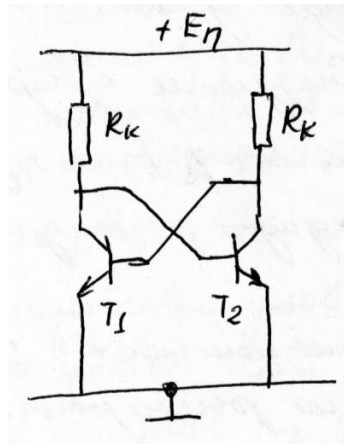
Перечисленные параметры сильно зависят от условий эксплуатации. Эти зависимости обычно задаются графически.

3. Бистабильная ячейка



Одним из основных элементов для бистабильных ячеек являются цифровые ключи. Для бистабильных ячеек характерно использование не только прямых связей между ключами, но и положительных

обратных связей. В последовательной цепочке ключей каждый ключ “окружен” ключами, находящимися в противоположном состоянии. Таким образом, в произвольной паре смежных ключей T_n и T_{n+1} выходное напряжение ключа T_{n+1} такое же, как входное напряжение ключа T_n . Изолировав рассматриваемую пару от предыдущих и последующих звеньев цепочки и соединив выход (n+1)-го ключа со входом n-го мы не изменим состояние пары. Это устойчивое состояние может иметь два варианта: T_n замкнут, T_{n+1} – открыт. И наоборот. Такие электронные схемы, имеющие 2 равноценных варианта устойчивых состояний, называются бистабильными ячейками или триггерами.



Схеме бистабильной ячейки свойственна симметричная конфигурация, наличие взаимных обратных связей и то, что один из ключей заперт, а второй открыт и насыщен. Таким образом, БЯ свойственна электрическая ассиметрия. Однако полная электрическая симметрия невозможна. Докажем это методом от противного. Пусть схема БЯ находится в симметричном состоянии, когда оба транзистора открыты и работают на границе активного режима. (Запертое состояние двух транзисторов невозможно, т.к. при этом коллекторные потенциалы обоих транзисторов равны $+E_p$, те превышают напряжение отпираия u^* . Невозможно и насыщенное состояние, т.к. тогда коллекторные потенциалы были бы меньше u^* .) Напряжения на обоих коллекторах и базах равны и близки к u^* . Коллекторный ток пропорционален току базы $I_k = \beta * I_b$. Пусть в результате неизбежных флуктуаций напряжение на одной из баз, например T_1 , изменится на ΔU_{b1} Тогда токи изменятся следующим образом $\Delta I_{b1} = \Delta U_{b1} / R_{vx}$; $\Delta I_{k1} = \beta * \Delta I_{b1}$

R_{vx} – входное сопротивление открытого транзистора.

Часть приращения ΔI_k ответвится в цепь базы T_2 и тогда

$$\Delta I_{b2} = -m * \Delta I_{k1}; \quad \Delta I_{k2} = \beta * \Delta I_{b2}$$

Аналогично часть ΔI_2 ответвится в цепь базы T_1 в виде приращения базового тока $\Delta I_{b1}' = -m * \Delta I_{k2} = m^2 * \beta^2 * \Delta I_{b1}$

При обычных значениях вроде $M=0,5$ дополнительное приращение $\Delta I_{b1}'$, получившееся при обходе цепи, будет значительно превышать исходное приращение ΔI_{b1} . Следующее приращение $\Delta I_{b1}''$ окажется во столько же раз больше приращение $\Delta I_{b1}'$ и т.д. Значит, реакция схемы на малейшую исходную флуктуацию состоит в усилении последней.

Лавинообразный процесс нарастания токов в одной половине БЯ и уменьшения токов в другой половине называются регенерацией.

Регенерация заканчивается запираением одного из ключей и насыщением второго. В нашей примере при положительной флуктуации ΔU_{b1} запирается T_2 , а при отрицательной – T_1 .

Поскольку знак флуктуации – величина случайная, то и результаты лавинообразного процесса равновероятны. Значит, при анализе БЯ любое из двух сочетаний возможно. Цель управления бистабильной ячейкой состоит в том, чтобы с помощью импульсных сигналов задавать то или иное состояние или изменять данное устойчивое состояние на противоположное.

Различают два способа управления бистабильной ячейкой: режим раздельных входов и режим общего (счетного) входа.

