

# Билет 17

## 1. Простейший усилитель на биполярном транзисторе.

Среди схем включения транзистора (общая база, общий коллектор, общий эмиттер) самой распространенной является последняя

**Усилительный каскад с общим эмиттером.**

Самым распространенным включением есть схема с ОЭ. Все разновидности этой схемы можно свести к виду рис 6.1 а) для n-p-n и б) для p-n-p. Вых напряжение также может сниматься с дополнительного резистора  $R_n$  - рис 6.2

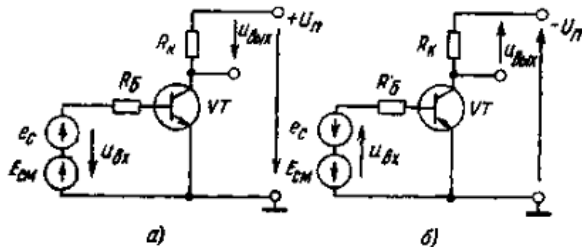


Рис. 6.1. Обобщенная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе типов n-p-n (а) и p-n-p (б)

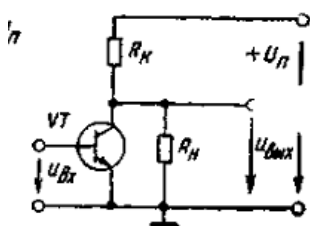


Рис. 6.2. Усилительный каскад с внешней нагрузкой

В подключении рис 6.1 а) выходное напр имеет такую же фазу и равно

$$u_{\text{вых}} = i_K R_K.$$

В подключении

Рис 6.2 фазы отличаются на  $\pi$

$$u_{\text{вых}} = \frac{U_N - i_K R_K}{1 + R_K/R_N}.$$

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

$$i_K = i_B h_{21Э} = h_{21Э} u_{вх} / (R_B + R_{вх}) \approx h_{21Э} u_{вх} / R_B.$$

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

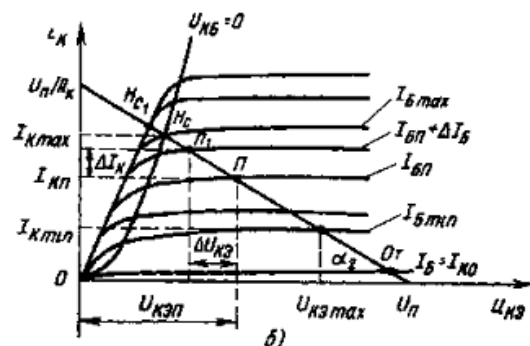
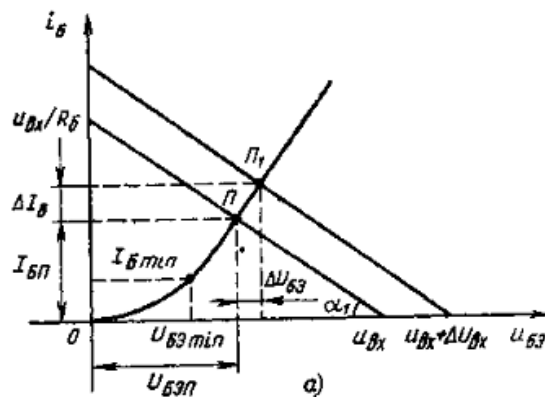
Для построения схем используют ВАХ входную и выходную. Используя метод пересечения на входной хар-ке а) находят точку покоя П.

На выходной ей будет соответствовать точка П.

Эти точки соответствуют напряжениям и токам покоя базы.

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

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



Для данной схемы  $h_{12Э} = h_{22Э} = 0$  (нет ОС)  
Тогда

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{КЭ} = h_{21Э} \Delta i_B R_K;$$

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{БЭ} = \Delta i_B R_{вх}.$$

Коэффициент усиления

$$K_{U_K} = h_{21Э} R_K / R_{вх}.$$

С учетом балластного сопротивления

$$K_{U0} = K_{U_K} K_{дел} = h_{21Э} R_K / (R_B + R_{вх}),$$

Входное и выходное сопротивление:

$$R_{вх} = R_B + R_{вх} \approx R_B;$$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых т}} = 1/h_{22Э},$$

Для схемы на рис 6.2

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

## 2. 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

( $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ );

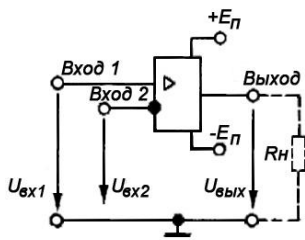
- выходное сопротивление стремится к нулю ( $R_{\text{вых}} \rightarrow 0$ );

- если входное напряжение равно нулю, то выходное напряжение

также равно нулю ( $U_{\text{вх}} = 0 \rightarrow U_{\text{вых}} = 0$ );

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

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.



Являясь идеальным усилительным элементом, ОУ составляет основу всей аналоговой электроники в результате достижений микроэлектроники, позволившей реализовать сложную структуру ОУ в интегральном исполнении на одном кристалле и наладить массовый выпуск. Все это

позволяет рассматривать ОУ в качестве простейшего элемента электронных схем подобно диоду, транзистору и т. п.

## 2 Структурная схема операционного усилителя.

**Операционный усилитель** — это аналоговая интегральная схема, снабженная минимум пятью выводами. Два вывода — в качестве входных, один вывод — выходной, два оставшихся — 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  $U_{\text{вых}}$  связано с входными напряжениями  $U_{\text{вх1}}$  и  $U_{\text{вх2}}$  соотношением

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{У0}} (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})$$

где  $K_{\text{У0}}$  — собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Следовательно, ОУ воспринимает только разность входных напряжений, называемую дифференциальным входным сигналом, и нечувствителен к любой составляющей входного напряжения, воздействующей одновременно на оба его входа (синфазный входной сигнал).

$K_{\text{У0}}$  в ОУ должен стремиться к бесконечности, на практике ограничивается значением 105...106 или 100...120 дБ.

Источника питания ОУ — двухполярный источник напряжения (+Еп, -Еп). Средний вывод этого источника является общей шиной для входных и выходных сигналов и обычно не подключается к ОУ. В реальных ОУ напряжение питания в диапазоне  $\pm 3\text{В} \dots \pm 18\text{В}$ . 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 требований к параметрам ОУ невозможна на основе схемы однокаскадного усилителя. Поэтому реальные ОУ строятся на основе двух- или трех-каскадных усилителей постоянного тока.

Функциональная схема трехкаскадного ОУ включает в себя входной, согласующий и выходной каскады усиления. Их практическая реализация предполагает использование в качестве входного каскада ОУ дифференциального усилительного каскада, что позволяет максимально уменьшить величину дрейфа усилителя, получить высокое усиление, обеспечить получение максимально высокого входного сопротивления и максимально подавить действующие на входе синфазные составляющие, обусловленные изменением температуры окружающей среды, изменением напряжения питания, старением элементов и т. п. Согласующий каскад служит для согласования выходного сигнала дифференциального усилителя с выходным каскадом ОУ, обеспечивая необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование фаз сигналов. Выходной каскад, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

На рис. 7.3 приведена упрощенная принципиальная электрическая схема ОУ. Первый каскад устройства выполнен на дифференциальном усилителе (транзисторы VT1 и VT2), в котором для задания эмиттерного тока транзисторов использована схема «токового зеркала» на транзисторах VT3 и VT4. Для уменьшения мощности, рассеиваемой в усилителе, резистор смещения  $R_{\text{см}}$  «токового зеркала» питается от одного источника питания ОУ. Резисторы  $R_3$  и  $R_3'$ , обеспечивая введение в цепь каждого транзистора дифференциального каскада местной

последовательной ООС по току нагрузки, увеличивают входное сопротивление усилителя.

Согласующий каскад усилителя также выполнен с использованием дифференциального каскада (транзисторы VT5 и VT6), на выходе которого подключен каскад по схеме с общим эмиттером (VT7). Особенности — использование в дифференциальном усилителе транзисторов, проводимость которых противоположна проводимости транзисторов входного каскада, и применение

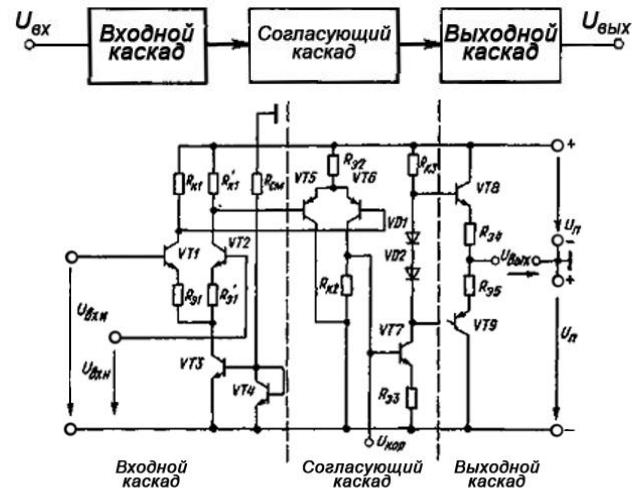


Рис. 7.3. Упрощенная схема трехкаскадного ОУ

несимметричного выхода. Вследствие этого нагрузочный резистор в коллекторной цепи транзистора VT6 отсутствует. Режим по постоянному току в каскаде на транзисторе VT7 стабилизируется введением цепи последовательной ООС по току нагрузки. Резистор  $R_{\text{к3}}$  является нагрузочным для каскада на транзисторе VT7.

В выходном каскаде усилителя использована схема двухтактного усилителя мощности, работающего в классе АВ. Необходимое начальное смещение задается диодами VD1 и VD2. Диоды обеспечивают температурную стабилизацию режима покоя выходного усилителя. Эмиттерные резисторы  $R_{\text{э4}}$  и  $R_{\text{э5}}$  обеспечивают согласование параметров комплементарной пары транзисторов выходного каскада ОУ и ограничивают его максимальный выходной ток.

Схема усилителя, приведенная на рис. 7.3, снабжена тремя выводами для подключения двухполярного источника питания,

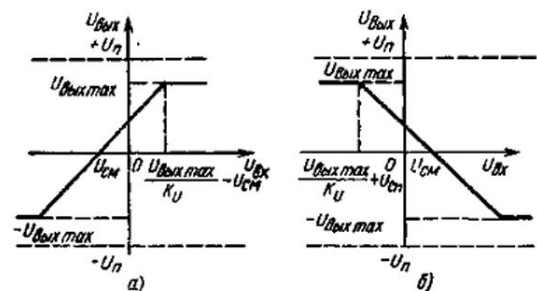


Рис. 7.4. Передаточные характеристики ОУ по неинвертирующему (а) и инвертирующему (б) входам

выходным выводом, выводом для подключения внешней коррекции  $U_{\text{кор}}$  и двумя входными выводами. Цепь внешней коррекции позволяет требуемым образом изменять частотную характеристику усилителя, что важно при введении в него различных цепей обратной связи. Цепи коррекции часто встраиваются непосредственно в усилитель.

Применение двух источников питания при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двухполярное напряжение, а передаточная характеристика усилителя расположена в двух квадрантах. На рис. 7.4, а, б приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинверт. и инверт. входов. Из этих х-к следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ( $U_{\text{вых max}}$ ) всегда меньше напряжения питания из-за использования в двухтактном усилителе мощности транзисторов, включенных по схеме с общим коллектором.

Более простой является схема двухкаскадного ОУ, из которой исключен согласующий каскад, поэтому необходимый  $K_{\text{У0}}$  обеспечивается как входным дифференциальным, так и выходным

каскадами. Практическая реализация такого решения наталкивается на трудности, связанные с тем, что входное сопротивление дифференциального каскада обратно пропорционально суммарному эмиттерному току его транзисторов, в то время как значение  $K_{ио}$  прямо пропорционально этому току. Поэтому попытка повысить усиление дифференциального каскада приводит к снижению входного сопротивления усилителя. Разрешению этого противоречия способствует использование в первом каскаде схемы активной нагрузки / Такое схемотехническое решение стало возможным после освоения технологии изготовления на общей подложке ИС биполярных транзисторов различного типа проводимости с идентичными характеристиками.

В качестве примера на рис. 7.5 приведена упрощенная схема

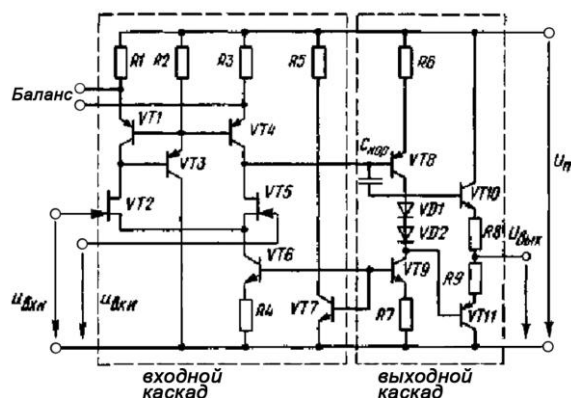


Рис. 7.5. Упрощенная схема двухкаскадного ОУ

двухкаскадного ОУ типа К544УД1. Входной каскад усилителя выполнен по дифференциальной схеме на n-канальных полевых транзисторах VT2 и VT5 с управляющим p-n-переходом. В качестве нагрузки использована схема «токавого зеркала» на транзисторах VT1, VT4, а ток истоков стабилизирован генератором тока на транзисторах VT6, VT7.

Выходной каскад образуют усилитель на транзисторе VT8, включенном по схеме с ОЭ и охваченном цепью последовательной ООС по току нагрузки (R6) и двухтактный усилитель мощности на комплементарных транзисторах VT10, VT11. Использование в этом каскаде схемы динамической нагрузки на транзисторе VT9 позволяет повысить его коэффициент усиления. Частотные свойства выходного каскада корректируют внутренним или внешним конденсатором  $C_{кор}$ , шунтирующим коллекторный переход транзистора VT8.

### 3. Транзисторно – транзисторная логика

ТТЛ(Транзисторно – транзисторная логика) выполнена на основе комбинации двух базовых схем: элемента И—НЕ (штрих Шеффера) и расширителя по ИЛИ. Элемент И—НЕ может быть представлен последовательным соединением трех каскадов: -одного многоэмиттерного транзистора VT1 с резистором R1 и диодами  $VD_0 - VD_{n-1}$ , реализующих логическую операцию И; -фазорасщепителя на транзисторе VT2, резисторе R2 и цепи нелинейной коррекции R3, R4 и VT3; -двухтактного выходного усилителя на транзисторах VT4 и VT5, резисторе R5 и диоде  $VD_n$ .

Рассмотрим более подробно назначение отдельных элементов схемы.

Выполнение выходного каскада элемента по двухтактной схеме позволяет одновременно решить две задачи:

повысить быстродействие элемента.(увеличить ток перезаряда емкости нагрузки);

снизить потребление. в установившемся режиме лог. 0 через выходной каскад протекает только ток нагрузки.

Во входной цепи многоэмиттерного транзистора VT1 включены дополнительные диоды -  $VD_0 - VD_{n-1}$ , которые защищают элемент от появления на его входе недопустимых напряжений обратной полярности.

Нелинейная цепь коррекции R3, R4 и VT3 позволяет увеличить быстродействие элемента и приблизить его АПХ к прямоугольной. Последнее улучшает формирующие свойства элемента.

**Особенности(+стат. параметры)**

-напряжение, присутствующее на выходе у, ЛЭ, близко к напряжению питания и определяется выражением

$$U_{вых}^1 = U_{п} - I_{в.ах} R_5 - U_{КЭ VT4} - U_{1D_n}$$

для ограничения “сквозного тока” в коллекторную цепь VT5 включен резистор R5, однако чрезмерно увеличение сопротивления этого резистора, во-первых, увеличивает мощность рассеиваемую в элементе, и, во-вторых, уменьшает его нагрузочную способность. один резистор используется для подключения

$$R_{доп} \leq \frac{U_{п} - U_{вх min}}{n I_{вх max}}$$

нескольких входов ЛЭ

Величина макс. Вытекающего вх. Тока

$$I_{макс} = (E_{п} - U_{бэ1})/R_1$$

#### Разновидность

Элемент И—НЕ с открытым коллектором предназначен для согласования логических схем с внешними исполнительными и индикаторными устройствами

Элемент И—НЕ с повышенной нагрузочной способностью предназначен для использования в случаях, когда коэффициента разветвления стандартного элемента ТТЛ недостаточно для передачи выходного сигнала всем потребителям.

