

# 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 п-р-п и б) для р-п-р. Вых напряжение также может сниматься с дополнительного резистора  $R_H$ . рис 6.2

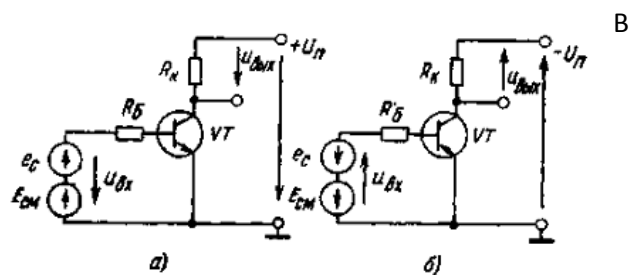


Рис. 6.1. Обобщенная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе типов п-р-п (а) и р-п-р (б)

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

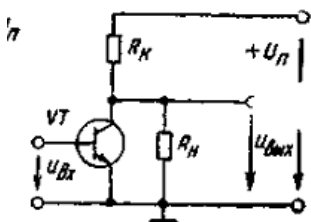


Рис. 6.2. Усилительный каскад с внешней нагрузкой

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.

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

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

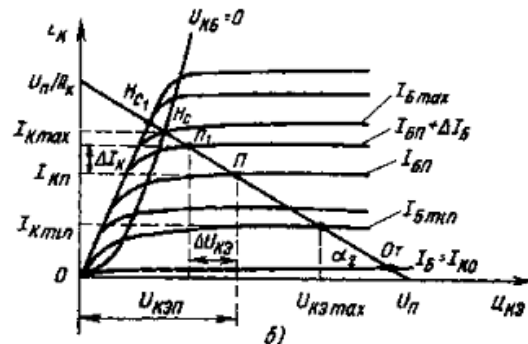
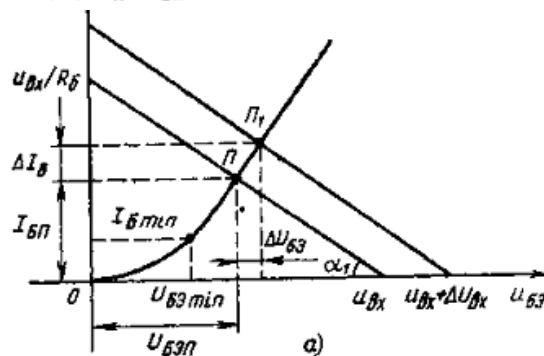
$$\Delta U_{вых} = \Delta U_{кэ} = h_{213} \Delta I_B R_K;$$

$$\Delta U_{вх} = \Delta U_{бэ} = \Delta I_B R_{вх}.$$

Коэффициент усиления

$$K_{U_K} = h_{213} R_K / R_{вх}$$

С



учетом балластного сопротивления

$$K_{U0} \approx K_{U_K} K_{дел} = h_{213} R_K / (R_B + R_{вх}),$$

Входное и выходное сопротивление:

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

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

Для схемы на рис 6.2

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

## 2. Операционный усилитель, схема.

### Общие сведения и классификация.

В настоящее время разработано большое число АИС (аналоговых интегральных схем) как общего, так и специального назначения: АИС усилителей постоянного тока (операционных усилителей), схем сравнения (компараторов), источников питания (непрерывных стабилизаторов напряжения). Специализированные АИС, предназначенные для построения бытовой аппаратуры: для звуковоспроизводящей и радиоприемной аппаратуры, и аппаратуры магнитной записи. Основой большинства из них является схемотехника дифференциального усилителя постоянного тока. Дифференциальный усилитель в настоящее время является основным схемотехническим элементом современной интегральной аналоговой электроники и наиболее массовым типом АИС.

**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):

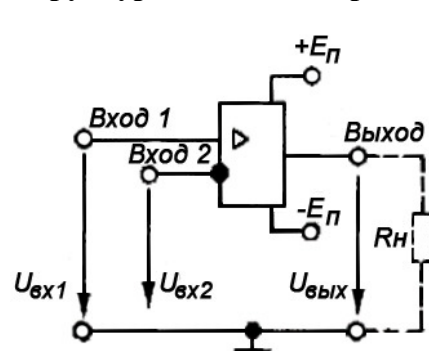
- коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  стремится к бесконечности ( $K_U \rightarrow \infty$ );
- входное сопротивление стремится к бесконечности ( $R_{\hat{A}\hat{O}} \rightarrow \infty$ );
- выходное сопротивление стремится к нулю ( $R_{\hat{A}\hat{O}} \rightarrow 0$ );
- если входное напряжение равно нулю, то выходное напряжение также равно нулю ( $U_{\hat{A}\hat{O}} = 0 \rightarrow U_{\hat{A}\hat{O}} = 0$ );
- бесконечная полоса усиливаемых частот ( $f_{\hat{A}} \rightarrow \infty$ ).

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.

История названия ОУ связана с использованием в аналоговой вычислительной технике для реализации математических операций: суммирования, интегрирования и др. В настоящее время эти функции составляют лишь малую часть списка возможных применений ОУ.

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.

### Структурная схема операционного усилителя.



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

$$U_{\hat{A}\hat{O}} = K_{U0}(U_{\hat{A}\hat{O}1} - U_{\hat{A}\hat{O}2})$$

где  $K_{U0}$  —

собственные коэффициенты усиления ОУ по напряжению.

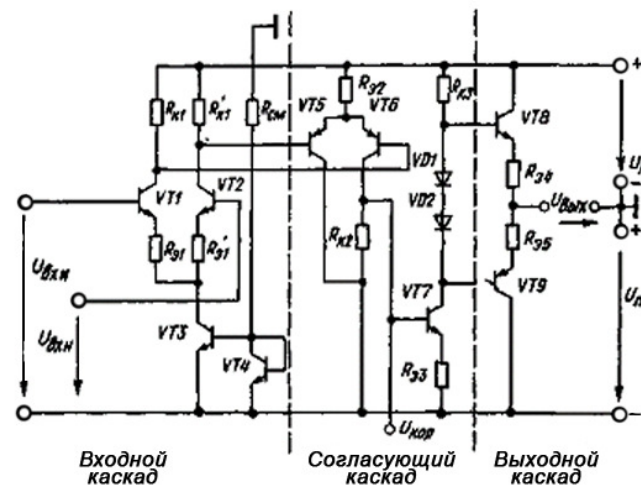
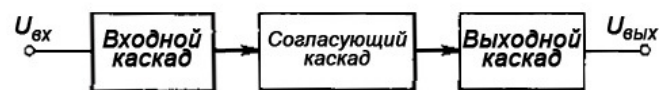


Рис. 7.3. Упрощенная схема трехкаскадного ОУ



Следовательно, 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).

$K_{U0}$  в ОУ должен стремиться к бесконечности, на практике ограничивается значением  $10^5 \dots 10^6$  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 трехкаскадных 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  $R_{см}$  «токового зеркала» питается от одного источника питания ОУ. Резисторы  $R_z$  и  $R_z'$ , 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 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  $R_{K3}$  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  $R_{э4}$  и  $R_{э5}$  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, выходным выводом, выводом для подключения внешней коррекции  $U_{кор}$  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.

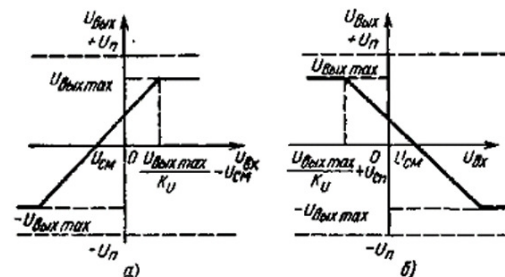


Рис. 7.4. Передаточные характеристики ОУ по неинвертирующему (а) и инвертирующему (б) входам

7.4, а, б приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинверт. и инверт. входов. Из этих х-к следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ( $U_{вых max}$ ) 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  $K_{U0}$  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  $K_{U0}$  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 (см. § 6.6). 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 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 «токового 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 Cкор, шунтирующим коллекторный переход транзистора VT8.

В настоящее время серийно выпускаются интегральные ОУ, выполненные по двух- и трехкаскадным схемам.

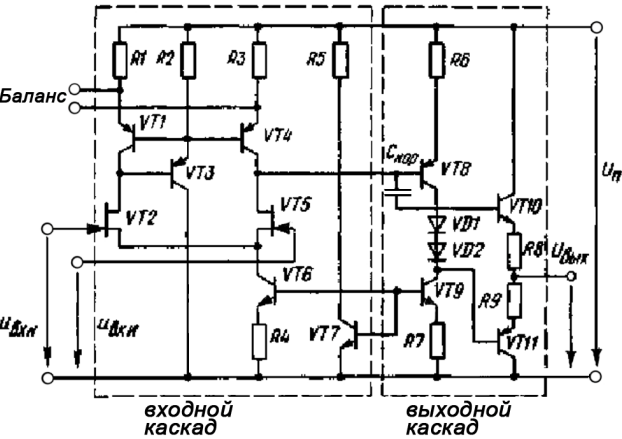


Рис. 7.5. Упрощенная схема двухкаскадного ОУ

И—НЕ может быть представлен последовательным соединением трех каскадов:

- одного многоэмиттерного транзистора VT1 с резистором R1 и диодами VDo – VДn-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,,.

Рассмотрим более подробно назначение отдельных элементов схемы.

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

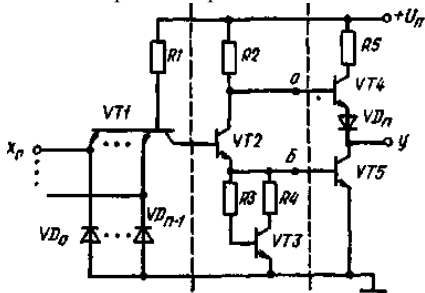


Рис. 19.6. Принципиальная электрическая схема ЛЭ И—НЕ ТТЛ (штрих Шеффера)

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 - VDo – VДn-1, которые защищают элемент от появления на сто 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)

$U_{вх}^1 = U_{п} - I_{в.лх} R_5 - U_{кэ VT4} - U_{1D_n}$  -напряжение,

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

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

$$R_{дсп} \leq \frac{U_{п} - U_{вх \min}}{I_{вх \max}},$$

нескольких входов ЛЭ

$$I_{макс} = (E_{п} - U_{бэ1})/R_1$$

Величина макс. Вытекающего вх. Тока

(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 потр

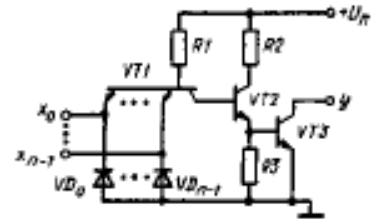


Рис 19.10 Принципиальная электрическая схема ЛЭ И—НЕ ТТЛ с открытым коллектором

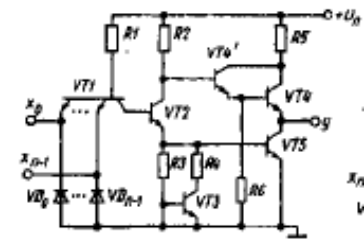


Рис. 19.11. Принципиальная электрическая схема ЛЭ И—НЕ ТТЛ с повышенной нагрузочной способностью

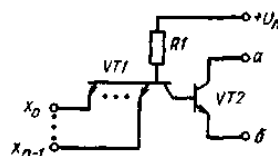


Рис 19.7. Принципиальная электрическая схема расширителя по ИЛИ