

**Тема**

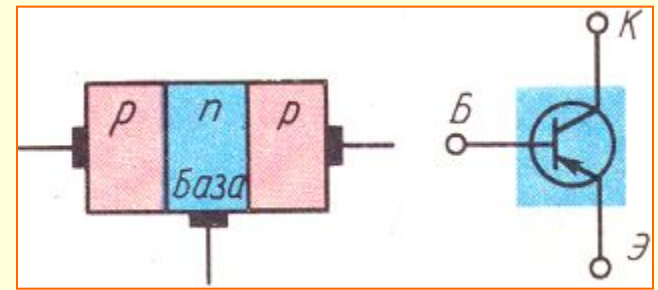
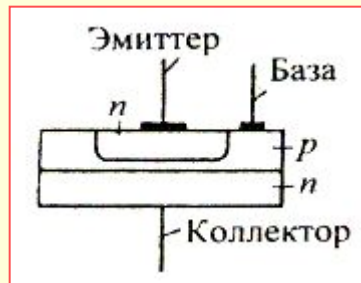
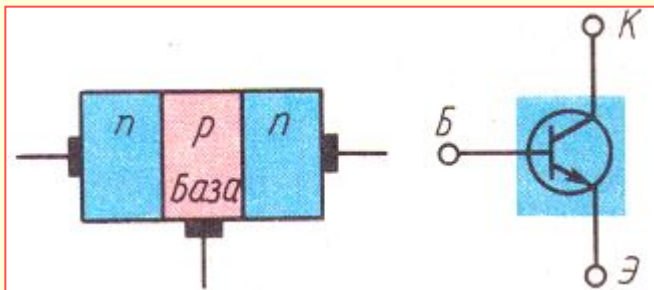
**Транзисторы и  
электронные схемы на их  
основе**

**Разработал к.т.н. доц. Никаноров В.Б.**



# 1. Общие сведения

- **Транзистор** – управляемый п/п НЭ, предназначенный для **усиления сигнала по мощности**.
- Транзисторы:
  - ◆ биполярные;
  - ◆ униполярные (полевые).
- **Биполярные транзисторы**
  - трехслойная структура с чередующимися типами эл.проводности
  - с двумя р-п переходами.
- Выполняют из **кремния**, реже **германия**.
- Различают биполярные транзисторы **двух типов: n-p-n и p-n-p**



**База (Б)** - средняя область между двумя р-п переходами с малой толщиной.

**Эмиттер (Э)** с высокой концентрацией основных носителей – создает ток.

**Коллектор (К)** с несколько меньшей концентрацией основных носителей служит для приема носителей от Э.

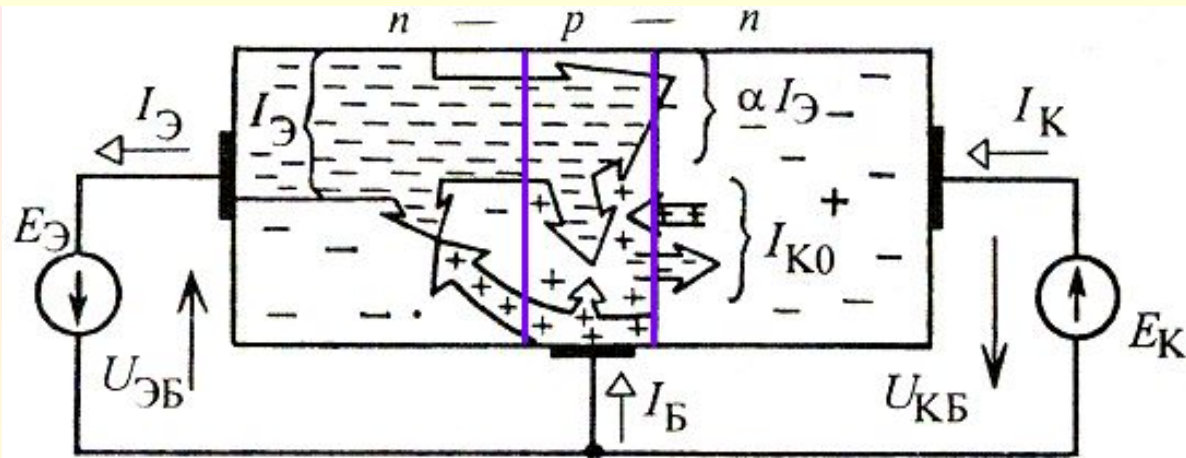
Стрелка показывает направление тока в открытом Т.

**Переход Э-Б – эмиттерный, Б-К – коллекторный.**

В биполярных транзисторах ток определяется движением носителей двух типов: электронов и дырок – отсюда биполярные.

## 2. Принцип действия

- На **переход ЭБ** – напряжение  $U_{ЭБ} = 0..0,6$  В подано в **прямом направлении** («-» с Э, «+» Б).
- На **переход КБ** – напряжение  $U_{КБ} = 10..30$  В – в **обратном направлении** («+» К, «-» Б) – **рабочий режим**.



1. При  $U_{ЭБ} = 0$   $I_{Э} = 0$  и через переход КБ протекает **небольшой ток  $I_{К0}$** , обусловленный движением неосновных носителей (дырочек из К в Б, электронов из Б в К.), аналогичный обратному току в диоде:  $I_{К0} = 10...100$  мкА – у герман Т., и **существенно меньше**  $0,1...10$  мкА у **кремниевых Т.**

$I_{К0}$  **возрастает** с увеличением **температуры** (тепловой ток).

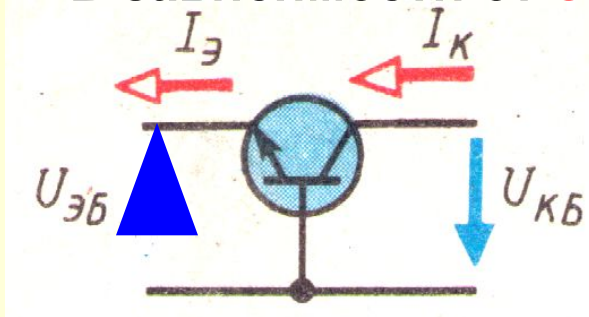
2. При подключении  $U_{ЭБ} = 0..0,6$  В в **прямом направлении** возникает **эмиттерный ток  $I_{Э}$**  из основных носителей (электронов) – (аналогия с  $U_{пр}$  диода.).

3. **Часть электронов** (несколько %)  $I_{Э}$  **рекомбинирует** с дырками тонкой базы и не доходит до коллекторного перехода, образуя **небольшой  $I_{Б}$**

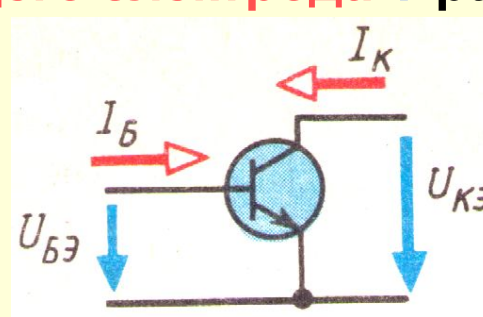
- 4. Большая часть электронов попадает в К, образуя коллекторный ток  $I_K = \alpha \cdot I_{\text{э}}$ , где  $\alpha = 0,9 \dots 0,995$  – коэффициент передачи тока.
- 5. Коллекторный ток  $I_K = I_{\text{к0}} + \alpha \cdot I_{\text{э}}$
- 6. Количество электронов в  $I_{\text{э}}$  определяется напряжением  $U_{\text{эБ}}$ , напряжение  $U_{\text{БК}}$  только ускоряет электроны, не увеличивая их количества:  $I_{\text{э}}$  от  $U_{\text{БК}}$  зависит мало.

# 3. Схемы включения транзисторов

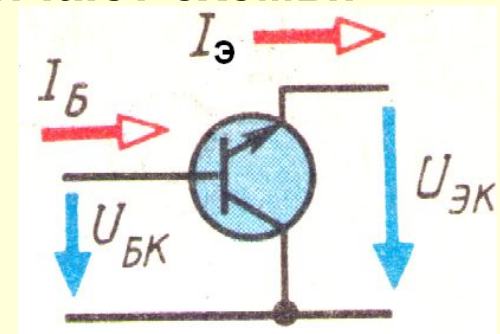
В зависимости от общего электрода **T** различают схемы:



ОБ



ОЭ

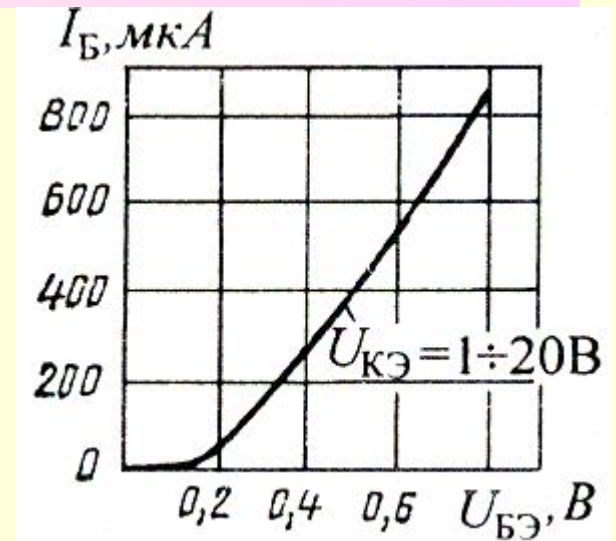


ОК

- ❖ **Схема с ОБ** – используют редко. Недостатки: большой входной ток ( $I_Э$ ), малое входное сопротивление, малое усиление по току  $K_I \leq 1$ .  
Преимущества: высокая стабильность в работе.
- ❖ **Схема с ОЭ** – наибольшее распространение.
  - Преимущества: мал входной ток, высокие  $K$  усиления,
- ❖ **Схема с ОК** - обладает высоким входным и малым выходным сопротивлением, мал коэффициент усиления по напряжению  $K_U \leq 1$ 
  - Каскад с ОЭ – усилительный, с ОК – повторитель напряжения, с ОБ – повторитель тока.

## 4. ВАХ в схеме с ОЭ

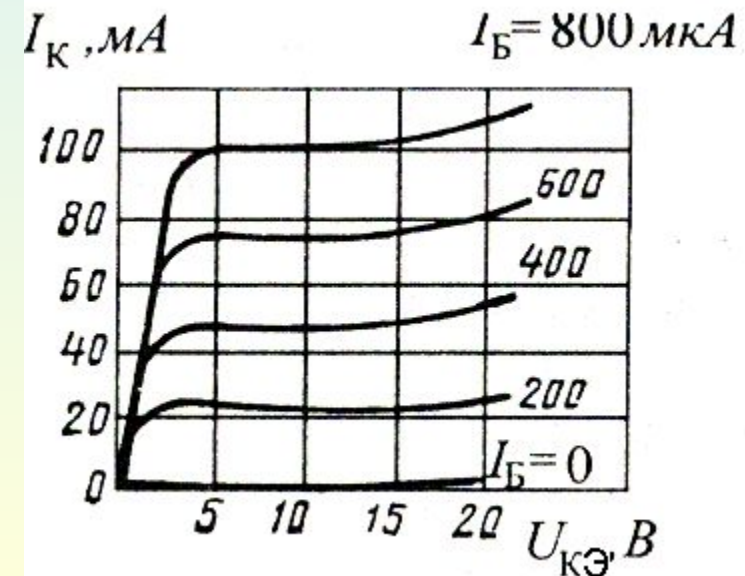
- **Транзистор** – управляемый НЭ, характеризуется двумя ВАХ.
- **Входная (базовая) ВАХ** –  $I_B(U_{БЭ})$  – аналогична ВАХ диода. Практически не зависит от  $U_{КЭ}$ .



- **Семейство выходных ВАХ** –  $I_K(U_{КЭ})$   
 $I_B = \text{const}$ ,
- в широком диапазоне  $U_{КЭ}$  прямолинейны.

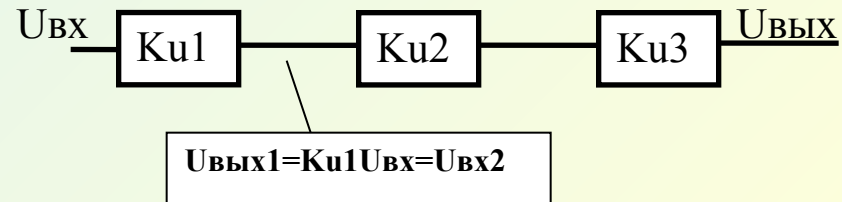
Описываются уравнением  $I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{K0}$

$\beta = \alpha / (1 - \alpha) = 20 \dots 200$  (до 1000) – коэффициент передачи тока из базы в коллектор.



# 5. Электронные усилители

- - устройство, предназначенное для повышения мощности входного сигнала.
- Простейший усилительный каскад содержит:
  - Источник постоянного тока, за счет энергии которого происходит усиление мощности входного сигнала;
  - Транзистор;
  - Цепи смещения, обеспечивающие режим транзистора по постоянному току (режим покоя).
- Основные характеристики усилительного каскада.
  - ❖ Коэффициент усиления по току  $K_I = i_{\text{ВЫХ}} / i_{\text{ВХ}} \Rightarrow (10 \dots 20)$ ;
  - ❖ Коэффициент усиления по напряжению  $K_U = u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}} \Rightarrow (10 \dots 20)$ ;
  - ❖ Коэффициент усиления по мощности  $K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_U \cdot K_I \Rightarrow (100 \dots 400)$
  - ❖ Коэффициенты усиления могут выражаться в логарифмических единицах – децибелах  $K_{u,l} \text{ (дБ)} = 20 \lg(K_{u,l})$ ;  $K_p \text{ (дБ)} = 10 \lg(K_p)$
- Многокаскадные усилители – для получения высокого  $K_U$  (тысячи...миллионы)
- $K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \cdot \dots \cdot K_{Un}$
- Связь между каскадами –
  - для УПТ – гальваническая или R,
  - в усилителях переменного тока – через R-С.



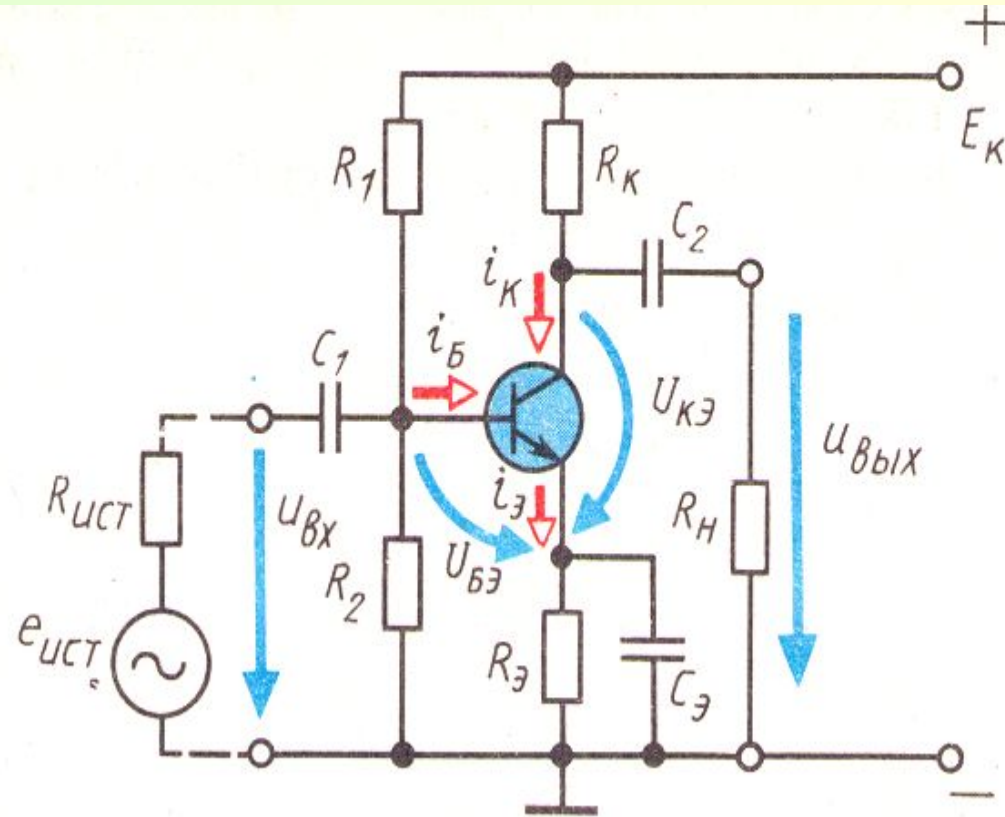
## 6. Усилительный каскад с ОЭ

- Содержит:

- Биполярный транзистор n-p-n типа, включенный по схеме с ОЭ (Э – общий электрод для входной и выходной цепи.)

- источник постоянного тока  $E_k = 10..30 \text{ В}$ , для усиления входного сигнала по мощности.

- Коллекторное сопротивление  $R_k$ , ограничивает ток в коллекторной цепи, на нем  $U_{\text{вых}}$ .



- Делитель на  $R_1-R_2$ , обеспечивает требуемое  $U_B$  в режиме покоя, на постоянном токе, когда  $U_{\text{вх}}=0$ :  $U_B = E_k R_2 / (R_2 + R_1)$

- $C_1$  и  $C_2$  – разделительные конденсаторы:  $C_1$  не пропускает постоянный ток в источник сигнала,  $C_2$  – в нагрузку.

- $R_3$  и  $C_3$  – цепочка термостабилизации.

- источник входного сигнала  $e_{\text{ист}}$  с внутренним сопротивлением  $R_{\text{ист}}$ .



# Принцип действия

- Для анализа использованы входная  $I_B(U_B)$  и выходная  $I_K(U_K)$  ВАХ.
- Коллекторная цепь представляет последовательно соединенные  $R_k$  с управляемым НЭ – транзистором. По 2 закону Кирхгофа
- $E_k = U_k + I_k R_k$
- Расчет такой нелинейной ЭЦ проводим графически методом пересечений

$$I_K = \frac{E_K - U_K}{R_K}$$

- линейно зависит от  $U_k$

**Линию нагрузки** - по 2 точкам:

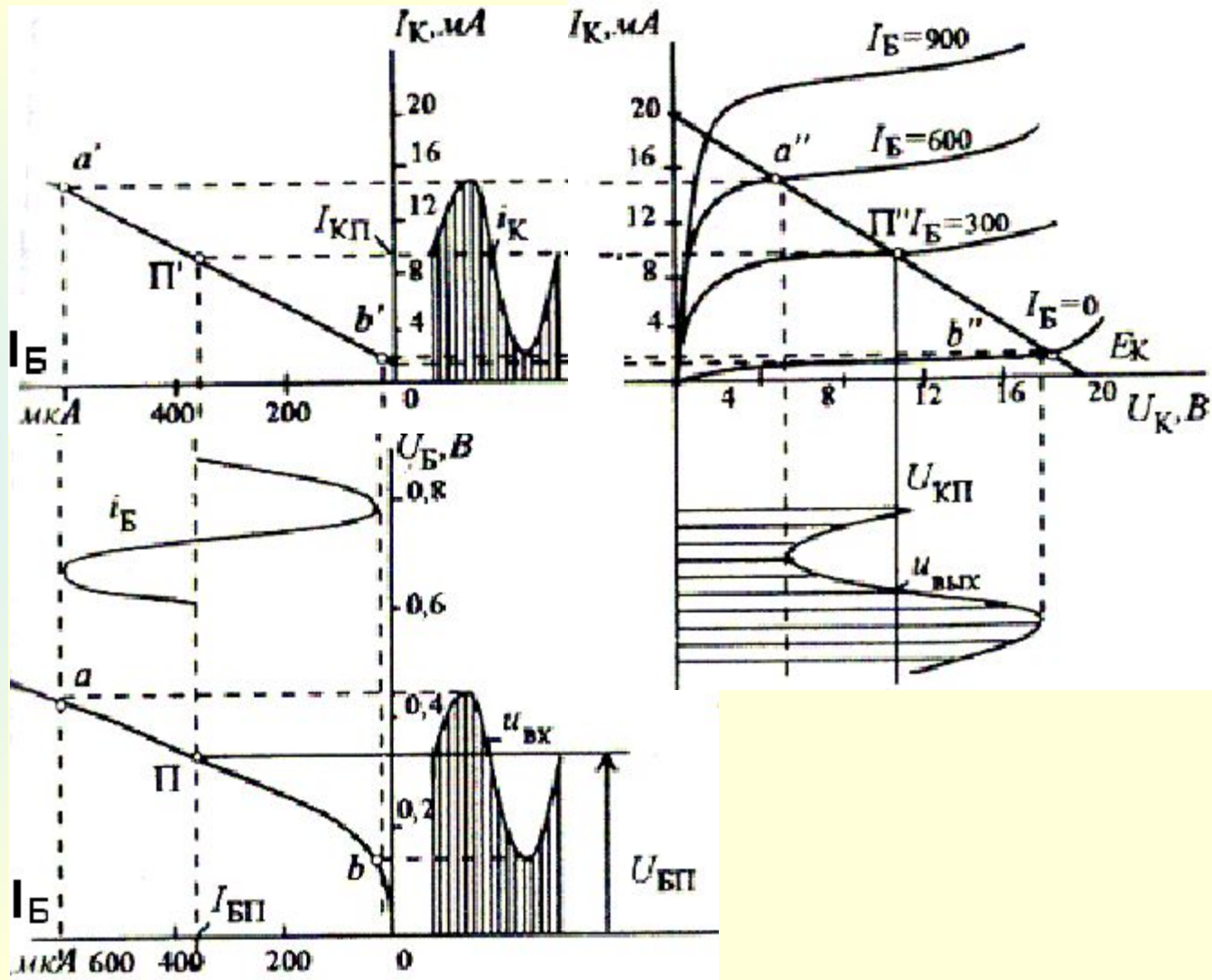
1) При  $I_k=0$   $U_k=E_k$ , 2) при  $U_k=0$ ,  $I_k=E_k/R_k$

Для анализ строим **переходную характеристику**  $I_k(I_B)$ , по точкам пересечений линии нагрузки с семейством выходной ВАХ.

При  $e_{вх}=0$  подбором резисторов  $R1$  и  $R2$  на **постоянном токе** определяют  $U_{БП}$ , при котором точка покоя (П) находится посередине линейной части передаточной и входной ВАХ. При этом **минимизируются нелинейные искажения**.

1. Входной сигнал  $U_{ВХ}$  - на базу и по входной ВАХ происходит изменение базового тока  $i_B$ . Если, например, амплитуда  $U_{ВХ} = 0,15$  В, то амплитуда  $i_B = 240$  мкА, и  $P_{ВХ} = 26 \cdot 10^{-6}$  Вт.

2. При изменении  $i_B$  меняется  $i_k$  в соответствии с линейным участком  $a' - b'$  переходной характеристики



3. При изменении  $I_k$  в соответствии с линией нагрузки меняется  $U_{ВЫХ}$ . Амплитуда  $I_k = 6$  мА и  $U_{ВЫХ} = 6$  В, т.е.  $P_{ВЫХ} = 25,5 \cdot 10^{-3}$  Вт и сигнал усиливается в 1000 раз по мощности,  $K_u = 6/0.15 = 40$ ;

$K_i = 6 \cdot 10^{-3} / 0.24 \cdot 10^{-3} = 25$ .

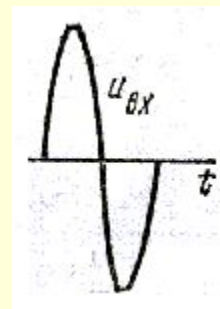
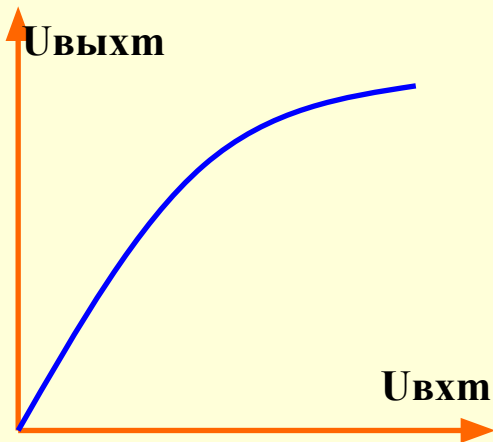
4. Выходной сигнал находится в противофазе с входным сигналом.

# 7. Нелинейные искажения

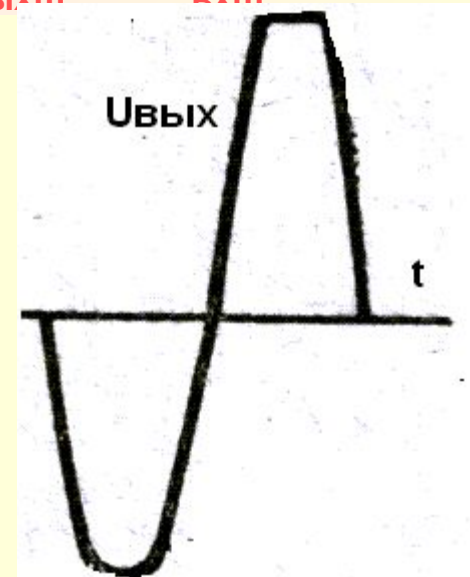
- Если изменения  $U_{вх}$ ,  $I_{Б}$  и  $I_{К}$  укладываются в линейные участки входной и переходной характеристик, то форма выходного напряжения соответствует форме  $U_{вх}$ .
- $U_{вх}$  – синусоида  $\rightarrow$   $U_{вых}$  – синусоида  
Нелинейных искажений нет!

При больших  $U_{вх}$  токи выходят за пределы линейных участков входной и переходной характеристик и форма  $U_{вых}$  существенно искажается  $\Rightarrow$  **нелинейные искажения**.

Для оценки диапазона  $U_{вх}$ , усиливаемых без искажения, строят **амплитудную характеристику** – зависимость  $U_{выхм}$  от  $U_{вхм}$



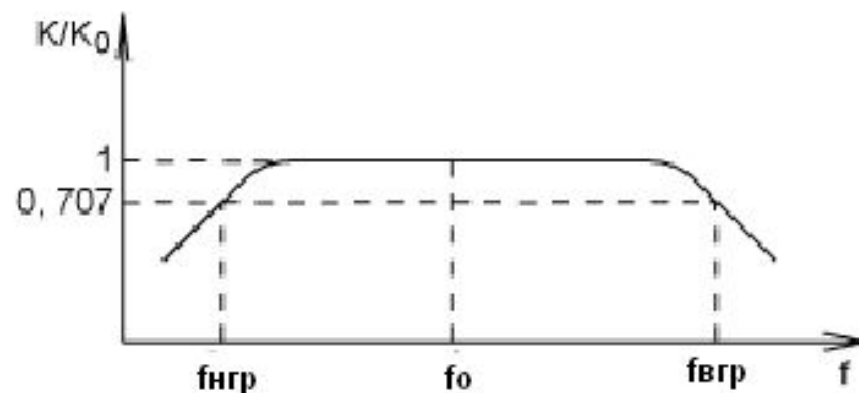
Никаноров В.Б.



# 8. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

– зависимость модуля  $K_u$  от частоты при  $U_{вх} = \text{const}$ .

При изменении частоты на  $K_u$  влияют частотные свойства транзисторов, емкостные сопротивления  $C$  связи и паразитные емкости в усилителе.

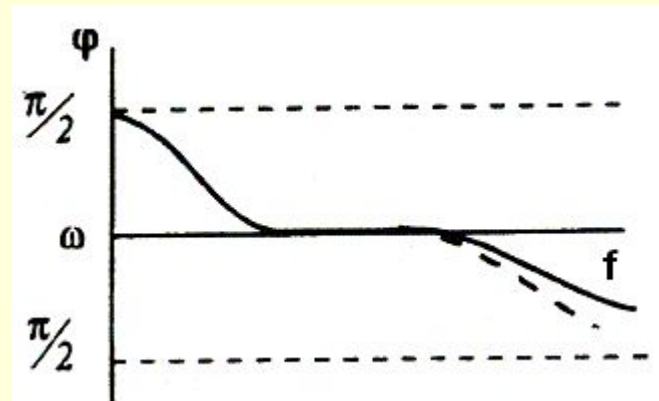


- Снижение  $K_u$  в области нижних и верхних частот называют **частотными искажениями**: при усилении несинусоидального сигнала отдельные гармоники  $U_{вх}$  усиливаются по-разному из-за неравномерности АЧХ. И форма усиливаемого  $U$  искажается.
- Частотные искажения оцениваются **коэффициентом частотных искажений  $M=K_0/K$** , которое принимается равным  $\sqrt{2}$ .
- Частоты  $f_{нгр}$  и  $f_{вгр}$ , соответствующие допустимым значениям коэффициента  $M$ , называют **нижней и верхней граничными частотами**,
- а диапазон частот, в котором  $M < \sqrt{2}$ , называют **полосой пропускания усилителя**.

$$\Delta f = f_{вгр} - f_{нгр}$$

# 9. Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

- - показывает, что в области нижних частот  $U_{вх}$  опережает по фазе  $U_{вх}$ , а в области верхних частот отстает от него.
- В предельных случаях при  $f \rightarrow 0$   $\varphi \rightarrow \pi/2$ , а при  $f \rightarrow \infty$   $\varphi \rightarrow -\pi/2$ ,



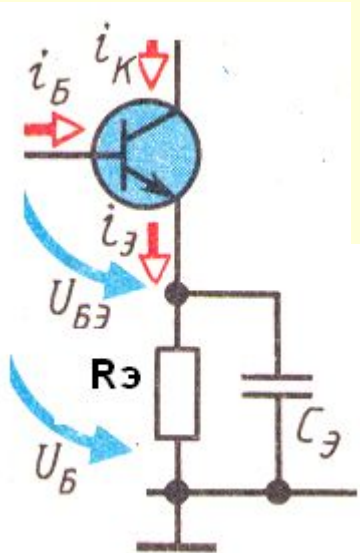
# 10. Температурная стабилизация

- Существенный недостаток биполярного транзистора – зависимость параметров от температуры.
- При повышении  $T$  возрастает  $I_{K0}$ , изменяются коллекторные характеристики, что вызывает смещение рабочей точки за пределы линейного участка переходной характеристик и приводит к нелинейным искажениям.
- Для уменьшения влияния  $T$  в цепь эмиттера включают  $R_э$ .
- При введении  $R_э$   $U_{БЭ} = U_B - R_э I_э$

При  $\uparrow T \uparrow I_K (I_э) \downarrow U_{БЭ}$ , что приводит к  $\downarrow I_B$  и  $\downarrow I_K$ , т.е. к частичной стабилизации режима транзистора.

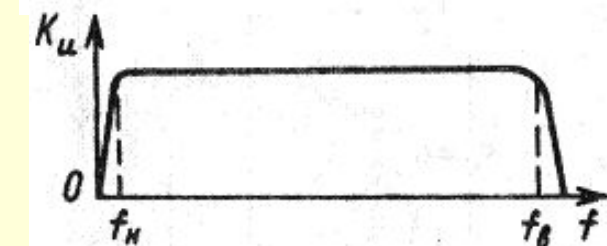
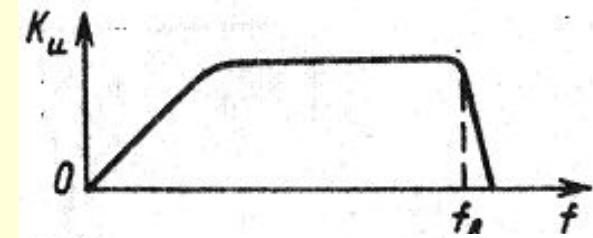
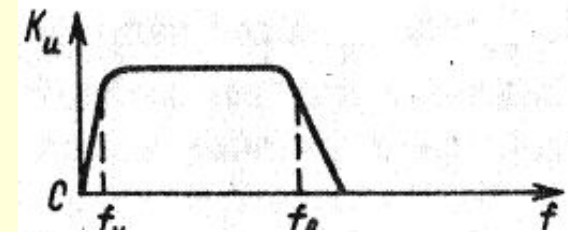
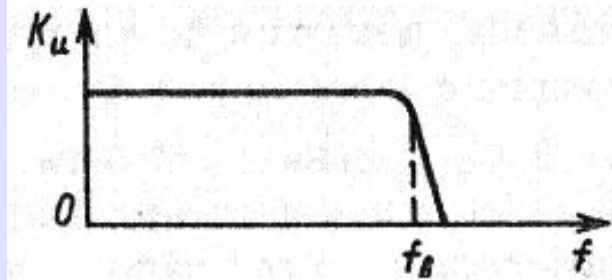
Но падение напряжения на  $R_э$  на переменном токе, снижает  $K_u$ , что нежелательно.

Параллельно  $R_э$  включают  $C_э$ , при этом  $X_{C_э} \ll R_э$ , что снижает падение напряжения на  $R_э$  и повышает  $K_u$ .



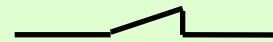
# 11.Классификация усилителей

- Коэффициент усиления  $K_u(f)$  в общем случае зависит от частоты (АЧХ).
- По типу АЧХ различают усилители:
- 1. Усилители постоянного тока (УПТ) – нижняя граница по частоте  $f_H=0$ , верхняя  $f_B=10^3..10^8$ Гц.
- 2. Усилитель низких частот (УНЧ):  $f_H=20..50$  Гц,  $f_B=10^4..2 \cdot 10^4$ Гц.
- 3. Усилитель высоких частот (УВЧ):  $f_H=10^4.. 10^5$  Гц,  $f_B=10^7..10^8$ Гц.
- 4. Широкополосный усилитель
- $f_H=20..50$  Гц,  $f_B=10^7..10^8$ Гц.



# 12. Режимы работы транзисторов

- 1. **Активный режим** в усилителях.
- Э Б - смещен в прямом направлении
- - + (для n-p-n транзисторов)
- Б К – смещен в обратном направлении
- - +
- 2. **Режим насыщения – транзистор открыт**  $I_{ЭК}$  – максимален.
- Э Б - смещен в прямом направлении
- - + (для n-p-n транзисторов)
- Б К – смещен в прямом направлении
- + -
- 3. **Режим отсечки – транзистор закрыт**,  $I_{ЭК} \Rightarrow 0$
- Э Б - смещен в обратном направлении
- + - (для n-p-n транзисторов)
- Б К – смещен в обратном направлении
- - +



В режимах насыщения и отсечки управление в транзисторе отсутствует, напряжение и ток определяются компонентами внешней цепи.



# 13. Обратные связи в усилителях

- подача части выходного сигнала усилителя на его вход.

**ПОС**  $\Rightarrow U_{\text{вх}}$  складывается (в фазе) с  $U_{\text{ос}}$

$$U_1 = U_{\text{вх}} + U_{\text{ос}}$$

**ООС**  $\Rightarrow$  из  $U_{\text{вх}}$  вычитается (в противофазе)

$$U_{\text{ос}} \Rightarrow U_1 = U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}}$$

**ПОС** – в генераторах. **ООС** – в усилителях.

**Коэффициент усиления.**

Без ОС  $K_u = U_{\text{вых}} / U_1$  Коэффициент передачи звена ОС  $\alpha_{\text{ос}} = U_{\text{ос}} / U_{\text{вых}}$

При наличии ОС

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{и}} \cdot U_1 = k_{\text{и}} (U_{\text{вх}} \mp \alpha_{\text{ос}} U_{\text{вых}})$$

Делим на  $U_{\text{вх}}$

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = k_{\text{иос}} = k_{\text{и}} (1 \mp \alpha_{\text{ос}} \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}})$$

**Коэффициент усилителя с ОС**

$$k_{\text{иос}} = \frac{k_{\text{и}}}{1 \pm k_{\text{и}} \alpha_{\text{ос}}}$$

«+» - ООС

«-» - ПОС



- При глубокой ООС ( $k_u \gg 1$ )  $k_{иос} = \frac{1}{\alpha_{ос}}$

Коэффициент усиления определяется только звеном ОС, состоящим из R и C, которые могут выполнены очень термостабильными..

**ООС** существенно улучшает свойства усилителя:

- Повышается стабильность  $K_u$  при изменении параметров транзисторов,
- Снижается уровень нелинейных искажений,
- Увеличивается входное и уменьшается выходное сопротивления,
- Расширяется полоса пропускания усилителя
- Но при этом уменьшается коэффициент усиления.

При **ПОС**:

- ◆ Увеличивается коэффициент усиления,
- ◆ Но существенно снижается стабильность  $K_u$  и в усилителях не используется.

# 14. Дрейф нуля

- – изменение выходного напряжения  $U$  при закороченных входных зажимах, т.е. при  $U_{вх} = 0$ .

- специфичный недостаток УПТ, которые используются в измерительной технике для усиления сигналов порядка долей герц.

- **Причины:**

- Нестабильность источников питания,
- Неточная компенсация температурной нестабильности;
- Старение транзисторов;
- Изменение температуры.

При этом усилитель без искажения воспроизводит сигналы  $U_{вх} \gg U_{др}$

- **Меры по уменьшению дрейфа:**
- ◆ Стабилизация источника питания на уровне  $\pm 0,01\%$  уменьшает уровень  $U_{др}$  до 5...20 мВ/час.
- ◆ Применение дифференциальных УПТ.

# 15. Дифференциальный усилитель ПОСТОЯННОГО ТОКА

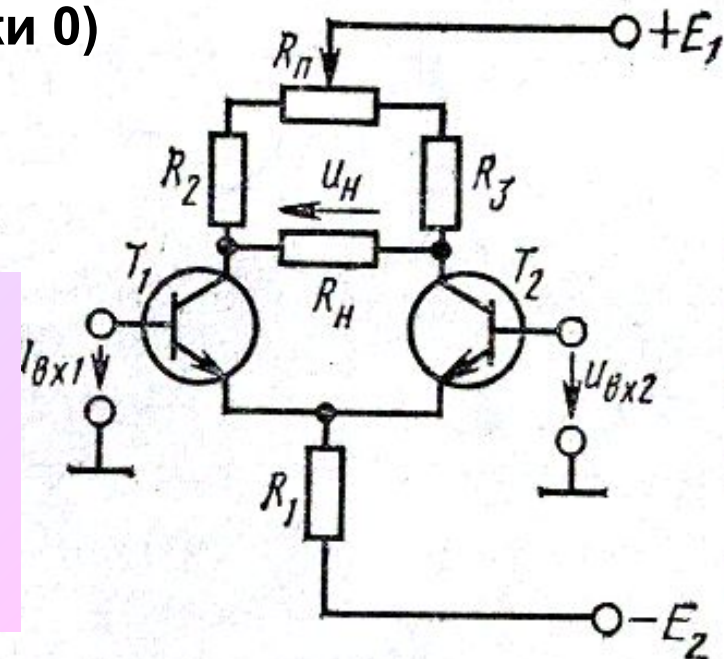
- -выполнен по принципу четырехплечего моста.
- **Требования к элементам схемы:**
  - $R_2 = R_3$
  - Подбирают пары  $T_1$  и  $T_2$  со строго идентичными характеристиками.
  - Режимы пары  $T_1$  и  $T_2$  одинаковы.
  - Стабильность существенно зависит от величины  $R_1$  (чем больше, тем лучше). Вместо  $R_1$  используют стабилизатор тока.
  - Используют два источника ЭДС с  $E_1 = E_2$  ( $E_1$  – коллекторная,  $E_2$  – смещения ЭДС).

□  $R_{П}$  – для балансировки моста (установки 0)

Требования выполняются, если  $U$  - в виде микросхемы (интегральное выполнение на одном кристалле)

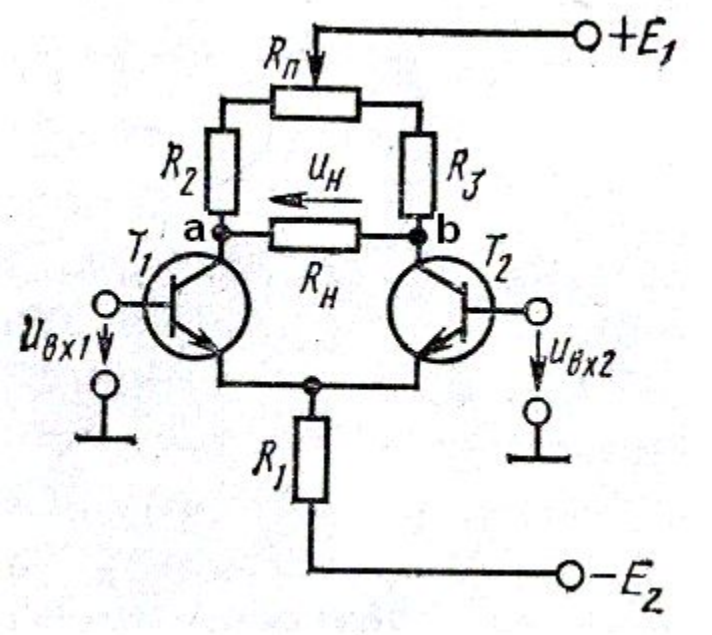
А) При изменении  $E_1$  и  $E_2$  меняются токи обеих  $T$  и потенциалы их коллекторов. Если  $R$  и  $T$  идентичны, то ток в  $R_H$  равен 0.

Б) Аналогично и при изменении температуры.



- Удастся уменьшить дрейф в 20..100 раз до 1...20 мкВ/°С.

## Работа дифференциального УПТ



1. При подаче на  $U_{вх1}$  сигнала («+» на базу  $T_1$ ), ток через  $T_1$  возрастает, падение напряжения на  $R_2$   $\uparrow$ ,  $\varphi_a$   $\downarrow$  и ток в  $R_н$  течет от т. b к т.а.

2. При подаче на  $U_{вх2}$  сигнала («+» на базу  $T_2$ ), ток через  $T_2$  возрастает, падение напряжения на  $R_3$   $\uparrow$ ,  $\varphi_b$   $\downarrow$  и ток в  $R_н$  течет от т. а к т.б., т.е. в обратном направлении.

Выходное напряжение в усилителе совпадает по фазе с  $U_{вх1}$  (неинвертирующий вход)

и противофазно напряжению  $U_{вх2}$  (инвертирующий вход).

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

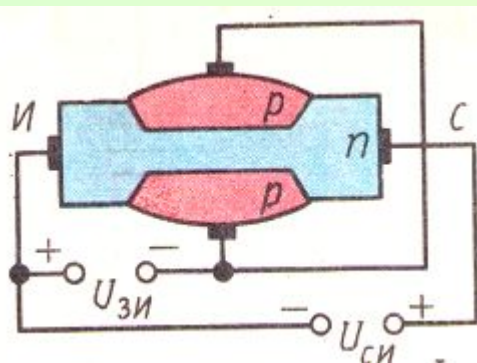
При  $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}}$  выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = 0$

Дифференциальный УПТ – основа операционных усилителей.

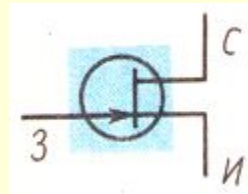
# 16. Полевые (униполярные)

## ТРАНЗИСТОРЫ.

- - **электропреобразовательные приборы**, в которых **ток управляется электрическим полем**, и которые предназначены для усиления входного сигнала по мощности.
- **Полевой транзистор** можно рассматривать как **резистор**, сопротивление которого **изменяется под действием поперечного электрического поля**, **создаваемого** прилегающим к проводящему объему полупроводника **управляющим электродом** (затвором).
- В униполярном транзисторе управляемый ток обусловлен движением основных носителей.
- Применяют два вида полевых транзисторов:
  - с управляющим р-п переходом;
  - с изолированным затвором.
- На рис. показана структура и схема включения **полевого транзистора с управляющим р-п переходом и каналом n типа**.

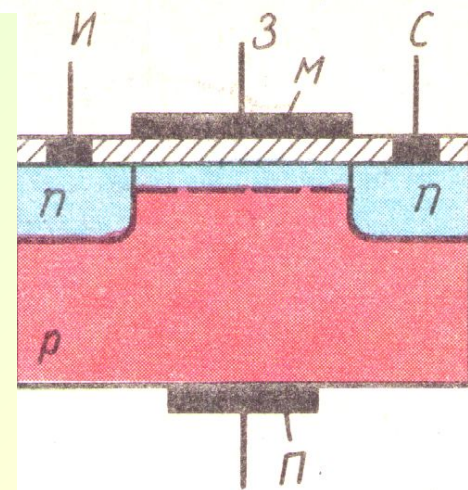


Область канала, от которой начинается движение носителей — **исток (И)**, область канала, к которому движутся носители **сток (С)**. Управляющая область, охватывающая канал — **затвор (З)**.



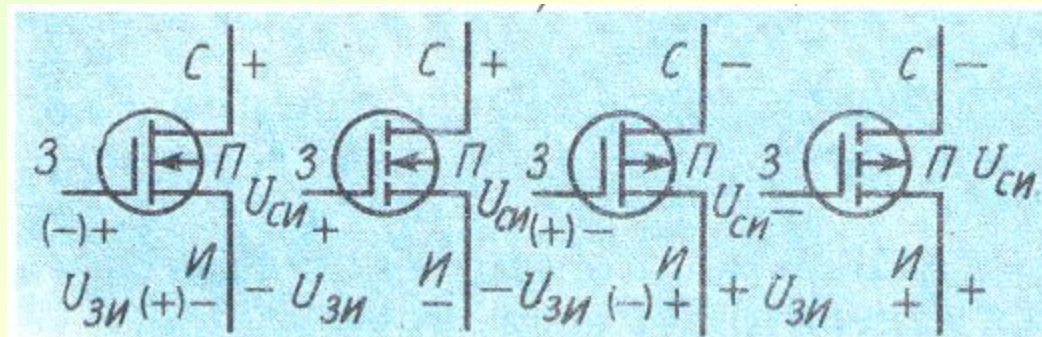
- При увеличении управляющего напряжения  $U_{зи}$  (обратного напряжения на р-п переходе) поперечное сечение канала уменьшается и ток стока  $I_c$  уменьшается.
- Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру: металл (М) – диэлектрик (Д) – полупроводник (П) **МДП**

На подложке р-типа создают область n-типа, к которым подводятся внешние электроды И и С. Между металлическим затвором З и подложкой находится диэлектрик Д, чаще – диоксид кремния. По этой причине МДП структуры часто называют **МОП структурами** (металл – оксид-полупроводник).



Условные обозначения МДП-транзисторов:

- а) встроенный канал n-типа,
- б) с индуцированным каналом n-типа;
- в) встроенный канал р-типа,
- г) с индуцированным каналом р-типа



а)

б)

в)

г)

Отличительная особенность – большое входное сопротивление ( $>10^9$  Ом), что позволяет управлять мощными цепями с помощью маломощного сигнала.