

Кафедра

Электронных и квантовых средств передачи информации

Основы радиотехники

# Лекция №2, 3

Усилительные устройства. Основные понятия и определения.

Лектор: проф. Данилаев Максим Петрович

# КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

- По основному полупроводниковому материалу

Помимо основного полупроводникового материала, транзистор содержит в своей конструкции легирующие добавки к основному материалу, металлические выводы, изолирующие элементы, части корпуса. Однако основными являются транзисторы на основе кремния, германия, арсенида галлия.

Другие материалы для транзисторов до недавнего времени не использовались. В настоящее время имеются транзисторы на основе, например, прозрачных полупроводников для использования в матрицах дисплеев. Перспективный материал для транзисторов — полупроводниковые полимеры.

## ■ По структуре



Биполярные транзисторы бывают двух типов проводимости: *n-p-n* и *p-n-p*:

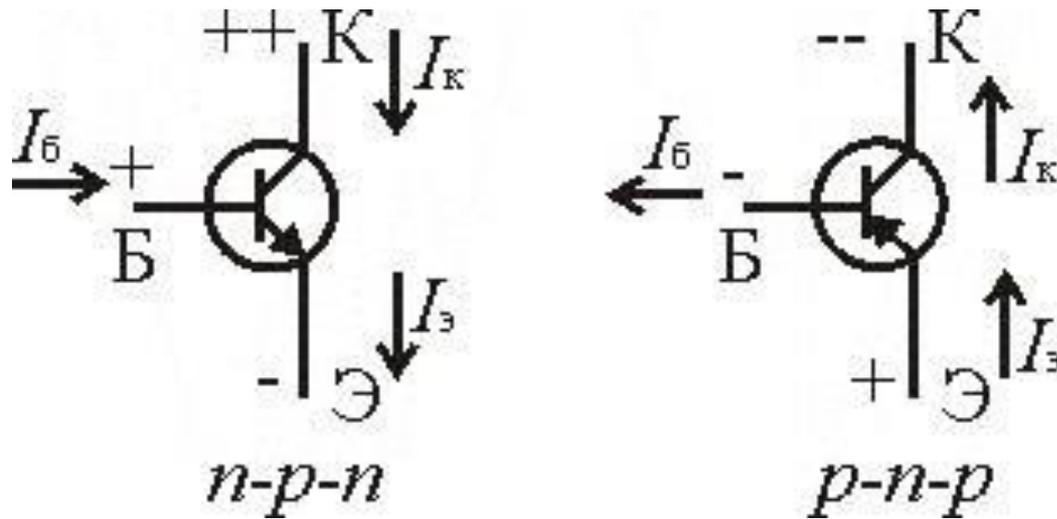


Рис.3.1. Биполярный транзистор: плюсы и минусы обозначают полярность приложенного напряжения (два плюса и два минуса обозначают, что потенциал больше чем там где только один)



- По мощности

- маломощные транзисторы до 100 мВт
- транзисторы средней мощности от 0,1 до 1 Вт
- мощные транзисторы (больше 1 Вт).

# СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

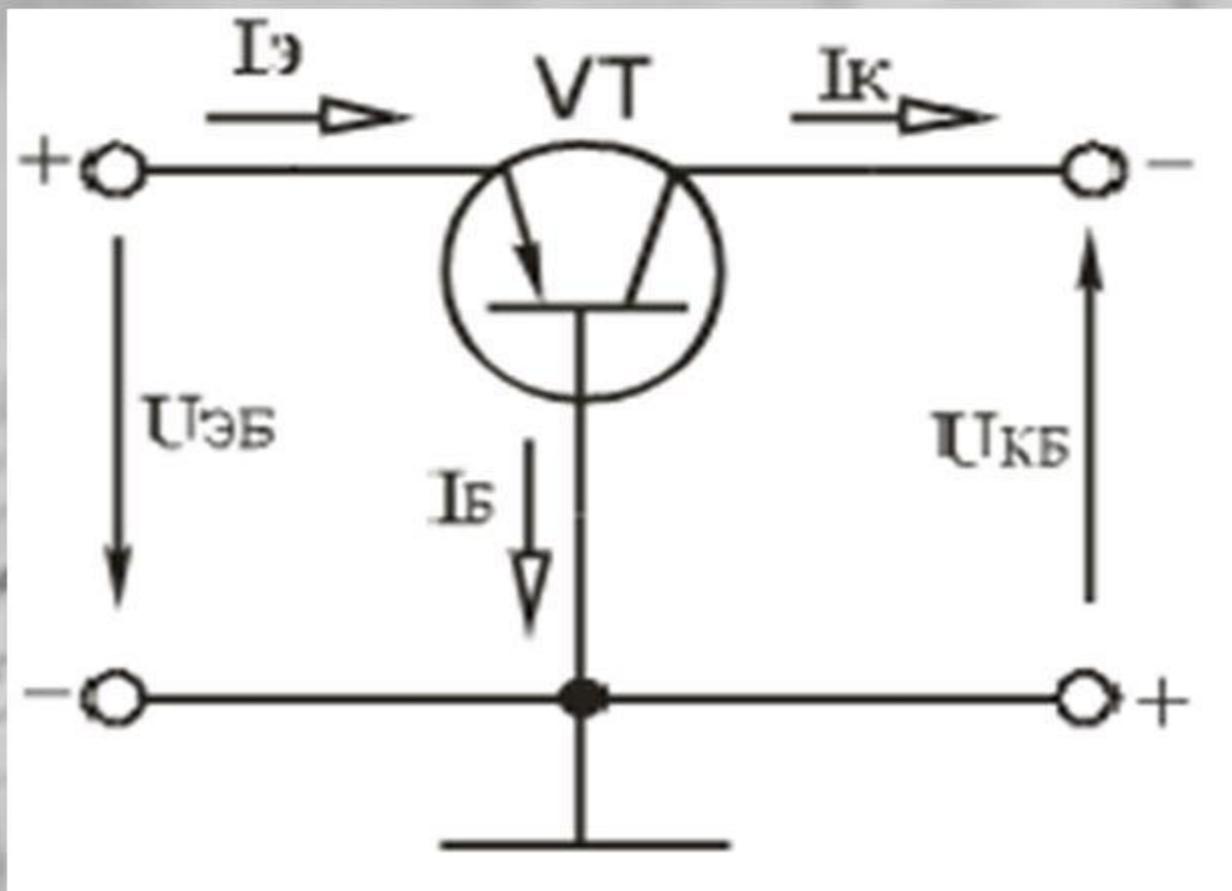
## Схемы включения биполярного транзистора

- **с общим эмиттером (ОЭ)** — осуществляет усиление как по току, так и по напряжению — наиболее часто применяемая схема;
- **с общим коллектором (ОК)** — осуществляет усиление только по току — применяется для согласования высокоимпедансных источников сигнала с низкоомными сопротивлениями нагрузок;
- **с общей базой (ОБ)** — усиление только по напряжению, в силу своих недостатков в одностранзисторных каскадах усиления применяется редко, обычно в составных схемах.

## Схемы включения полевого транзистора

- **с общим истоком (ОИ)** — аналог ОЭ биполярного транзистора;
- **с общим стоком (ОС)** — аналог ОК биполярного транзистора;
- **с общим затвором (ОЗ)** — аналог ОБ биполярного транзистора.

## Биполярных транзисторов в схеме с общей базой



- **Коэффициент усиления** по току:  $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}}/I_{\text{Э}} = \alpha$   
[ $\alpha < 1$ ]
- **Входное сопротивление**  $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{Э}}$ .

Входное сопротивление для схемы с общей базой мало и не превышает 100 Ом для маломощных транзисторов, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

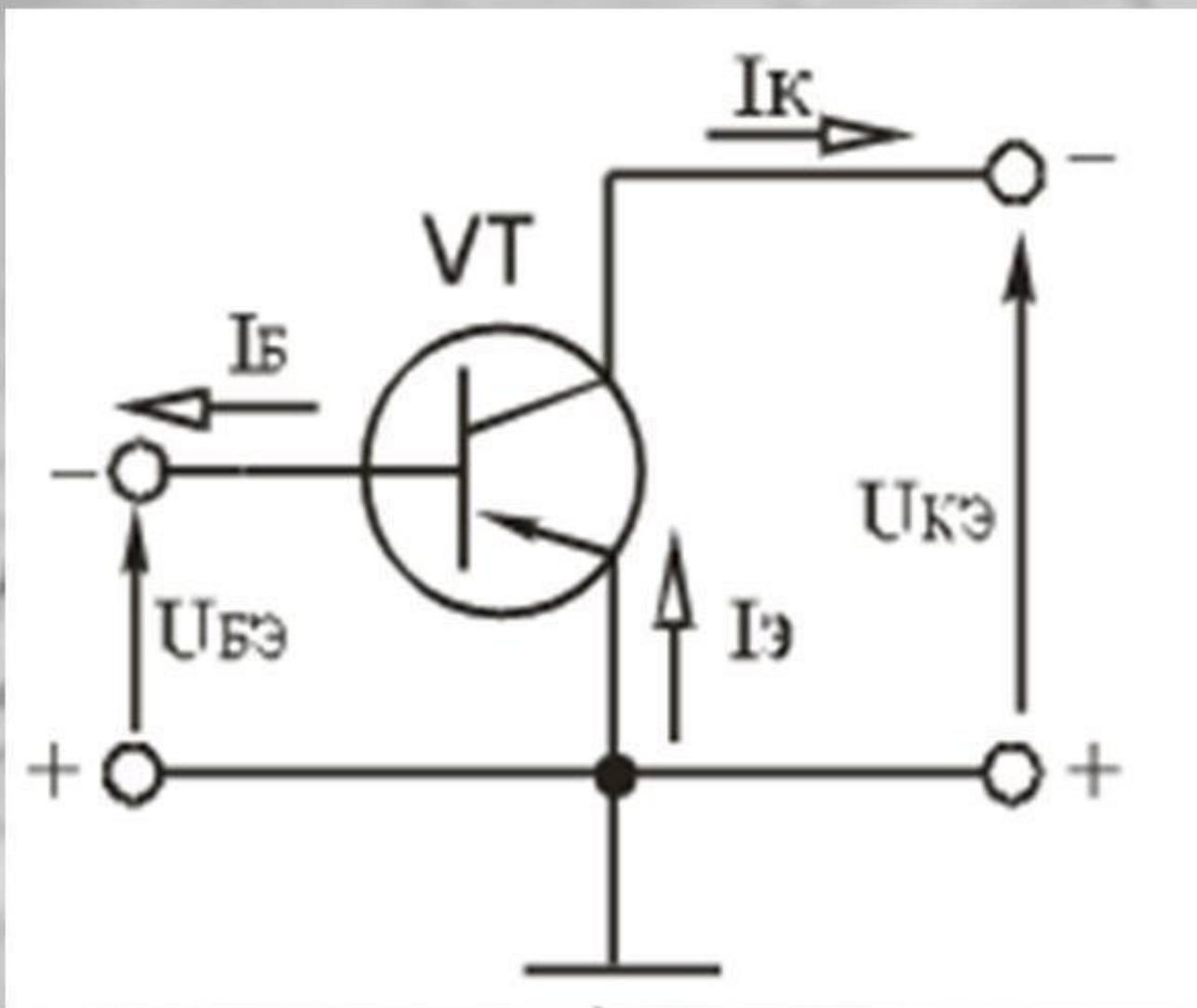
**Недостатки** схемы с общей базой :

- Малое усиление по току, так как  $\alpha < 1$
- Малое входное сопротивление
- Два разных источника напряжения для питания.

**Достоинства:**

- Хорошие температурные и частотные свойства.
- Высокое допустимое напряжение

## Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером



- **Коэффициент усиления по току:**  $I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = I_{\text{К}}/(I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}) = \alpha/(1-\alpha) = \beta$  [ $\beta \gg 1$ ] (показывает, как изменяется ток коллектора  $I_{\text{К}}$  при единичном изменении тока базы  $I_{\text{Б}}$ )
- **Входное сопротивление:**  $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЭ}}/I_{\text{Б}}$

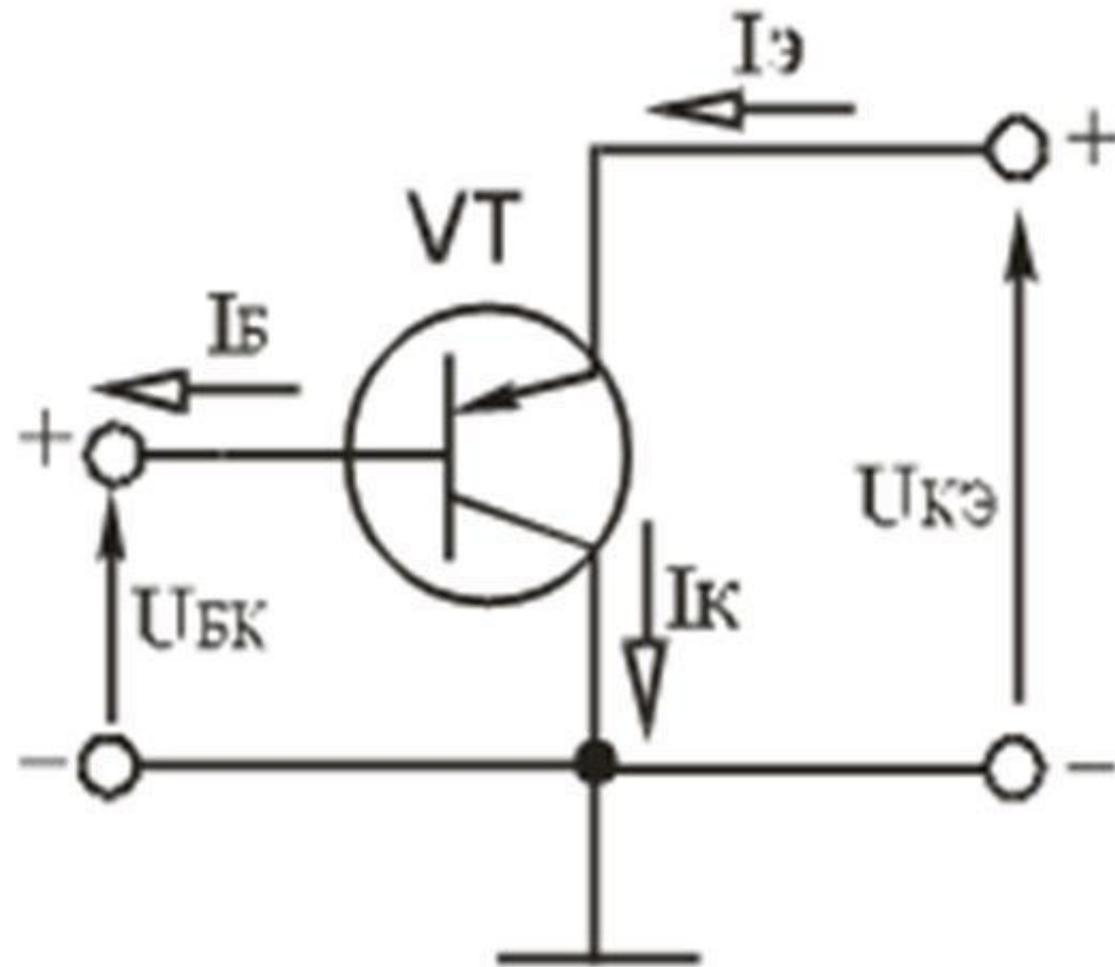
### Достоинства:

- Большой коэффициент усиления по току
- Большой коэффициент усиления по напряжению
- Большое усиление мощности
- Можно обойтись одним источником питания
- Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

### Недостатки:

- Худшие температурные и частотные свойства по сравнению со схемой с общей базой

## Биполярный транзистор в схеме с общим коллектором



## Коэффициент усиления по току:

$$I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = I_{\text{Э}}/I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}}/(I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}) = 1/(1 - \alpha) = \beta \quad [\beta \gg 1]$$

## • Входное сопротивление:

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}} = (U_{\text{БЭ}} + U_{\text{КЭ}})/I_{\text{Б}}$$

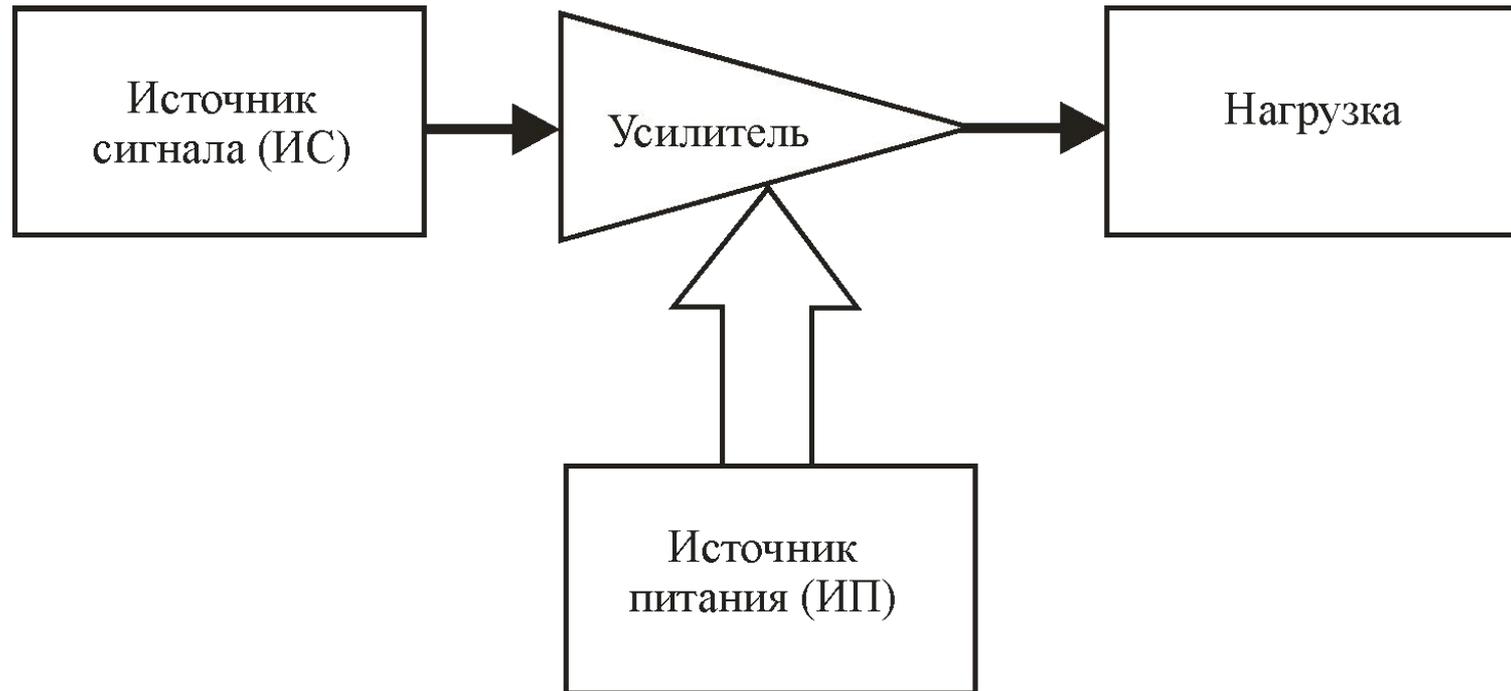
## Достоинства:

- Большое входное сопротивление
- Малое выходное сопротивление

## Недостатки:

- Коэффициент усиления по напряжению меньше 1.
- Схему с таким включением называют «эмиттерным повторителем»

## 1.1. Понятие усилительного устройства



**Рис.1.1** Функциональная схема УУ

## 1.2. Основные характеристики УУ

*Коэффициенты усиления.* Основной характеристикой любого усилителя является его коэффициент усиления. Различают три коэффициента усиления:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

$$K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$$

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$$

$$K_{p \text{ рез}} = \prod_{i=1}^m K_{p i}$$

*Коэффициент полезного действия (КПД).* Основной энергетической характеристикой любого устройства является КПД. Для электронного усилителя КПД представляет собой отношение мощности, выделяемой в нагрузке, к мощности, потребляемой от источника питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{ИП}}}$$

Эффективность использования энергии источника питания часто оценивают по току, потребляемому от источника питания в режиме покоя, т.е. при отсутствии сигнала.

## 1.2. Основные характеристики УУ

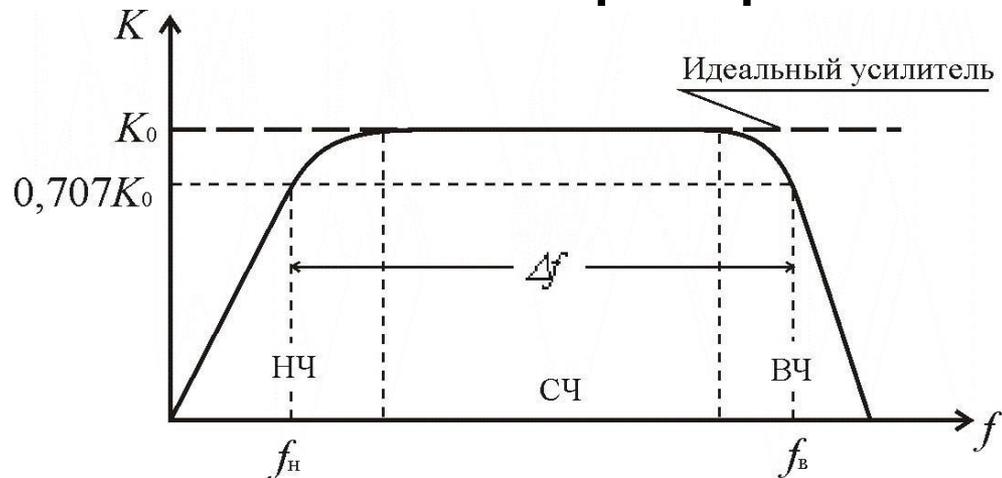


Рис.1.2. АЧХ широкополосного усилителя

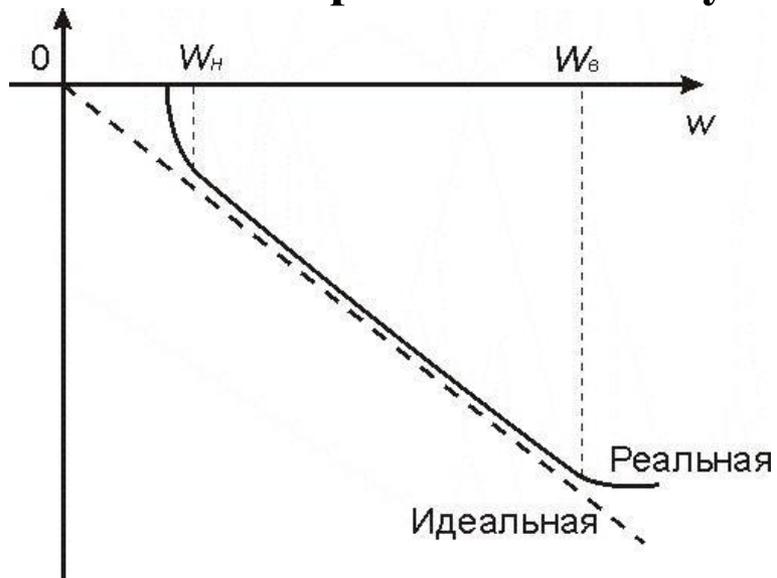
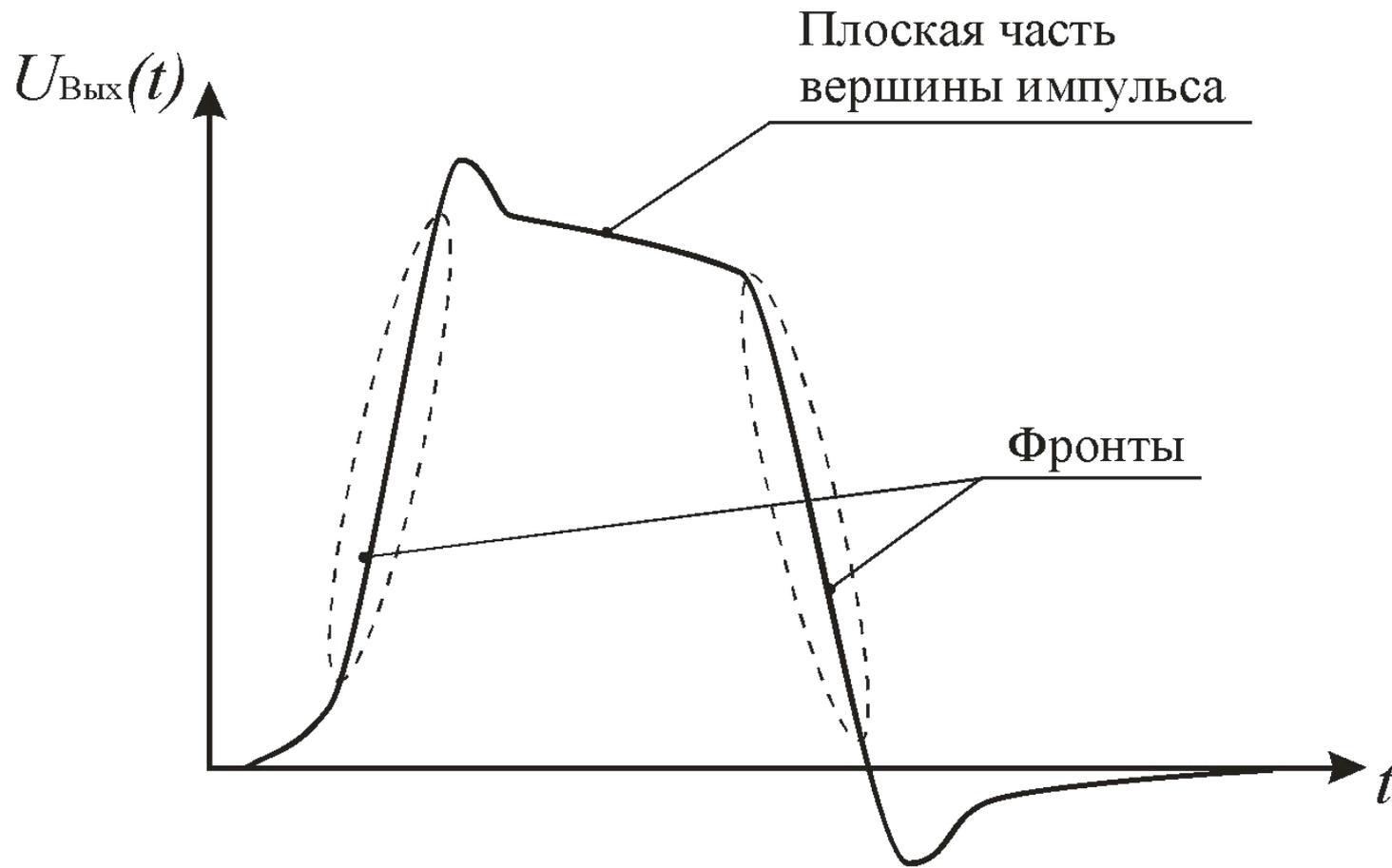


Рис.1.3. ФЧХ

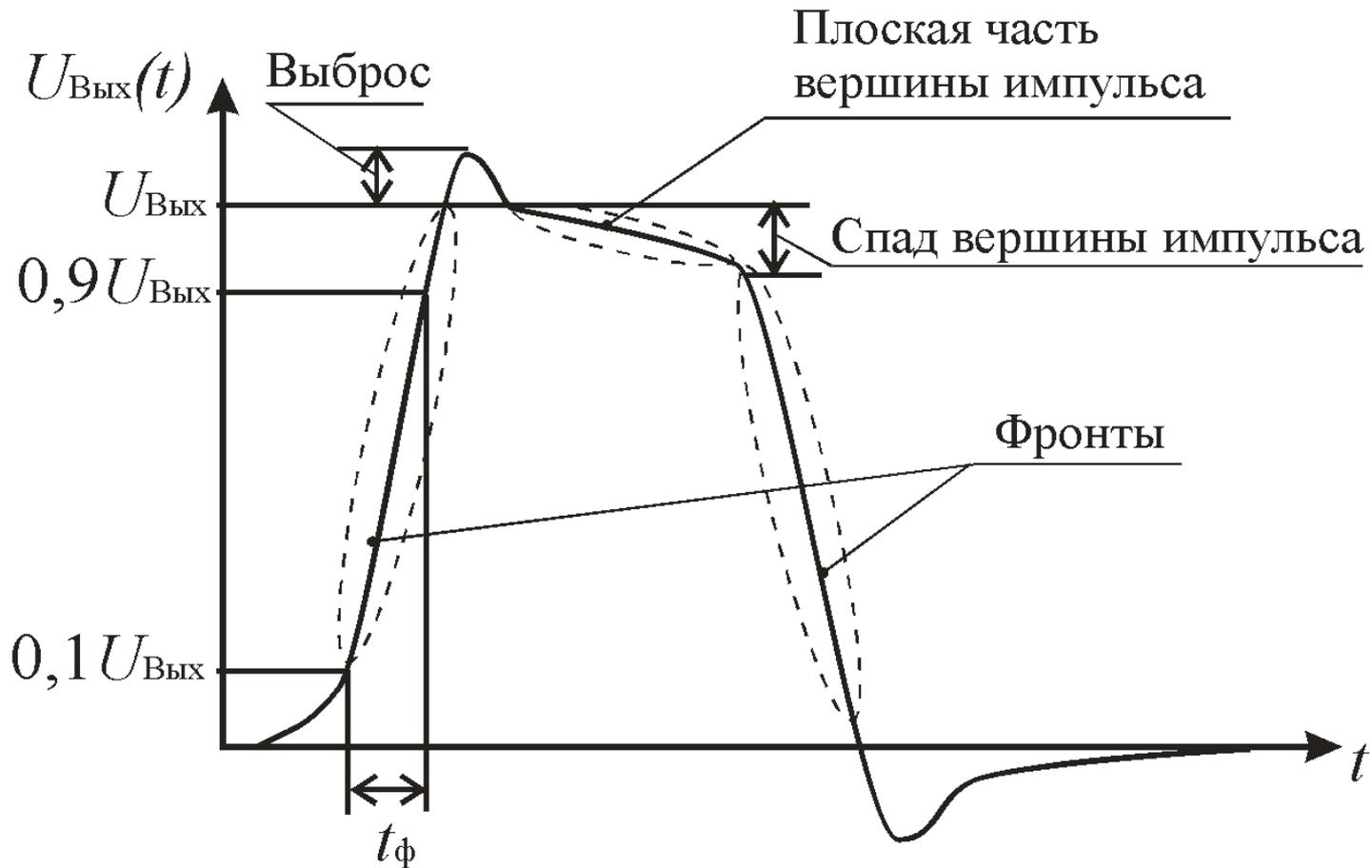


**Рис.1.4. Импульсная характеристика**

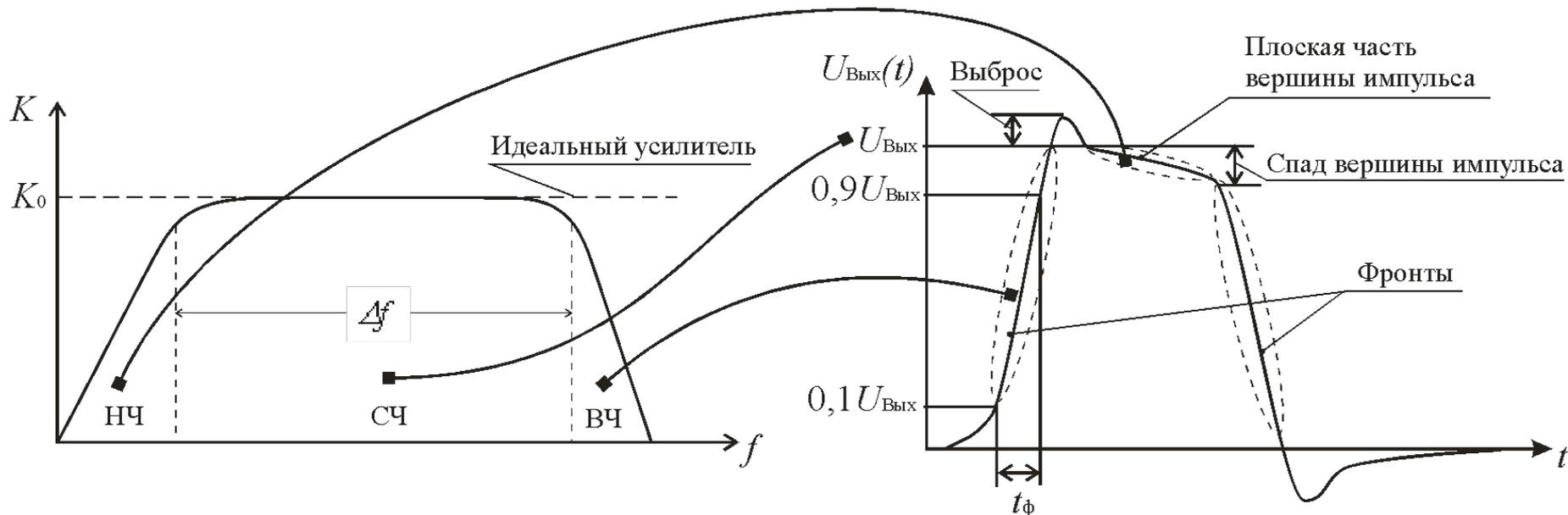
## Линейные и нелинейные искажения сигналов.

***Линейные искажения полезного сигнала.*** Усиление сигнала – это повышение его уровня (мощности) при сохранении формы. Однако усилить сигнал и в точности сохранить его форму невозможно, поэтому усиленный сигнал принято характеризовать уровнем искажений.

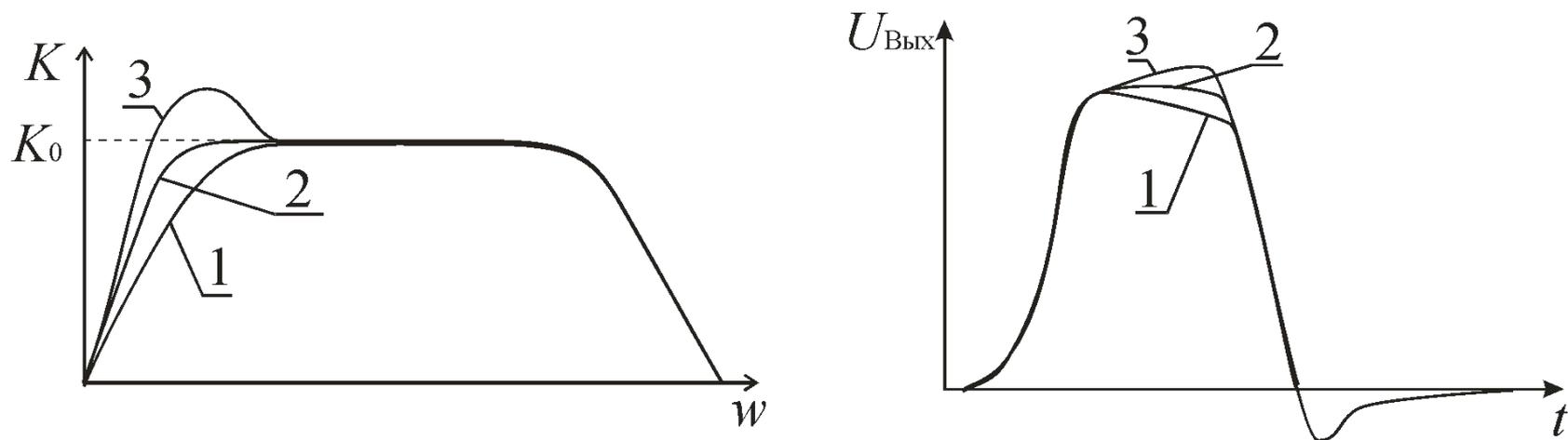
***Искажения*** – это отклонения формы выходного сигнала от формы входного. Эти отклонения, вызваны несовпадением реальных характеристик усилителя с идеальными. Искажения делят на линейные и нелинейные. Различают три вида линейных искажений: частотные, фазовые и переходные.



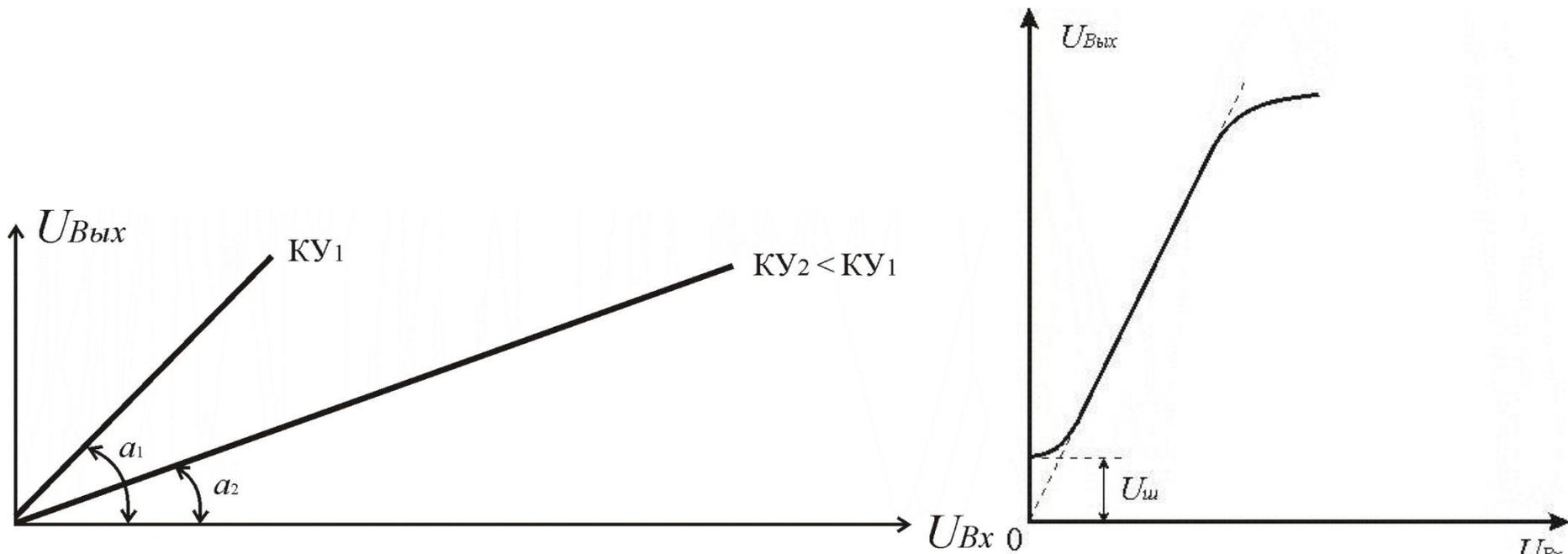
**Рис.1.5. Импульсная характеристика с переходными искажениями**



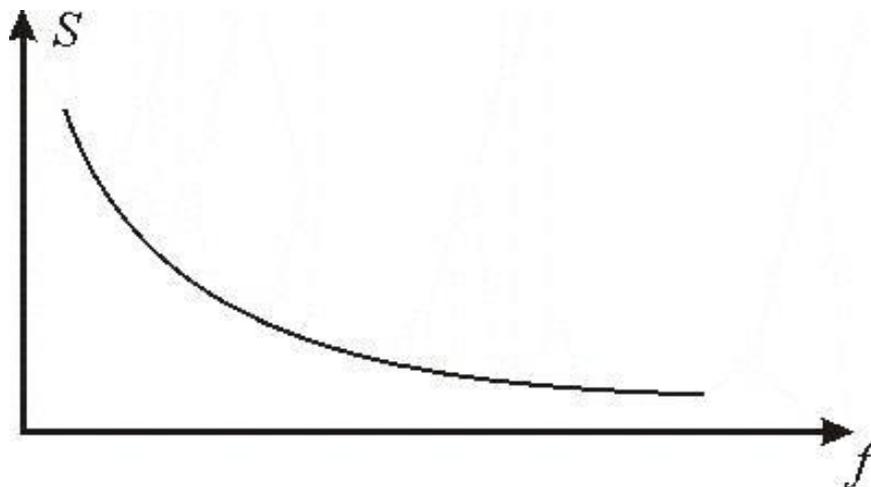
**Рис.1.6. Связь частотных и временных искажений**



**Рис.1.8. Связь НЧ искажений на АЧХ и искажений плоской части импульса**



**Рис.1.9. Амплитудная характеристика усилителя:  
идеального – слева, реального – справа**



**Рис.1.10. Спектральная плотность шума типа  $1/f$**

К помехам усилителя относят *электромагнитные наводки*. Их причина заключается в наличии паразитных индуктивных и емкостных связей между цепями усилителя и цепями помех. Особенно сильно такие наводки сказываются в ВЧ усилителях большой мощности. Такие помехи устраняют путем экранировки сигнальных цепей, их трассировки таким образом, чтобы паразитные параметры были минимальными.

Для оценки шумовых свойств усилителя используют коэффициент шума:

$$K_{\text{ш}} = \frac{\left( \frac{P_{\text{сигн}}}{P_{\text{шум}}} \right)_{\text{Вых}}}{\left( \frac{P_{\text{сигн}}}{P_{\text{шум}}} \right)_{\text{Вх}}} > 1$$

# Работа транзистора в усилительных каскадах

## Статические характеристики транзистора

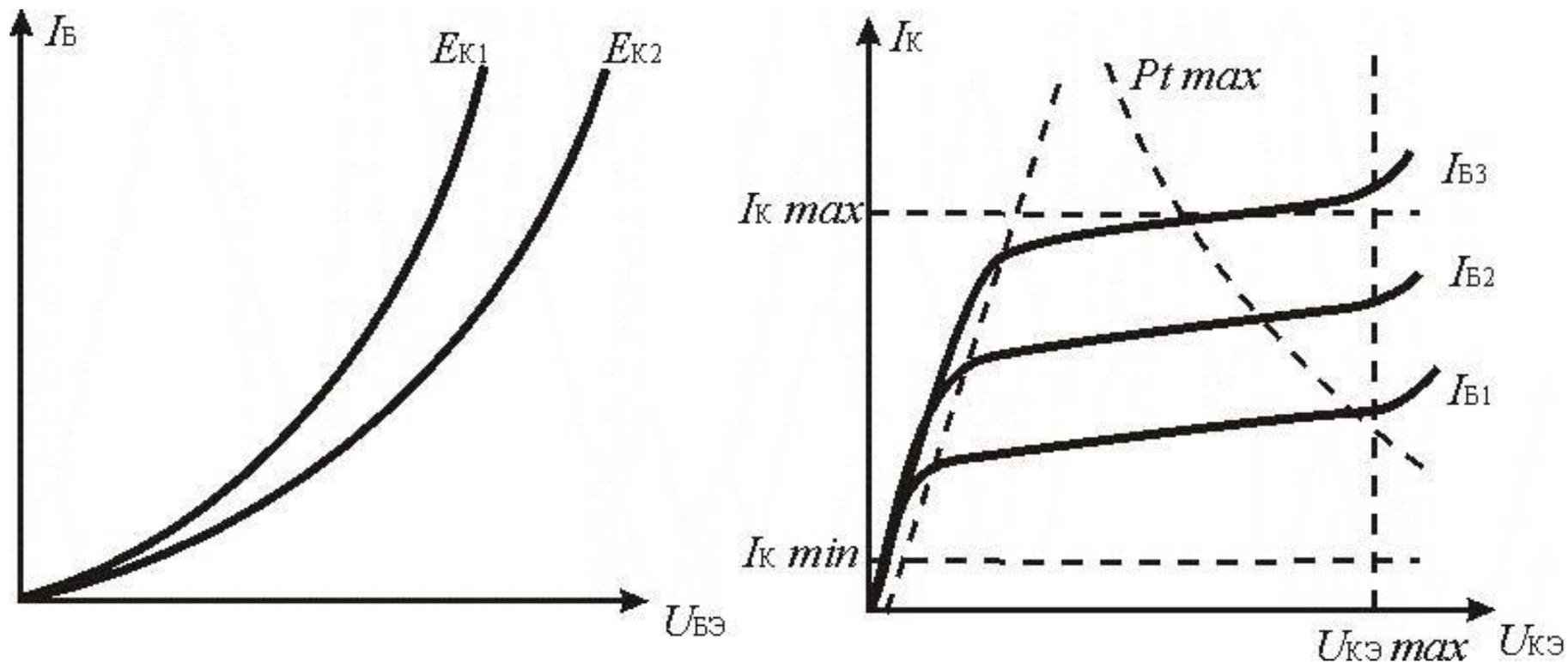
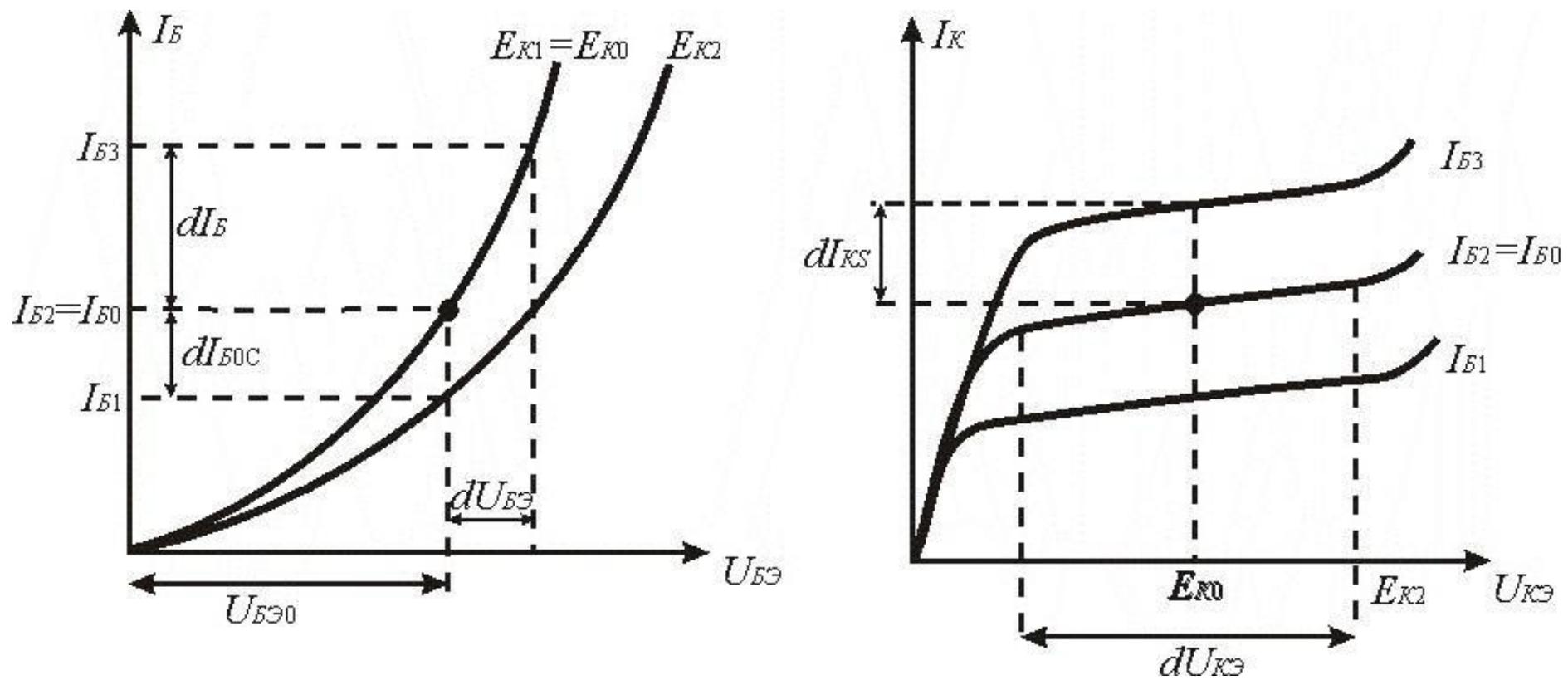


Рис.3.5. Статические характеристики биполярного транзистора



**Рис.3.7. Использование статических характеристик биполярного транзистора для определения  $Y$ -параметров:  $Y_{12}$   $Y_{21}$**

# **Нагрузочные характеристики и оптимизация выбора рабочей точки по постоянному току**

**При работе активного элемента токи и напряжения на его зажимах изменяются, и рабочая точка перемещается по статическим характеристикам. Линия, по которой движется рабочая точка на выходной характеристике, называется нагрузочной характеристикой.**

**Нагрузочные характеристики позволяют графически проиллюстрировать работу усилительного каскада. Нагрузочные характеристики или выходные динамические характеристики (ДХ) – это прямые линии, которые в координатах выходной ток и выходное напряжение соответствуют уравнениям, выражающим зависимость между значениями токов и напряжений на нагрузке каскада по постоянному и переменному току.**

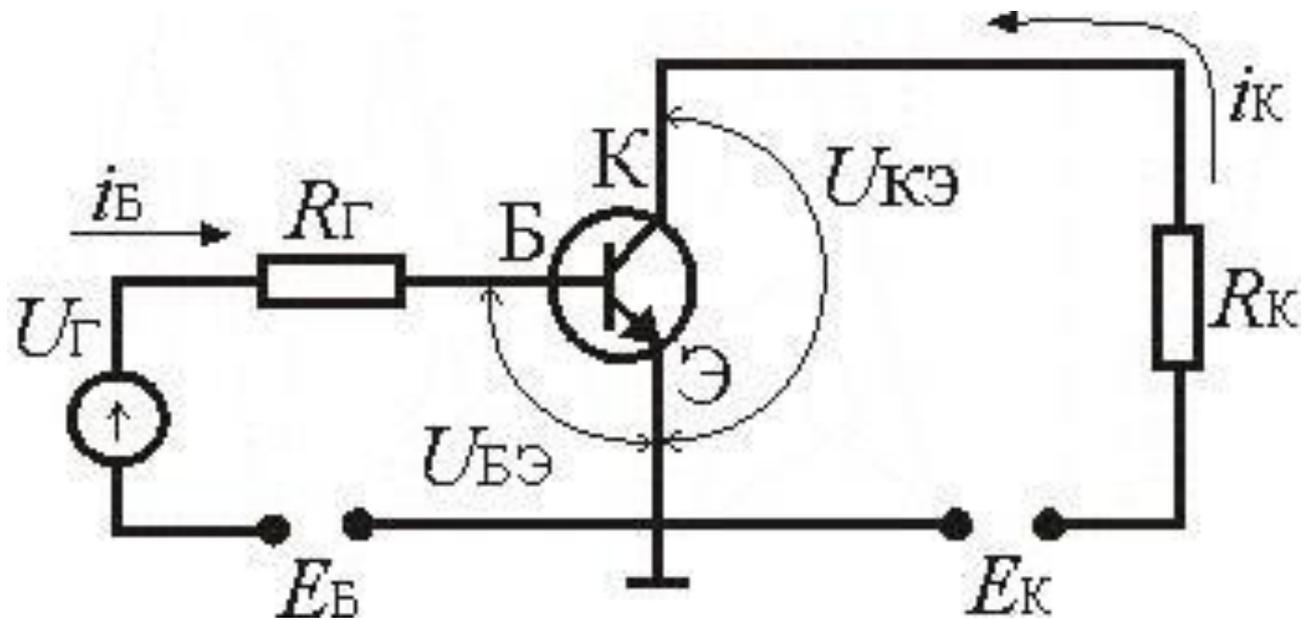
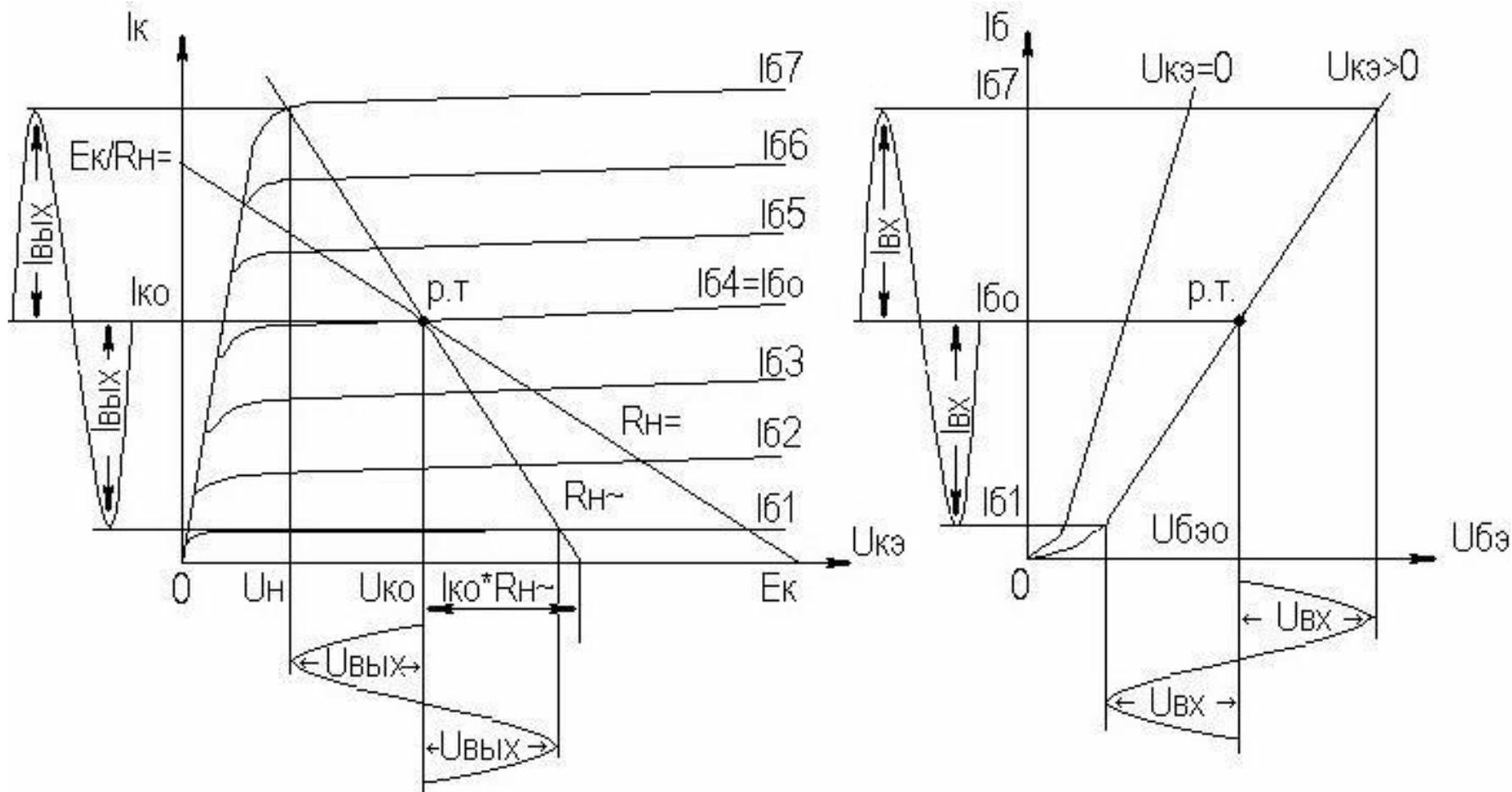


Рис.3.8. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ



**Рис.3.9. Нагрузочные прямые по постоянному ( $R_{H=}$ )**

**и переменному ( $R_{H\sim}$ ) токам**

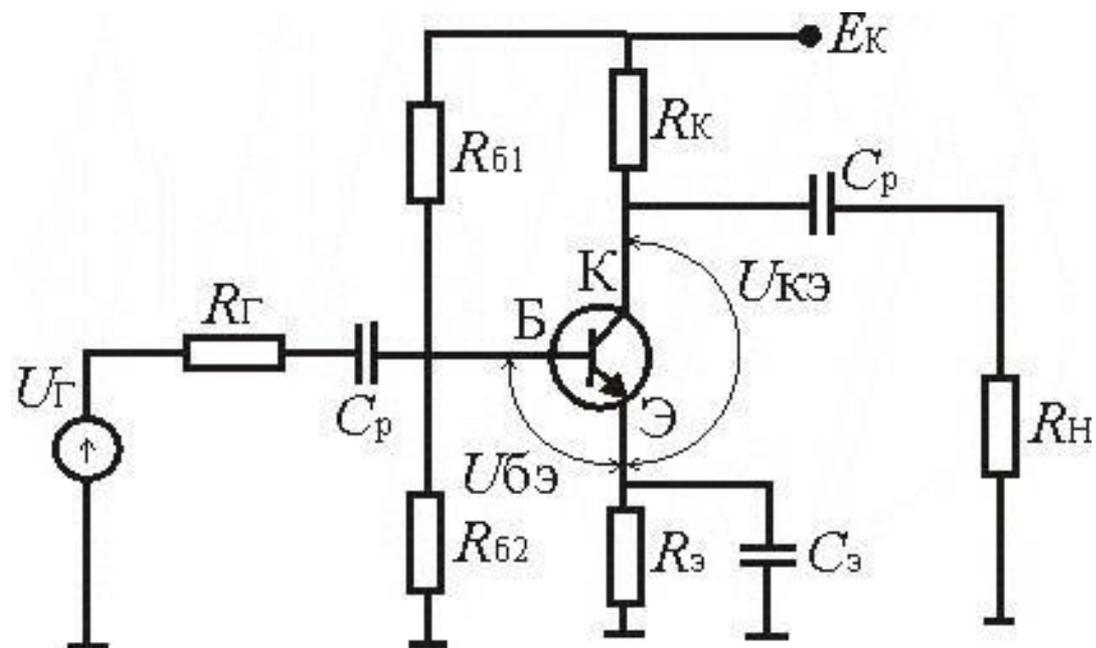
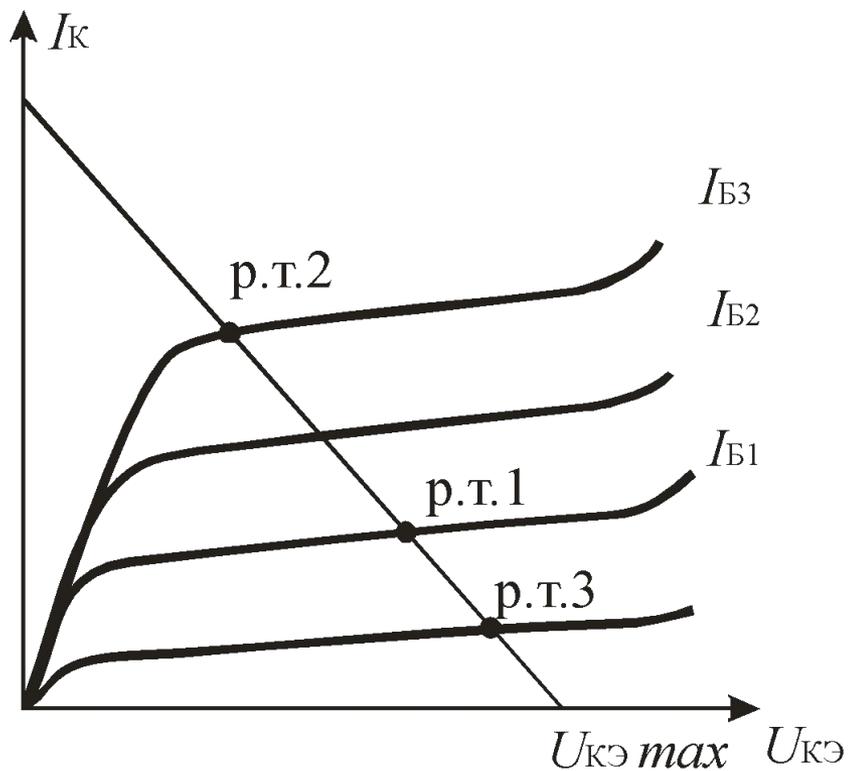
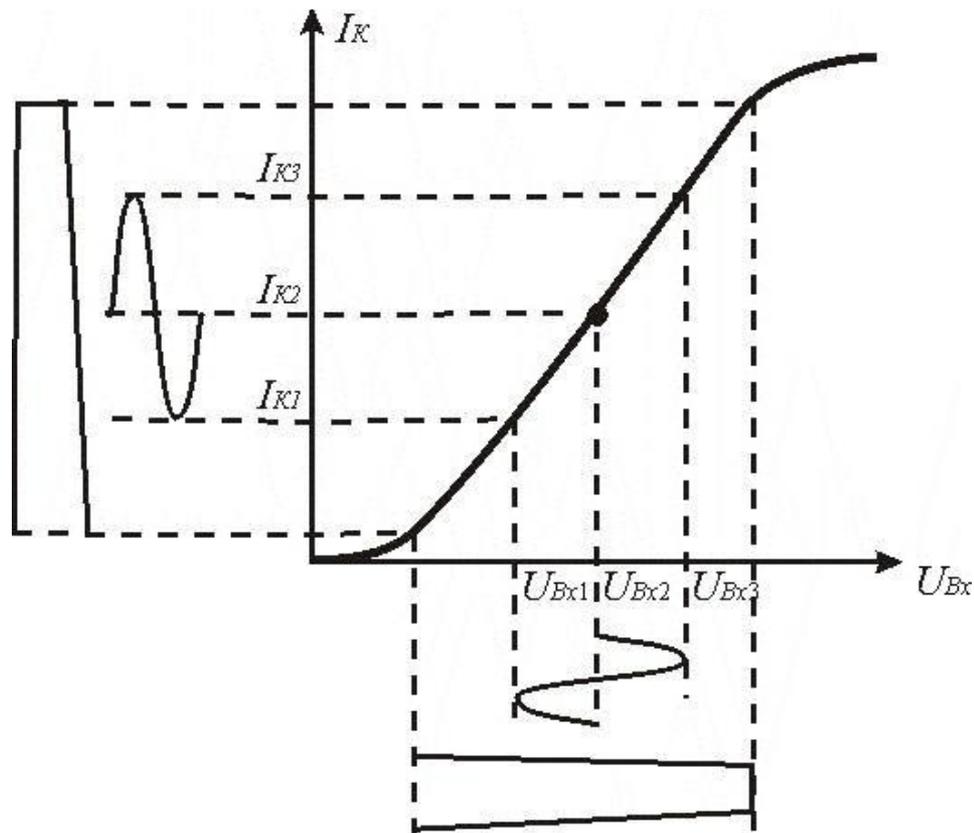


Рис.3.10. Усилительный каскад по схеме с ОЭ



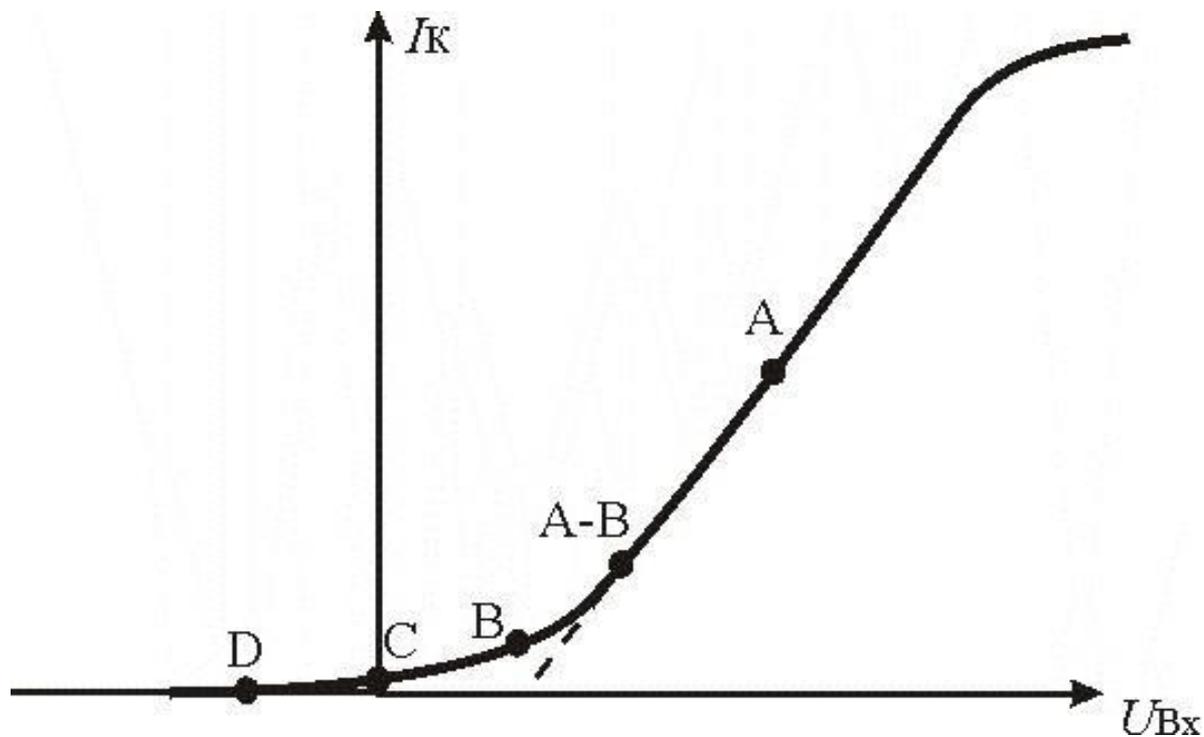
**Рис.3.11. Выбор рабочей точки при различных видах сигнала**



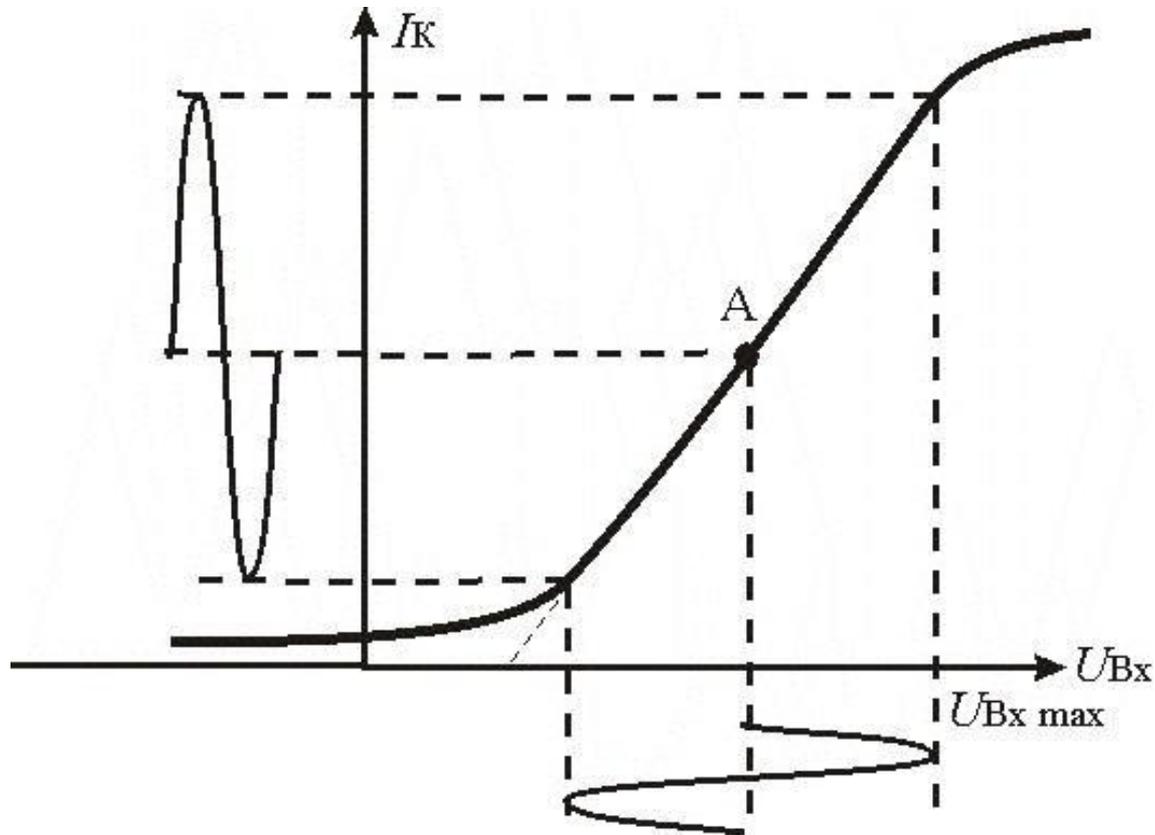
**Рис.3.12. Сквозная (проходная) характеристика**

## Классы работы усилительных каскадов

1. Усилитель класса А
2. Усилитель класса В
3. Усилитель класса АВ
4. Усилитель класса С
5. Усилитель класса D



# Усилитель класса А



Класс А характеризуется минимальными искажениями сигнала при низком КПД схемы (не более 50%)

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ПОТР}}}$$

Работа усилительного каскада в режиме класса А характеризуется:

- низким КПД (в силу большой величины тока покоя),
- наименьшими нелинейными искажениями (в силу того, что р.т. находится на линейном участке).

Каскады класса А используются в качестве каскадов предварительного усиления

Поскольку в режиме А отсутствует отсечка коллекторного тока, то этот режим не принято характеризовать углом отсечки, хотя иногда, с некоторой оговоркой, можно считать угол отсечки в этом режиме равным  $\pi$ .

## Усилитель класса В.

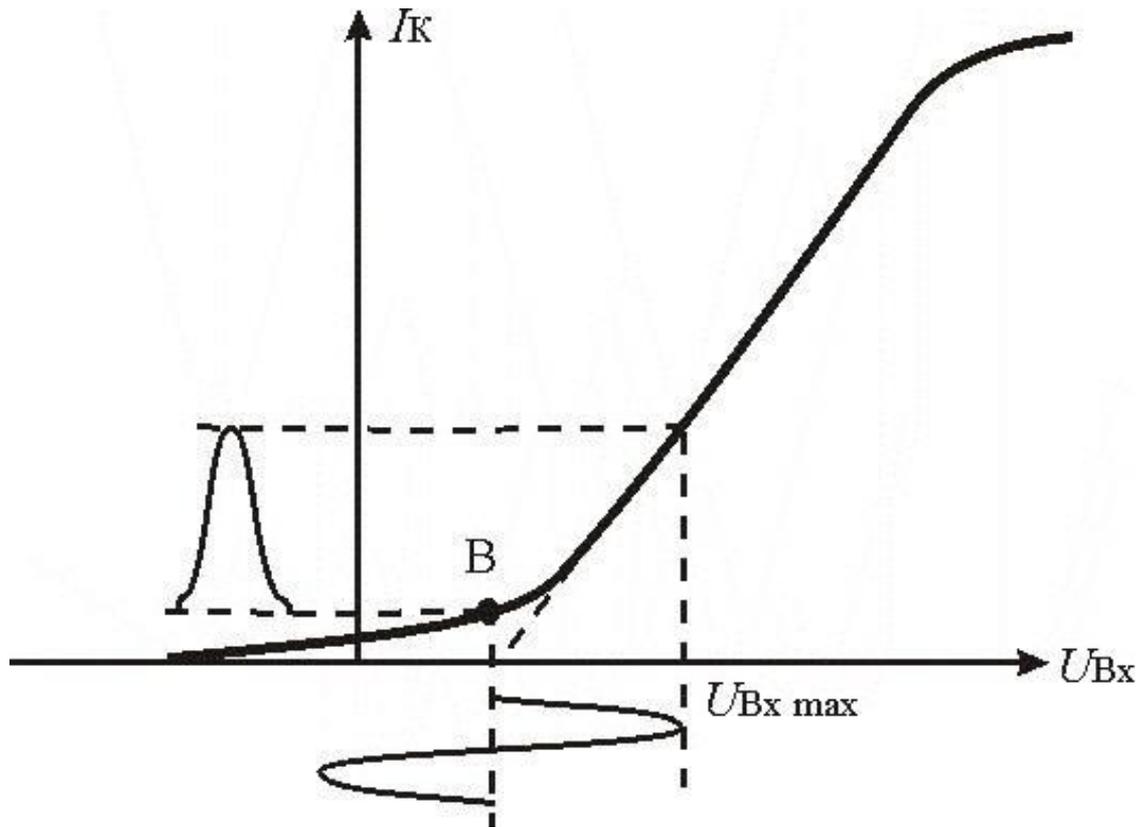


Рис.5.3 Положение рабочей точки при работе в классе В

- Рабочая точка транзистора при работе в классе В задаётся следующим образом:**
- проводится касательная к характеристике,
  - из точки пересечения этой касательной с осью абсцисс поднимается перпендикуляр,
  - р.т. является пересечением полученного перпендикуляра со сквозной характеристикой.

Среднее значение тока для усилителей класса В зависит от амплитуды усиливаемого сигнала.

За счет лучшего использования тока предельное значение КПД для режима В равно **0,785**.

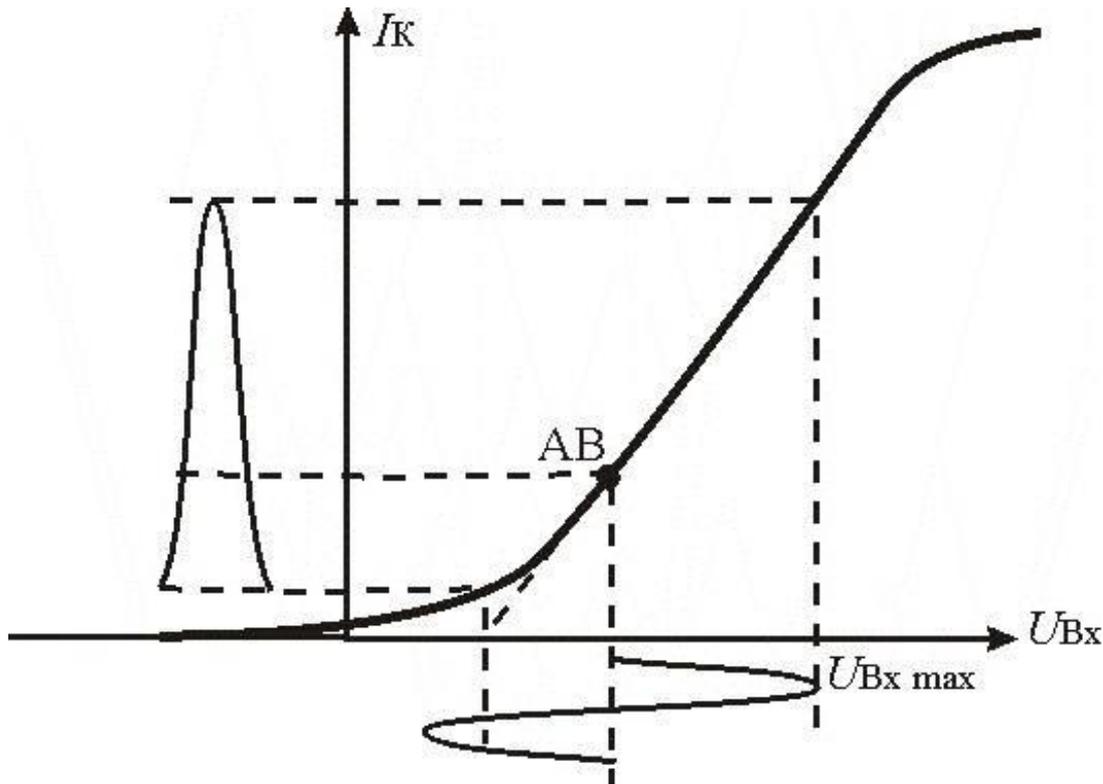
Полезная мощность в нагрузке может в 5 раз превышать мощность в нагрузке при работе в классе А.

$$\eta \leq 78,5\%$$

$$K_{\Gamma} \leq 43\%$$

Поскольку выходной сигнал является однополярным, то для получения отрицательной полуволны усилители класса В строятся по двухтактной схеме

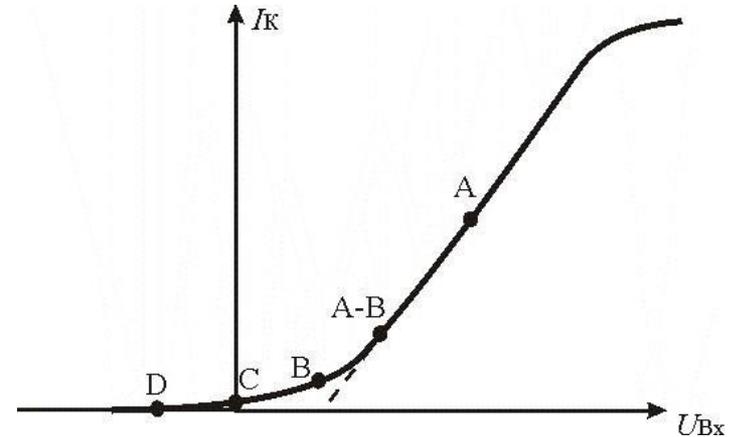
### 5.3) Усилитель класса АВ.



Если угол отсечки больше  $\pi/2$  но меньше  $\pi$ , то получается промежуточный между классами А и В класс АВ.

Этот режим обычно применяется для устранения нелинейных искажений усиленного сигнала, которые возникают из-за нелинейности начальных участков ВАХ.

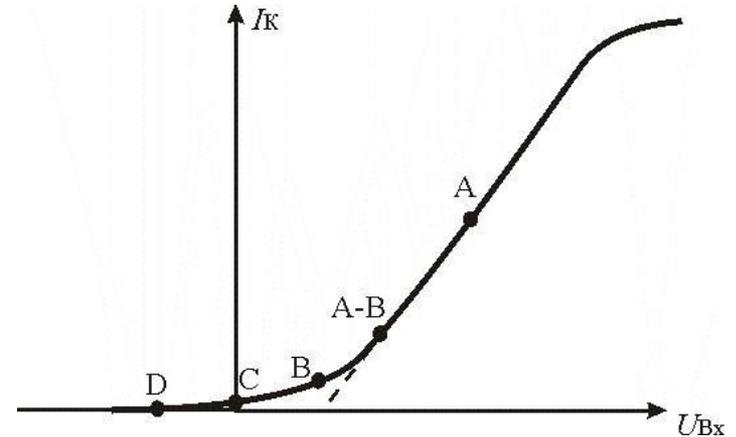
## 5.4) Усилитель класса С.



Усилительный каскад класса С характеризуется:

- ✓ углами отсечки меньше  $\pi/2$ ;
- ✓ более высоким КПД ( $\sim 100\%$ ) по сравнению с классом В;
- ✓ высоким коэффициентом гармоник и наличием паразитных гармоник в спектре выходного сигнала.

## 5.5) Усилитель класса D.



В этом режиме УЭ работает в ключевом режиме (как ключ)  
(рис.5.1):

- ✓ в закрытом состоянии через АЭ протекает незначительный ток, а падение напряжение на нем примерно равно напряжению источника питания,
- ✓ в открытом состоянии ток большой, и падение напряжение на АЭ незначительно.

# Работа усилительного каскада по постоянному току

- 1) Обеспечение работы активного элемента по постоянному току
- 2) Методы термостабилизации положения рабочей точки транзистора
- 3) Методика инженерного расчёта элементов эмиттерной термостабилизации
- 4) Строгий расчёт температурной нестабильности тока коллектора
- 5) Особенности задания рабочей точки и термостабилизации полевых транзисторов

В отличие от лампы р.т. у транзистора задается током. Причинами изменения р.т. являются:

- ✓ изменение температуры;
- ✓ не стабильное питание;
- ✓ деградация и старение элементов.

температурная нестабильность

На практике принято оценивать температурный уход параметров транзистора по изменению тока коллектора, поскольку в линейной области все  $Y$ -параметры транзистора пропорциональны току коллектора.

Для БТ, включенного по схеме ОБ

$$J_K = \alpha \cdot J_{\Xi} + J_{КБ0}$$

$\alpha$  – коэффициент передачи по току в схеме с ОБ

$J_{КБ0}$  – обратный ток коллектора.

$$\Delta J_K(\Delta T) = \Delta \alpha(\Delta T) \cdot \Delta J_{\Xi}(\Delta T) + \Delta J_{KB0}(\Delta T)$$

$$\Delta J_{KB0}(\Delta T) = J_0(T_0) \cdot (e^{\lambda \cdot \Delta T} - 1)$$

– изменение обратного тока коллектора под воздействием температуры;

$J_0(T_0)$  – значение обратного тока коллектора при нормальной температуре

$\lambda_{Si} = 0,07 \div 0,09$  для кремниевых транзисторов

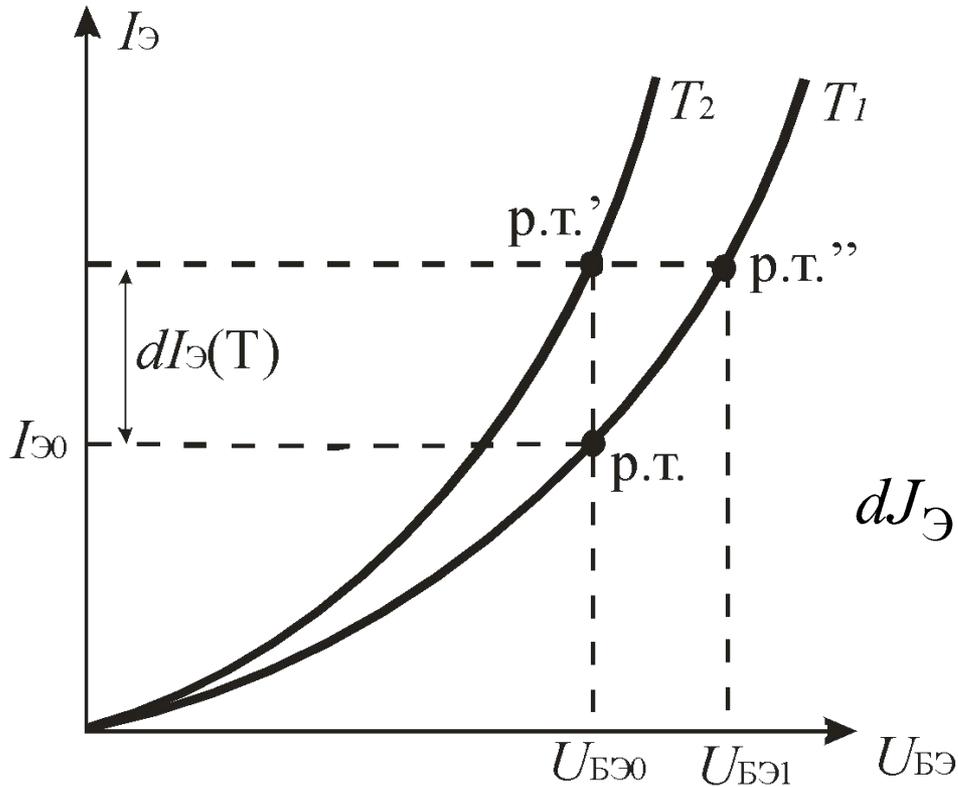
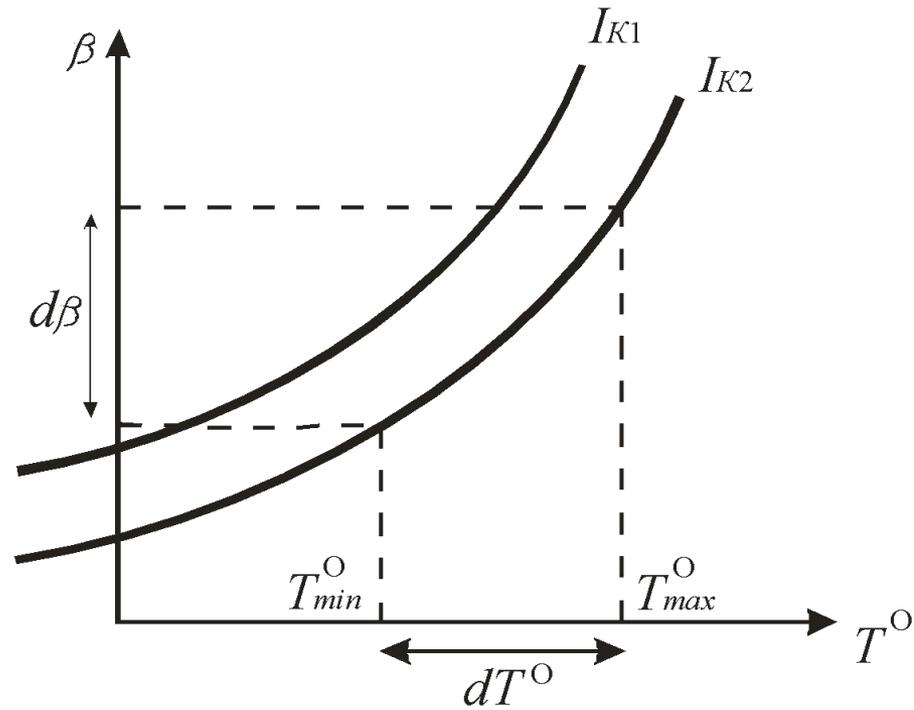
$\lambda_{Ge} = 0,11 \div 0,13$  для германиевых

$\Delta T = T_{max}^o - T_{min}^o$  – разброс температур, при которых должен работать усилитель.

На практике удвоение тока у кремниевых транзисторов происходит при повышении температуры на каждые 5...7 градусов, а у германиевых – на каждые 9...12 градусов. Для кремниевых транзисторов составляет порядка **0,01 мкА**, для германиевых составляет порядка **0,1 мкА**

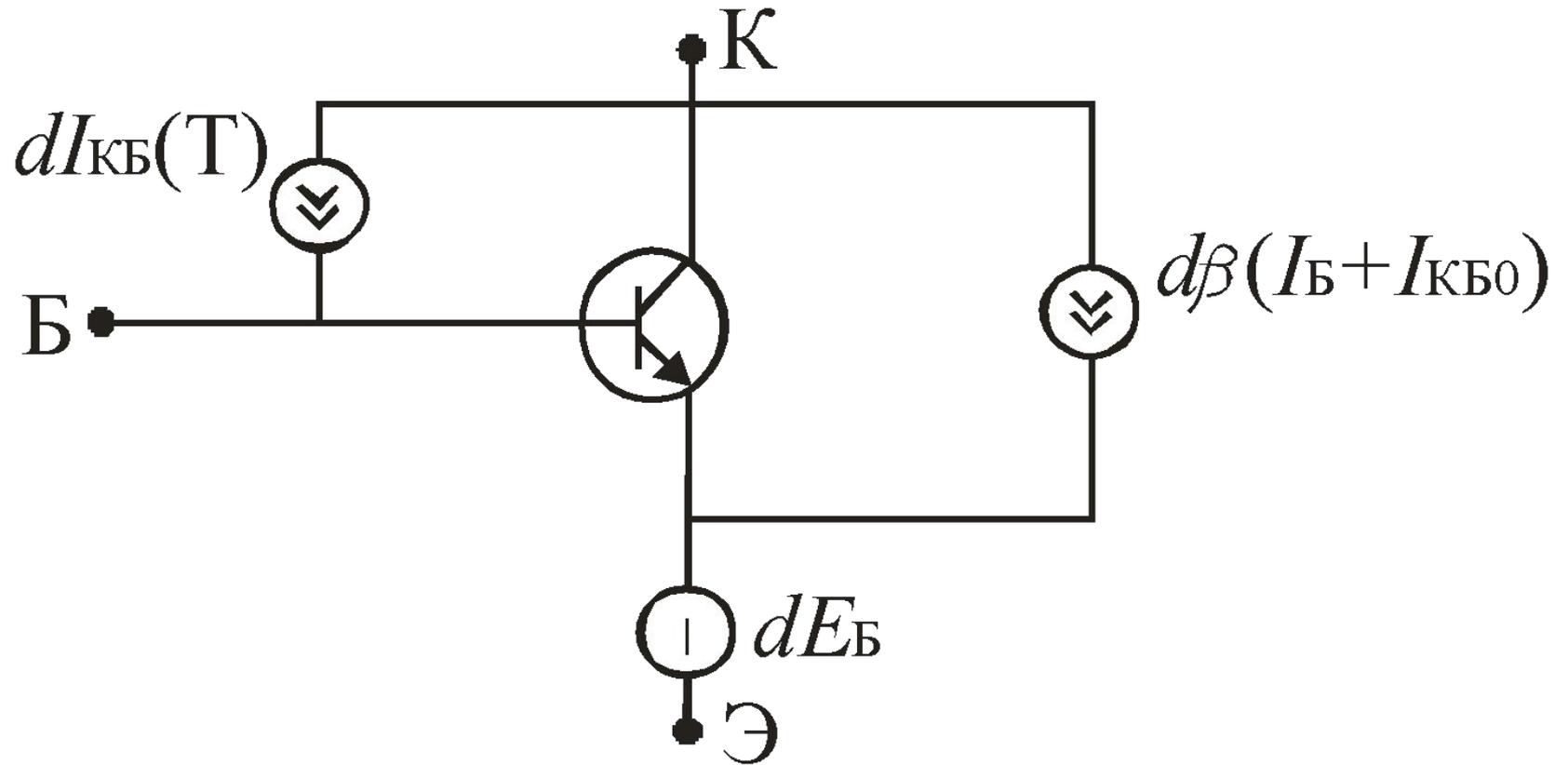
$$\Delta\alpha(\Delta T) \rightarrow \Delta\beta(\Delta T)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$



$$dJ_{\Theta}(dT) \rightarrow$$

$$\rightarrow dE_{\Theta} \approx \frac{dT}{T} (U_{B\Theta 1} - E_{\Theta 0})$$



$$\Delta J_K(\Delta T) = \Delta \alpha(\Delta T) \cdot \Delta J_{\text{Э}}(\Delta T) + \Delta J_{KB0}(\Delta T)$$

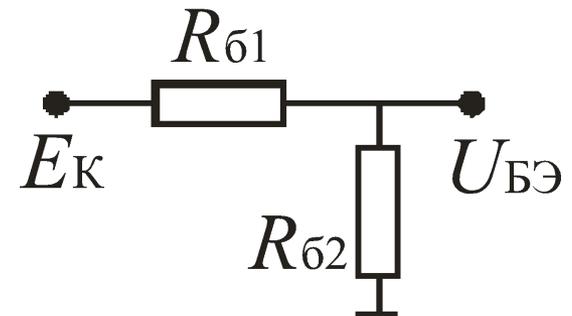
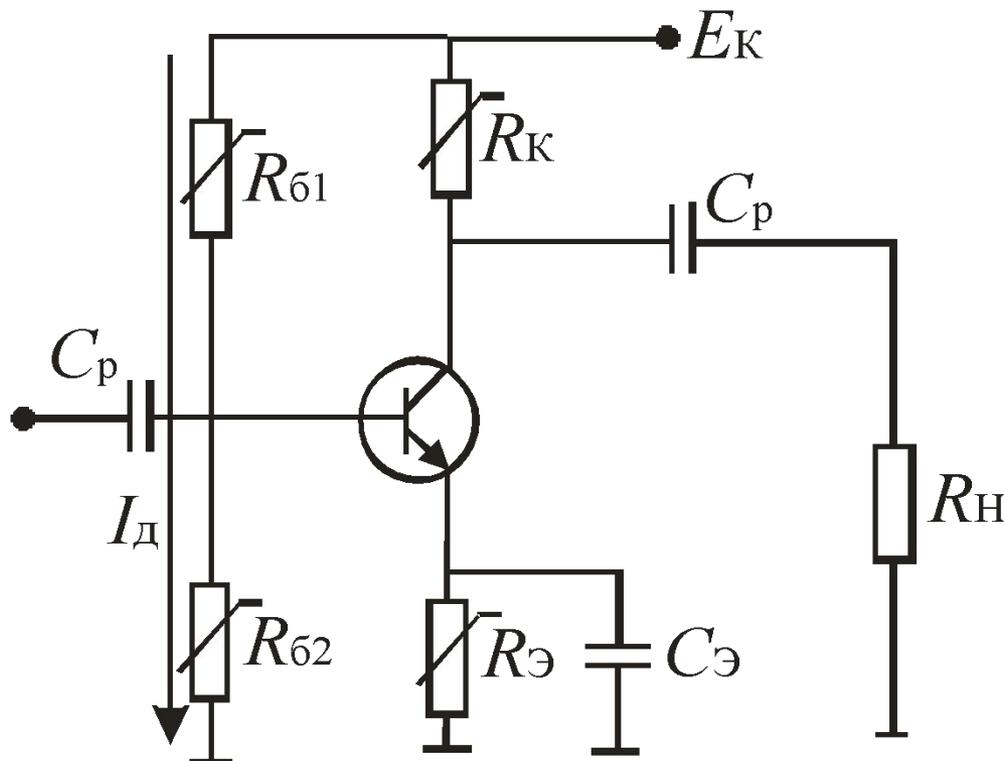
# Методы термостабилизации положения рабочей точки транзистора

Существуют два основных метода термостабилизации:

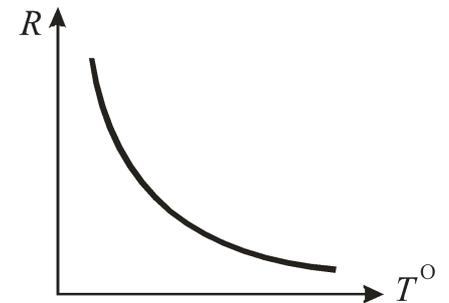
- ✓ компенсационный,
- ✓ метод с использованием ООС.

# Компенсационный метод термостабилизации положения рабочей точки транзистора

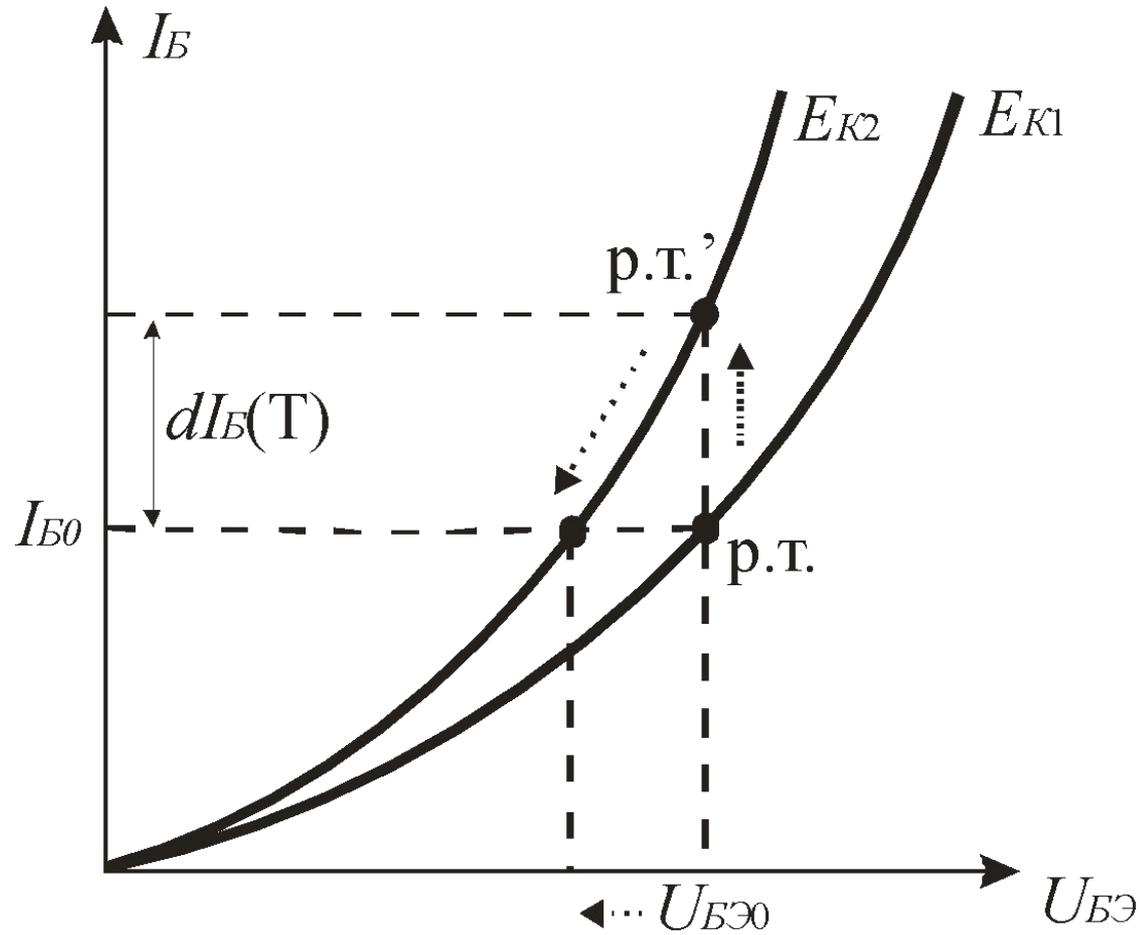
в схему усилителя вводят один или несколько термозависимых элементов, параметры и характеристики которых при изменении температуры изменяются таким образом, чтобы компенсировать уход рабочей точки.



Входной делитель напряжения



Зависимость сопротивления резистора от температуры



Изменение положения р.т. при изменении температуры в схеме с термокомпенсацией с использованием термозависимого сопротивления  $R_{Б2}$

**Достоинством** компенсационного метода термостабилизации является то, что схема не усложняется (простота), а, следовательно, не изменяется конструкция усилителя – не увеличивается вес и габариты.

К недостаткам следует отнести:

- ✓ Компенсация возможна в ограниченном диапазоне температур, поэтому метод является не универсальным.
- ✓ Метод компенсации сопровождается увеличением нелинейных искажений, вследствие нелинейности характеристики термозависимого элемента.
- ✓ Ограниченный выбор термоэлементов.

Метод термостабилизации положения рабочей точки транзистора с использованием ООС основан на введении ООС на постоянном токе.

**Достоинствами** метода являются:

- ✓ метод универсален, то есть позволяет работать во всем температурном диапазоне работы усилителя;
- ✓ применение ООС улучшает все параметры усилителя, кроме коэффициента усиления.

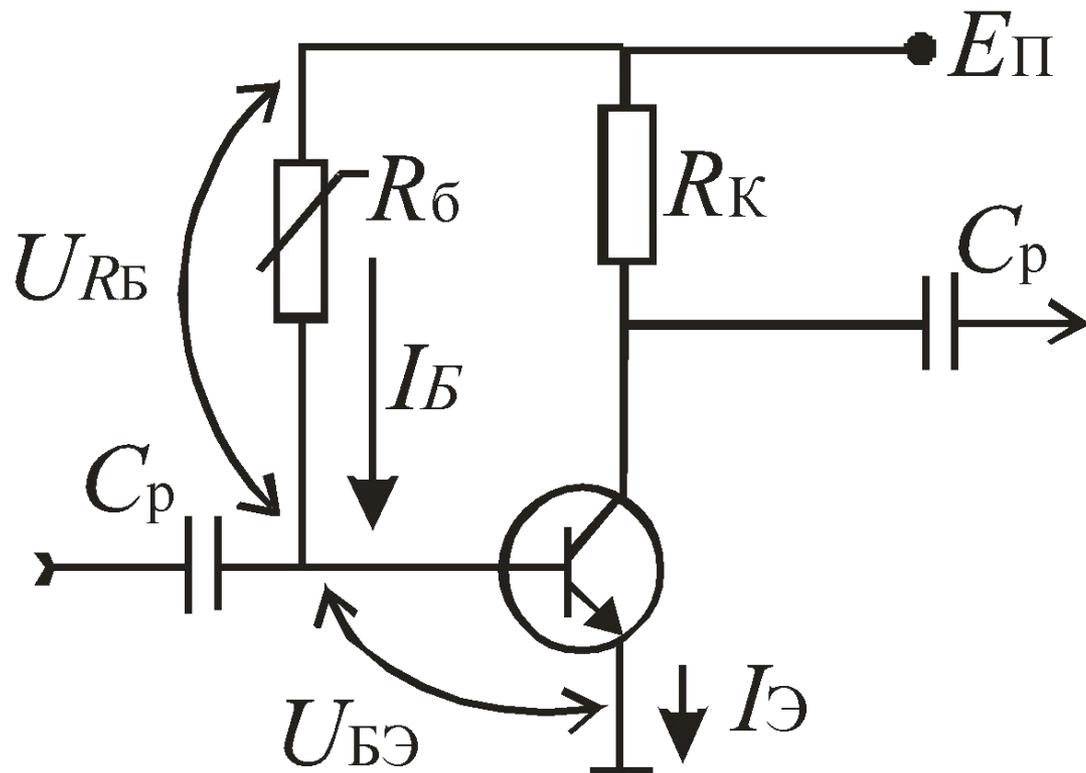
**Недостатки** метода:

- ✓ метод основан на введении дополнительных элементов.

три основные схемы термостабилизации:

- 1) схема базовой стабилизации,
- 2) схема коллекторной стабилизации,
- 3) схема эмиттерной стабилизации.

## Схема базовой стабилизации рабочей точки



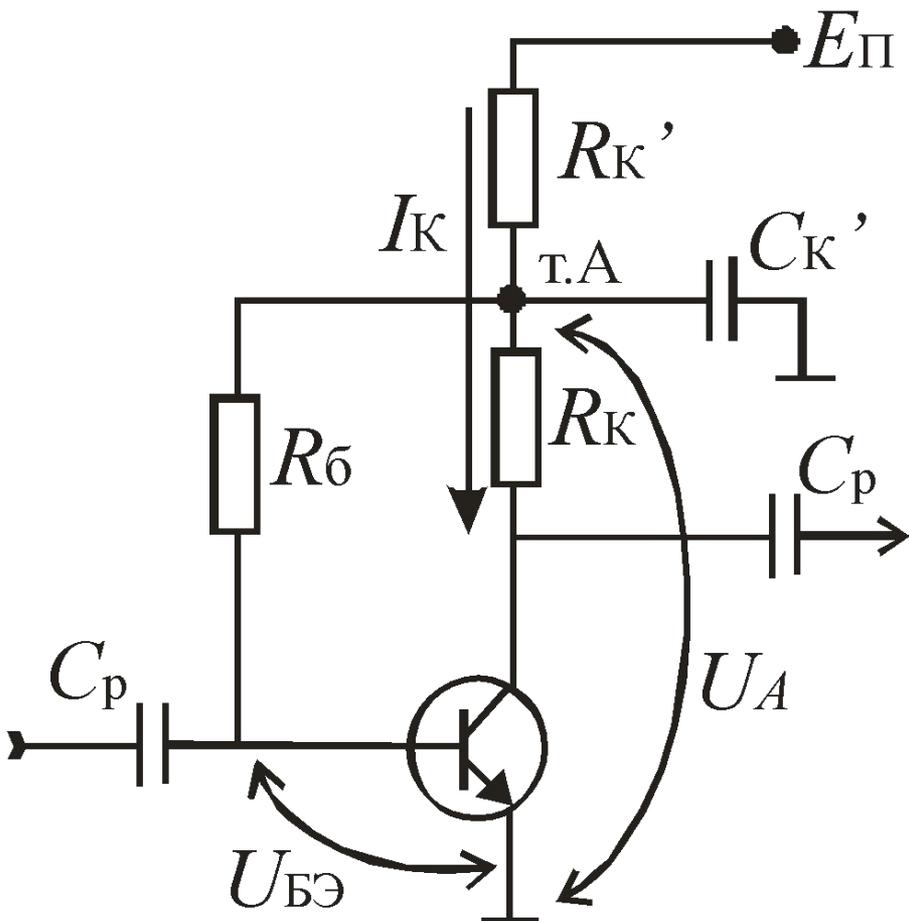
$$E_{\text{П}} = \text{const}$$

$$U_{R_{\text{б}}} = I_{\text{Б}} \cdot R_{\text{б}}$$

$$U_{\text{БЭ0}} = E_{\text{П}} - U_{R_{\text{б}}}$$

$$T \uparrow \Rightarrow I_{\text{Б}} \uparrow \Rightarrow U_{R_{\text{б}}} \uparrow \Rightarrow U_{\text{БЭ}} = (E_{\text{П}} - U_{R_{\text{б}}}) \downarrow \Rightarrow I_{\text{Б}} \downarrow$$

## Схема коллекторной стабилизации рабочей точки



$$U_{R_{K'}} = R_{K'} \cdot I_K$$

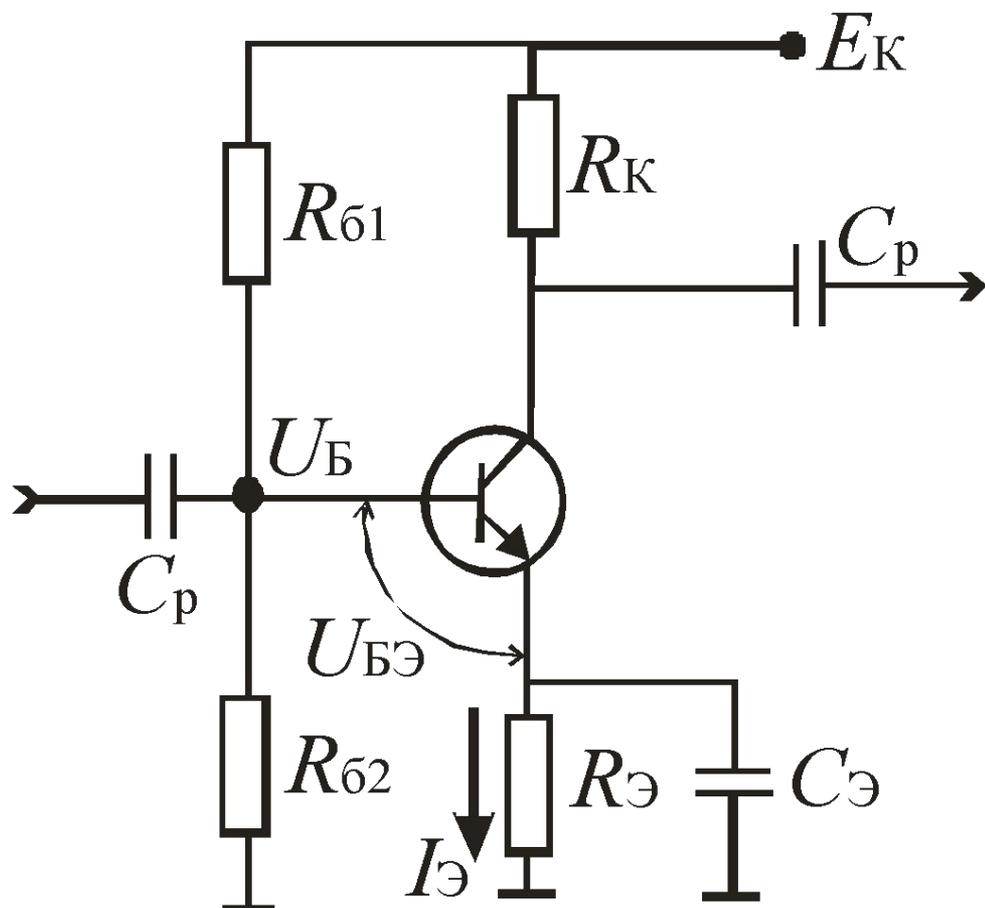
$$U_A = E_{\Pi} - U_{R_{K'}}$$

$$U_{БЭ} = U_A - U_{R_Б}$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C_{K'}} \ll R_{K'}$$

$T \uparrow \Rightarrow I_K \uparrow \Rightarrow U_{R_{K'}} \uparrow \Rightarrow U_A \downarrow \Rightarrow U_{БЭ} \downarrow \Rightarrow I_K \downarrow$

## Схема эмиттерной стабилизации рабочей точки



$$\frac{1}{\omega \cdot C_{э}} \ll R_{э}$$

$$U_B = U_{R_{б2}} = U_{БЭ} + U_{R_{э}}$$

$$U_B = const$$

$$I_{Дел} > (3 \div 5) \cdot I_B$$

$$T \uparrow \Rightarrow I_{э} \uparrow \Rightarrow U_{R_{э}} \uparrow \Rightarrow U_{БЭ} \downarrow \Rightarrow I_{э} \downarrow$$

# Методика инженерного расчёта элементов эмиттерной термостабилизации

Дано: напряжение питания  $E_{\Pi}$  и выбрана рабочая точка –  $I_{B0}$ ,  $I_{Э0}$ ,  $I_{K0}$ ,

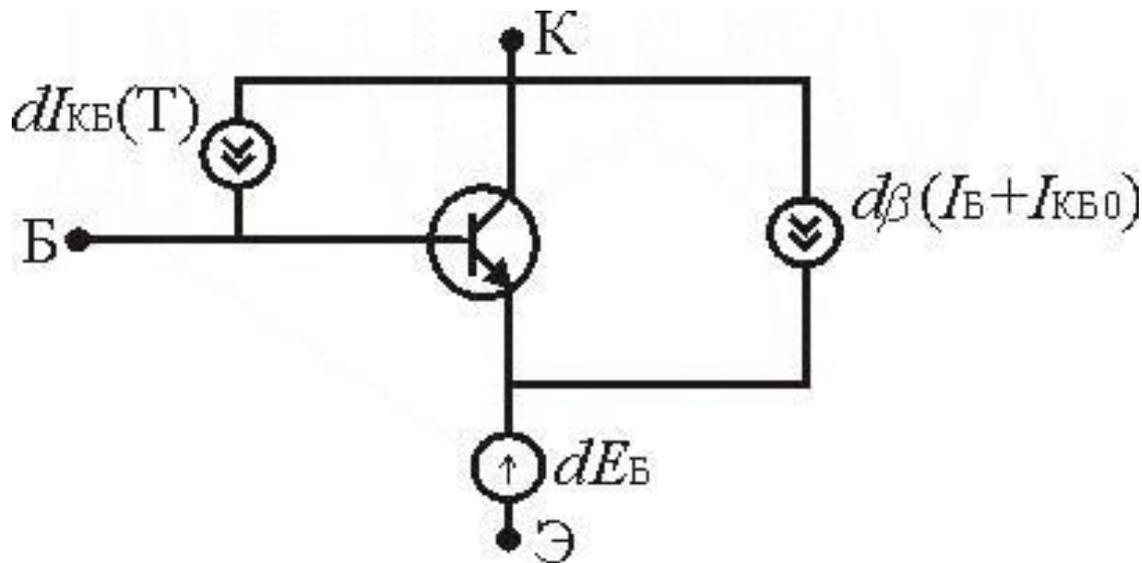
$U_{KЭ0}$ ,  $U_{БЭ0}$ .

Найти:  $R_{Э}$ ,  $R_{Б1}$ ,  $R_{Б2}$ .

- 1) Задаемся величиной падения напряжения на сопротивлении эмиттера –  $U_{R_{Э}} \approx (0,10 \div 0,15) \cdot E_{\Pi}$  (допускаем запас по усилению порядка 10-15%).
- 2) Определяем величину сопротивления  $R_{Э} = \frac{U_{R_{Э}}}{I_{Э0}}$ .
- 3) Определяем потенциал на базе транзистора  $U_{Б} = U_{R_{Э}} + U_{БЭ0}$  (см. рис. 7.3).
- 4) Задаемся величиной тока делителя  $I_{Дел} = (3 \div 5) \cdot I_{B0}$  (согласно условию 7.5).
- 5) Находим сопротивления базового делителя:  $U_{R_{Б2}} = U_{Б}$ , следовательно

$$R_{Б2} = \frac{U_{Б}}{I_{Дел}}; U_{R_{Б1}} = E_{\Pi} - U_{R_{Б2}}, \text{ следовательно, } R_{Б1} = \frac{(E_{\Pi} - U_{R_{Б2}})}{I_{Дел}}.$$

# Строгий расчёт температурной неустойчивости тока коллектора



$$dJ_K \approx dJ_{КБ0} + dJ_K \cdot \beta + \frac{m \cdot \beta \cdot dJ_{КБ0} + S \cdot dE_{\text{Э}} - S \cdot R_{\text{Э}} \cdot \Delta J_K \cdot \beta}{1 + m + R_{\text{Э}} \cdot (S + Y_{11})}$$

$$m = R_{\text{Дел}} \cdot Y_{11}$$

основной вклад приходится на

$$dJ_K \cdot \beta \quad dE_{\text{Э}}$$

Температурная стабилизация положения р.т. обеспечивается, если выполняется условие:

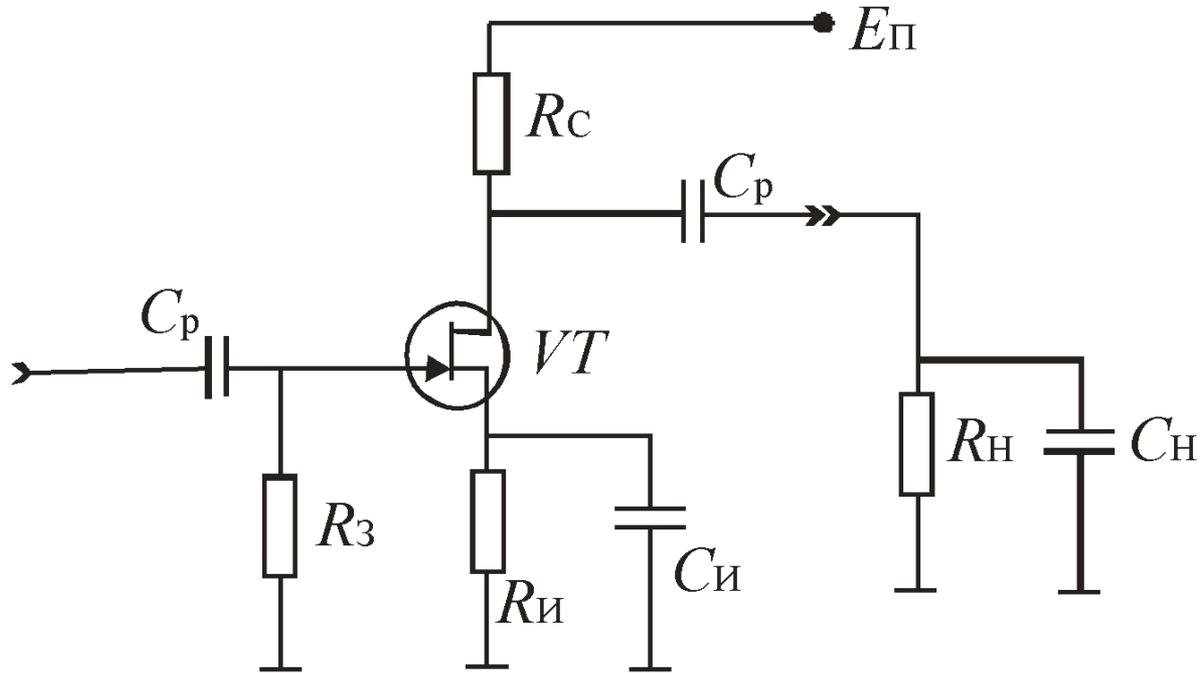
$$dJ_K \leq dJ_{K\text{ДоП}}$$

$$dJ_{K\text{ДоП}} \approx (0,1 \div 0,15) \cdot J_{K0}$$

$$R_{\text{Э}} \approx \frac{1}{S \cdot dJ_{K\text{ДоП}}} \left[ dJ_{\text{КБ}} \cdot (1 + \beta) \cdot m + S \cdot dE_{\text{Э}} + (1 + m) \cdot (dJ_K \cdot \beta - dJ_{K\text{ДоП}}) \right]$$

Сопротивление в цепи эмиттера необходимо выбирать не менее полученного значения: чем больше сопротивление, тем лучше температурная стабильность работы каскада.

## Особенности задания рабочей точки и термостабилизации ПТ



$$R_{Bx} = R_3 \parallel \frac{1}{Y_{11}}$$

в любых схемах обязательно нужно предусматривать пути протекания постоянного входного тока

$$\begin{cases} U_{\text{И}} = J_{\text{И}0} \cdot R_{\text{И}}, \\ U_{\text{З}} = J_{\text{З}0} \cdot R_{\text{З}}, \\ U_{\text{ЗИ}} = U_{\text{И}} - U_{\text{З}} = J_{\text{И}0} \cdot R_{\text{И}} - J_{\text{З}0} \cdot R_{\text{З}}. \end{cases}$$

$$J_{\text{З}0} \cdot R_{\text{З}} \ll J_{\text{И}0} \cdot R_{\text{И}}$$

$$U_{\text{ЗИ}} \approx J_{\text{И}0} \cdot R_{\text{И}}$$

Такая схема называется схемой с автосмещением: ток истока, протекая через сопротивления истока создает на нем падение напряжения и оно прикладывается к сопротивлению затвора (задаёт рабочую точку).

Кроме того, по аналогии со схемой ОЭ сопротивление истока создаёт ООС.

$$dJ_C = \frac{(dJ_3 \cdot R_3 - dE_3) \cdot S}{1 + S \cdot R_{\text{И}}}$$

$$dJ_C \leq dJ_{\text{CДоп}}$$

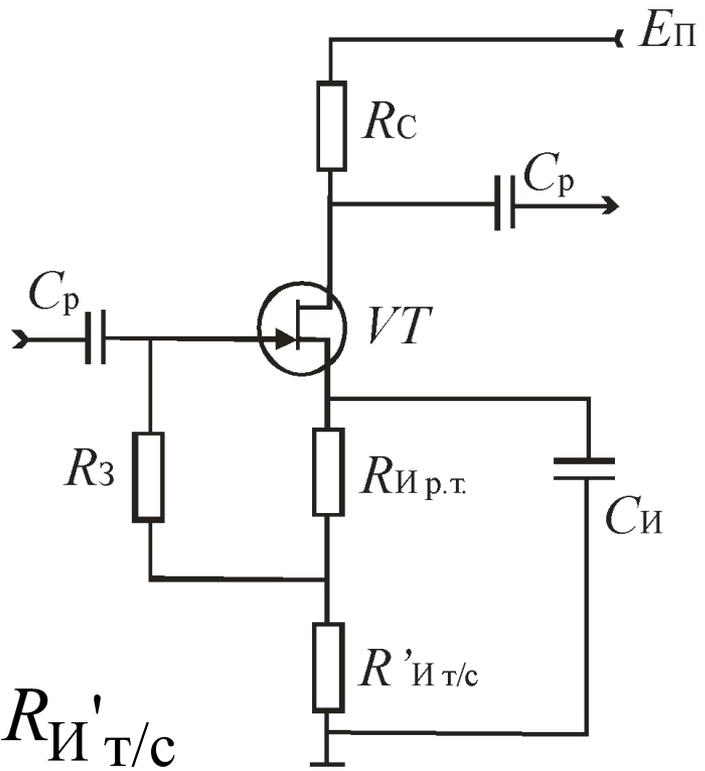
$$dJ_{\text{CДоп}} \approx (10 \div 15)\% \cdot J_{\text{C0}}$$

$$R_{\text{Ит/с}} = \frac{\Delta J_3 \cdot R_3 - \Delta E_3}{\Delta J_{\text{CДоп}}} - \frac{1}{S}$$

В результате получается две величины сопротивления истока:

$R_{Ир.т.} > R_{ИТ/с}$  – это наилучший случай, когда при установке в схему сопротивления обеспечивается термостабилизация лучше заданной

$R_{Ир.т.} < R_{ИТ/с}$  – в этом случае придётся модифицировать схему для обеспечения заданной термостабилизации



$$R_{ИТ/с} = R_{Ир.т.} + R'_{ИТ/с}$$

## 2.1. Классификация обратных связей

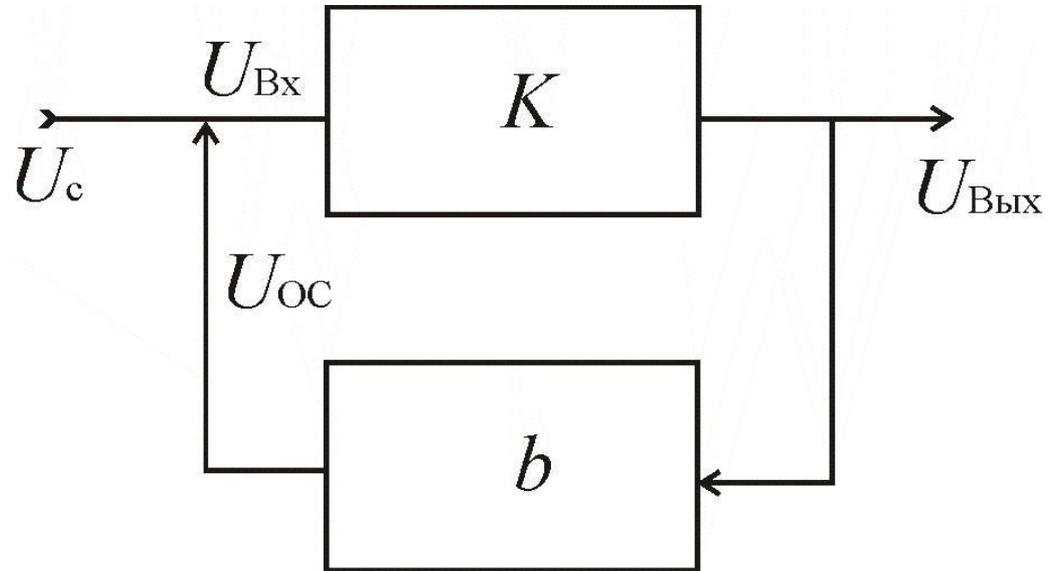


Рис.2.1. Функциональная схема ОС

**В усилительном устройстве обратной называют связь, которая обеспечивает передачу части сигнала из его выходной цепи во входную. Она применяется для стабилизации коэффициента усиления и уменьшения искажений усиленного сигнала, т.е. для улучшения технических параметров и характеристик усилителя.**

**Существует несколько признаков классификации обратных связей:**

***По причинам возникновения ОС:***

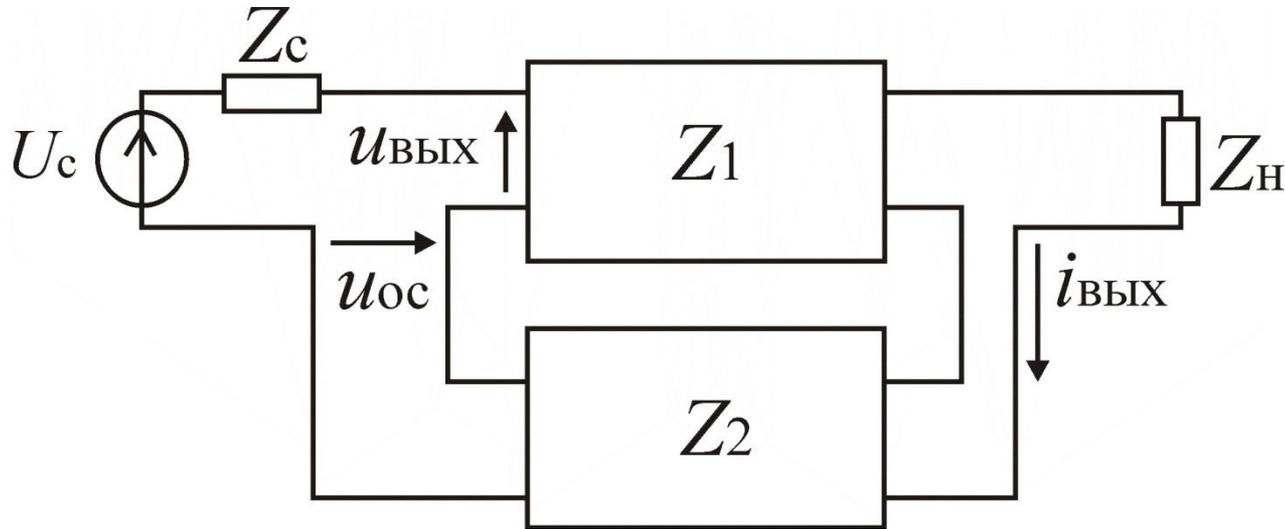
**Любой активный элемент всегда имеет внутреннюю проводимость ОС (у 21).**

**Паразитная ОС между выходом и входом усилителя, обусловленная электромагнитными наводками. От такой связи всегда стараются избавиться, поскольку её параметры и характеристики зависят от многих факторов и сложно контролируются.**

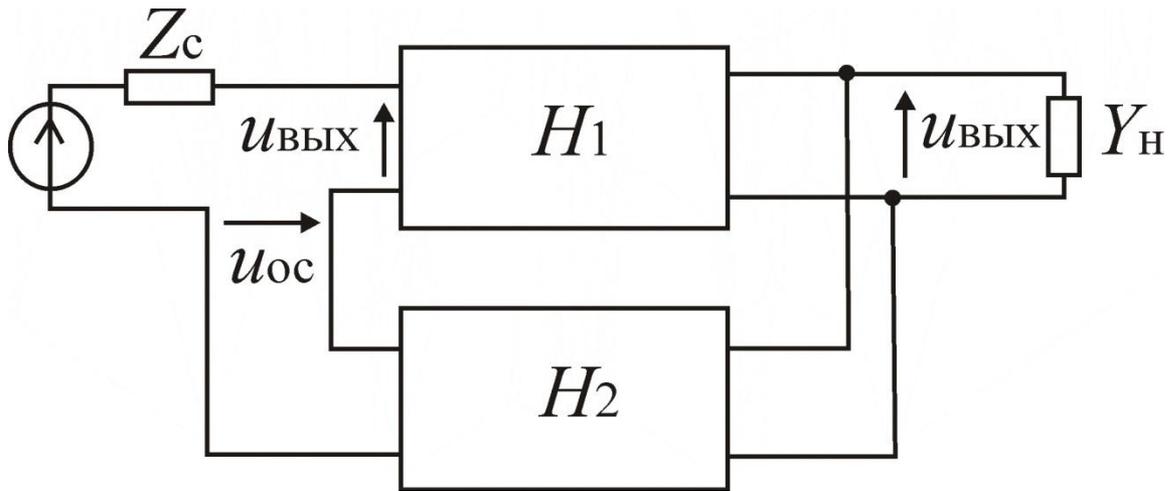
**ОС специально введенная разработчиком для улучшения параметров усилителя.**

## *По виду ОС:*

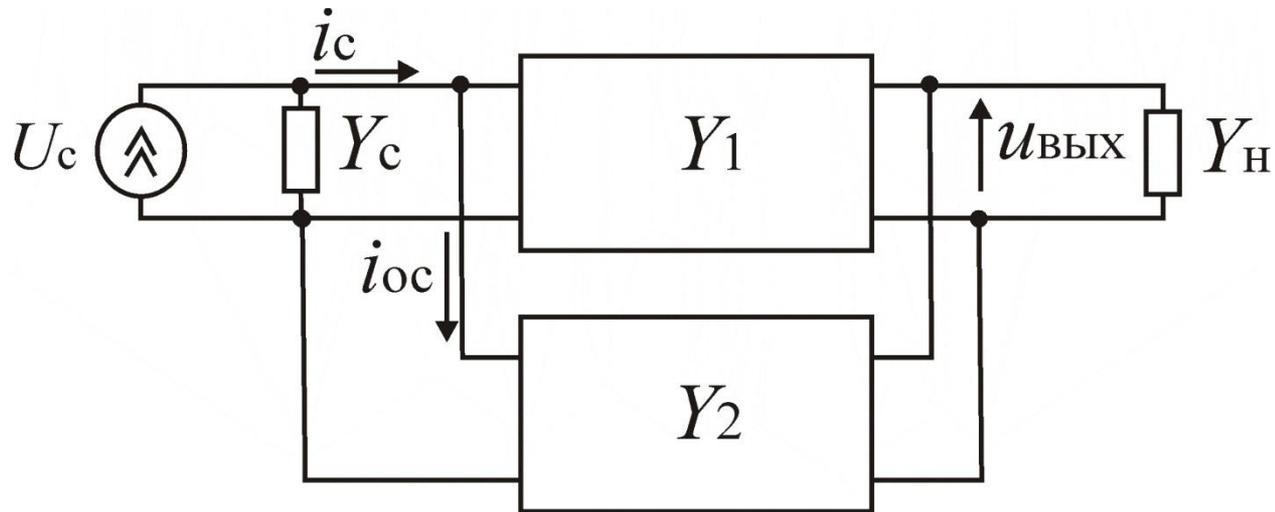
- 1) положительная обратная связь (ПОС). ПОС имеет место в том случае, если сигнал, снимаемый с выхода совпадает по фазе с входным сигналом.**
- 2) отрицательная обратная связь (ООС). Если сигнал на выходе усилителя противоположен по фазе входному сигналу, то тогда имеет место случай ООС. Как правило, в усилителях применяют именно ООС.**



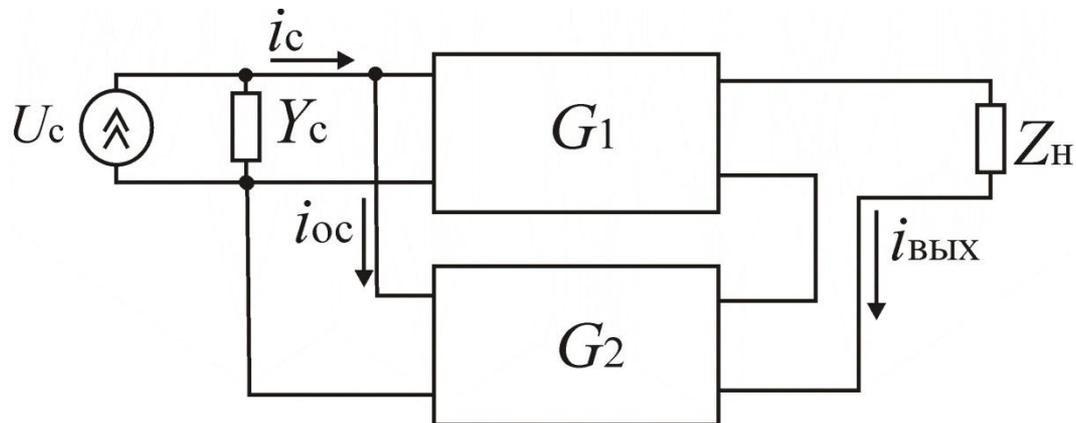
**Рис.2.2. Последовательная по току ОС**



**Рис.2.3. Последовательная по напряжению ОС**



**Рис.2.4. Параллельная по напряжению ОС**



**Рис.2.5. Параллельная по току ОС**

## 2.2. Влияние отрицательной обратной связи на параметры и характеристики усилителя

*Влияние ООС на коэффициент усиления.* Как следует из формулы (2.2) при введении ООС номинальное усиление уменьшается в  $F$ -раз (в фактор обратной связи раз).

*Влияние ООС на полосу пропускания  $\Delta f$ .* При введении ООС увеличивается полоса пропускания усилителя. Поскольку площадь усиления постоянно, то расширение полосы пропускания происходит обратно пропорционально уменьшению коэффициента усиления (в фактор обратной связи раз).

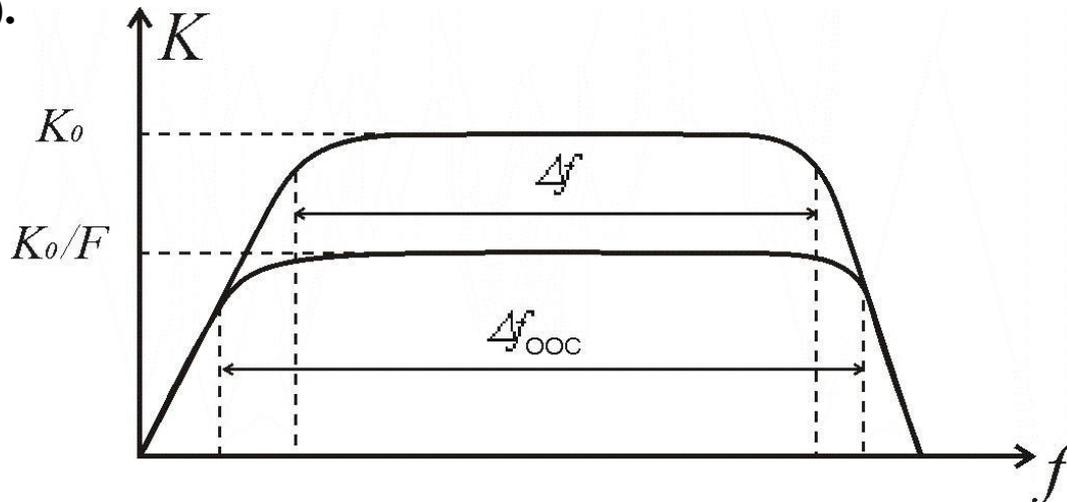
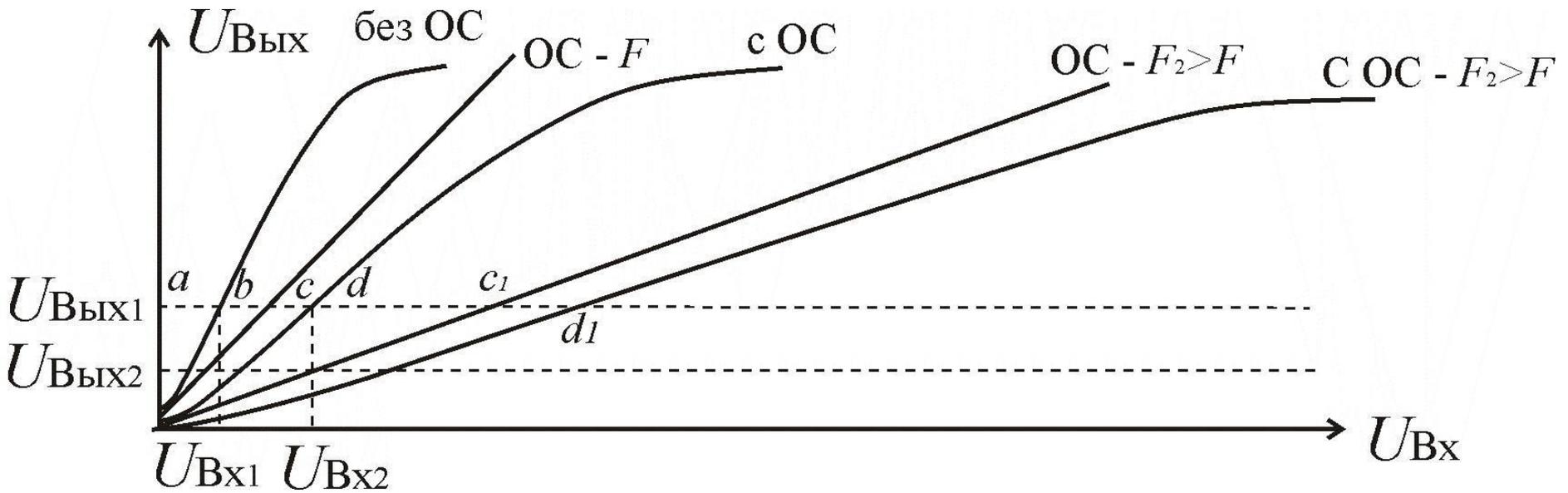


Рис.2.6. Изменение АЧХ при введении ОС

**Влияние ООС на нелинейные искажения.** В результате усиления входного сигнала амплитуда выходного напряжения может достигать больших значений в каждом каскаде, что приведет к попаданию в нелинейную часть характеристики ВАХ и появлению нелинейных искажений. Для уменьшения нелинейных искажений, которые чаще всего появляются в оконечных каскадах, вводят ООС.



**Рис.2.7. Изменение АХ при введении ООС**