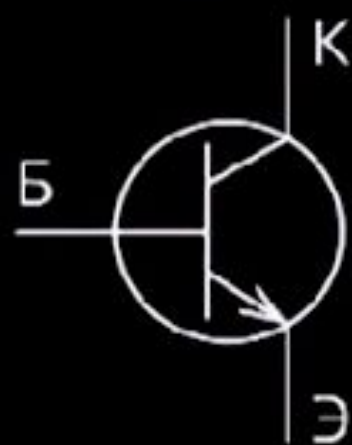


# ***Биполярные транзисторы***

***Устройство  
и принцип действия  
биполярного  
транзистора***

**Биполярный транзистор** – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими  $p - n$  переходами и с тремя выводами.

В зависимости от чередования легированных областей различают транзисторы  $n - p - n$  и  $p - n - p$  типа.



Э – эмиттер  
Б – база  
К – коллектор



## Режимы работы биполярного транзистора:

1. **Активный режим.** Эмиттерный переход открыт, коллекторный закрыт. Используется в усилителях.
2. **Режим отсечки.** Оба перехода закрыты.  $i \rightarrow 0$ .
3. **Режим насыщения.** Оба перехода открыты. Через них протекают прямые токи.
4. **Инверсный режим.** Коллекторный переход открыт, эмиттерный закрыт.



## Соотношения между токами в транзисторе

$$i_{k \text{ упр}} = \alpha i_э$$

Первое соотношение:

$$i_k = \alpha i_э + i_{кб0}$$

Введем обозначения:  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$        $\frac{i_{кб0}}{1 - \alpha} = i_{кэ0}$

Второе соотношение:

$$i_k = \beta i_б + i_{кэ0}$$

$$i_{кэ0} = (\beta + 1) i_{кб0}$$

$\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера (0.95-0.99)

$\beta$  – коэффициент передачи тока базы (10-500)

$i_{кэ0}$  – сквозной ток. Он протекает насквозь через весь транзистор при обрыве базы ( $i_б = 0$ ).

## Усилительные свойства транзистора

Пусть  $E_3 = 0,5 \text{ В}$ ,  $i_3 = 5 \text{ мА}$ .

**Мощность**, расходуемая на управление транзистором (входная мощность):

$$P_{\text{вх}} = E_3 i_3 = 2,5 \text{ мВт.}$$

Пусть коллекторная нагрузка  $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$

$$i_{\text{к}} \approx i_3$$

$$P_{\text{н}} = i_{\text{к}}^2 R_{\text{к}} = 25 \text{ мВт}$$

$$K = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = 10$$

$K$  – коэффициент усиления по мощности

***Схемы включения  
биполярных  
транзисторов***



В каждой из схем включения, один из электродов является общим для входной и выходной цепи. Различают три схемы включения: с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ), с общим коллектором (ОК).

### Основные параметры схем включения транзистора:

- Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}$$

- Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$$

- Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}}$$

- Входное сопротивление:

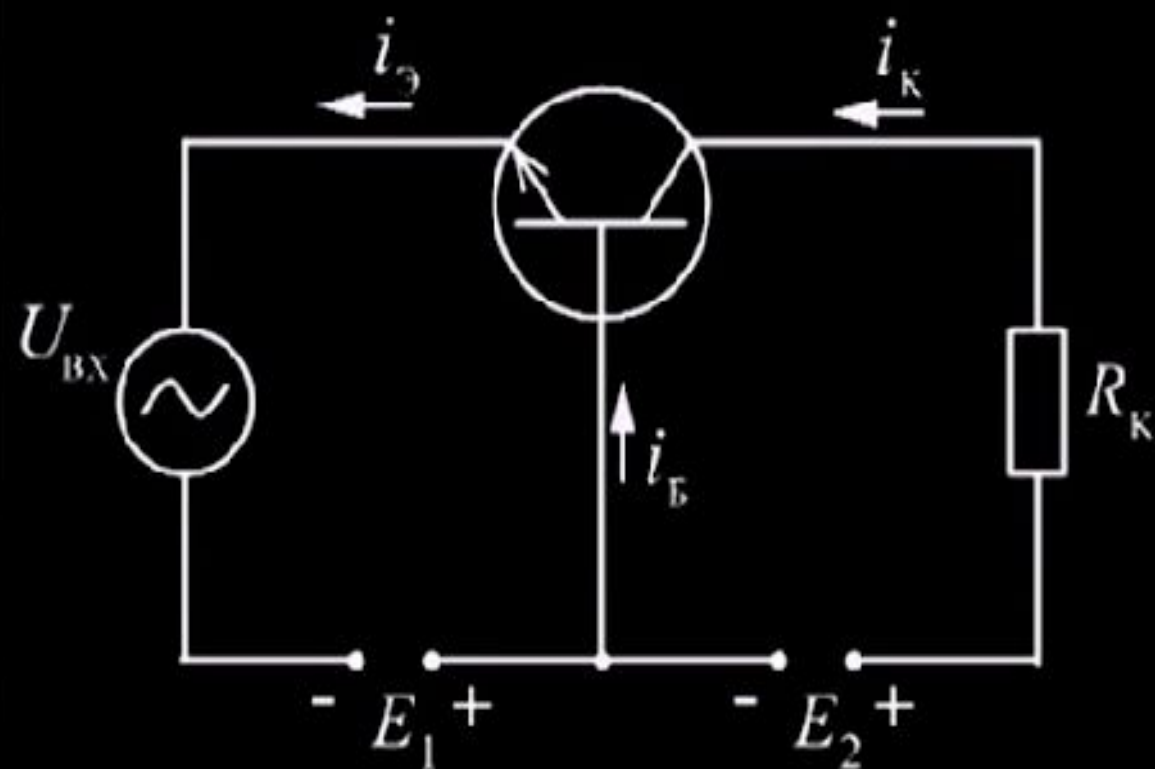
$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}$$

- Выходное сопротивление:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}$$

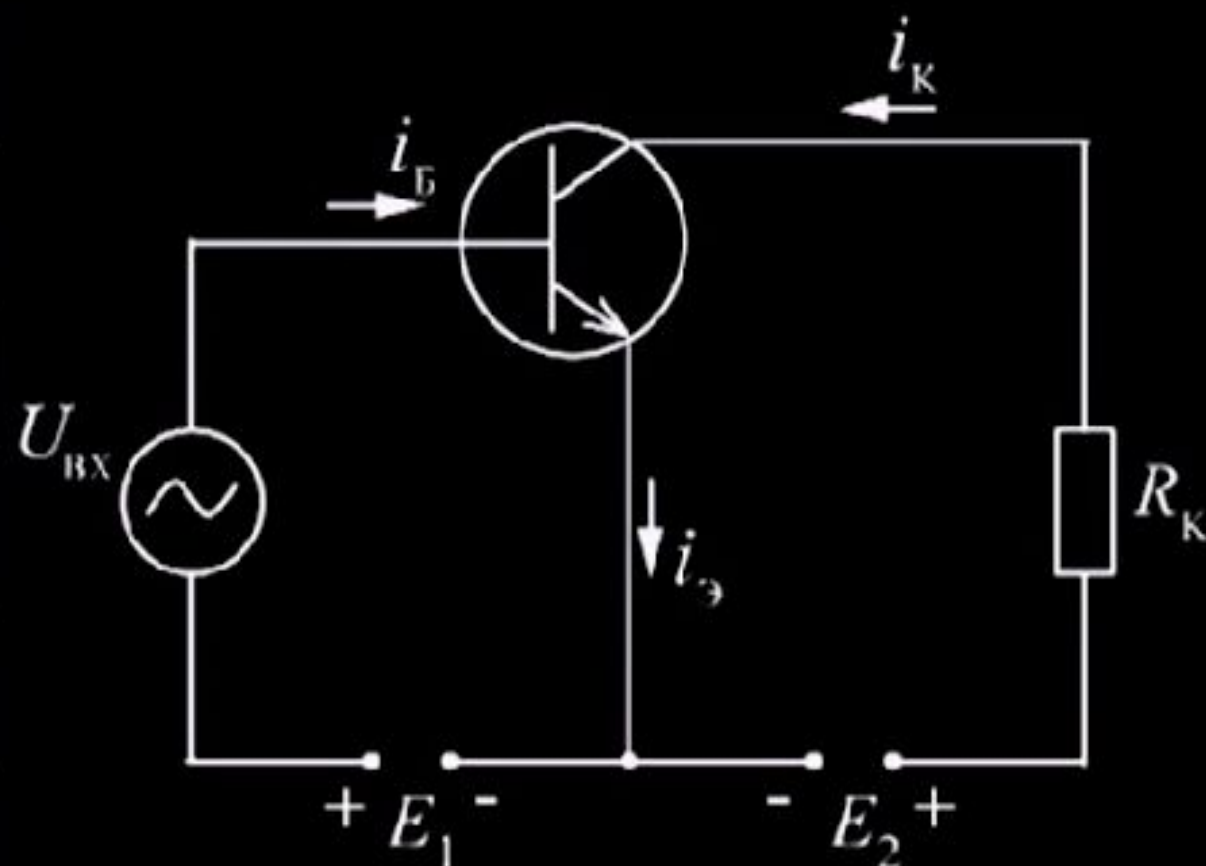
Параметр	Значение
$K_i$	$< 1$ (порядка $\alpha$ )
$K_u$	10 – 100
$K_p$	10 – 100
$R_{вх}$	10 Ом – 100 Ом
$R_{вых}$	100 кОм – 1 МОм
Фазовый сдвиг между $U_{вых}$ и $U_{вх}$	Отсутствует

### Схема с общей базой



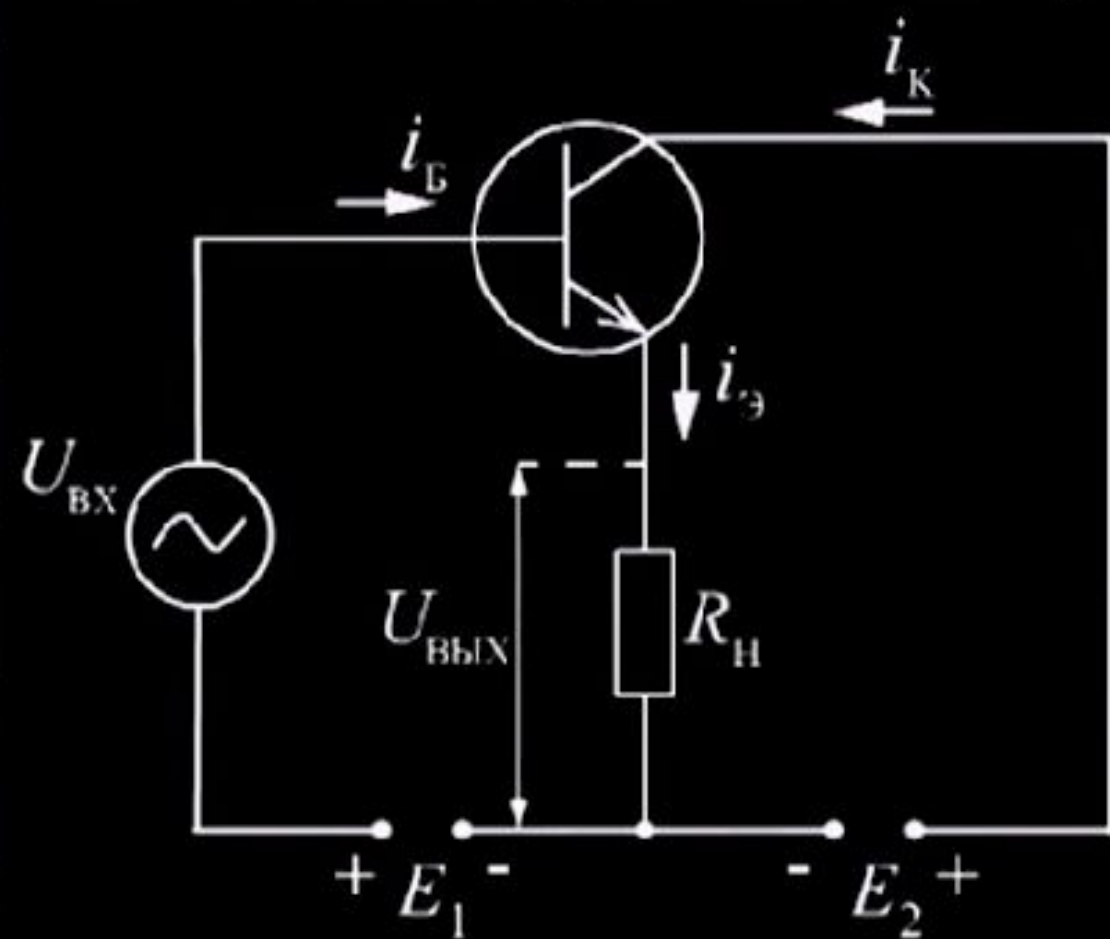
Параметр	Значение
$K_i$	10 – 100 (порядка $\beta$ )
$K_u$	10 – 100
$K_p$	100 – 10000
$R_{вх}$	100 Ом – 1 кОм
$R_{вых}$	1 – 10 кОм
Фазовый сдвиг между $U_{вх}$ и $U_{вых}$	180° (переворачивает фазу)

### Схема с общим эмиттером



Параметр	Значение
$K_i$	10 – 100
$K_u$	< 1
$K_p$	10 – 100
$R_{вх}$	10 – 100 кОм
$R_{вых}$	100 Ом – 1кОм
Фазовый сдвиг между $U_{вых}$ и $U_{вх}$	Отсутствует

### Схема с общим коллектором



***Статические  
вольт-амперные  
характеристики***

**Статические характеристики** – зависимости между токами и напряжениями в транзисторе, снятые при постоянном токе в отсутствие нагрузки.

Различают два семейства характеристик:

● Входные

$$i_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}}) \Big|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}}$$

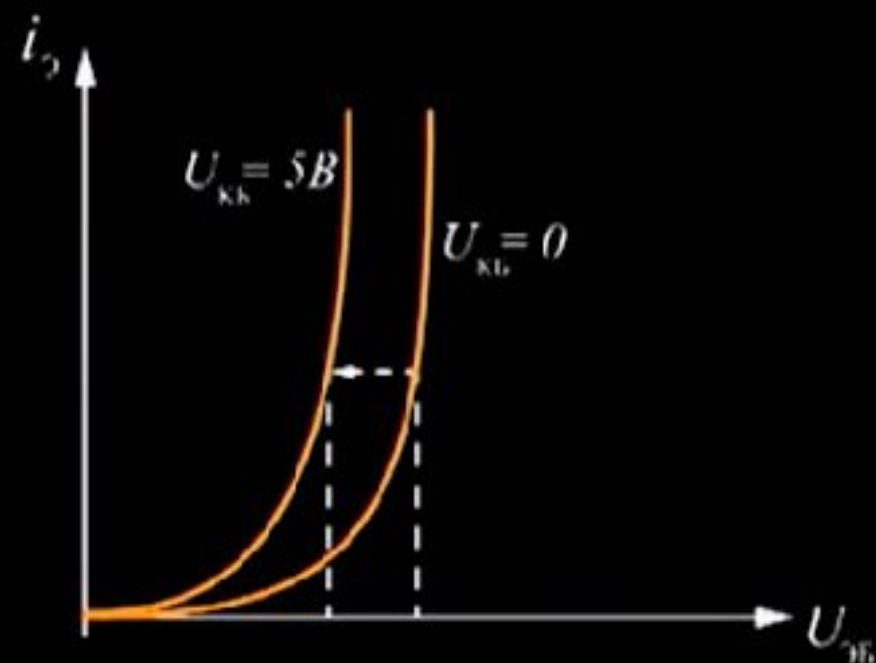
● Выходные

$$i_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}}) \Big|_{i_{\text{ВХ}} = \text{const}}$$

# ВАХ транзистора для схемы с общей базой

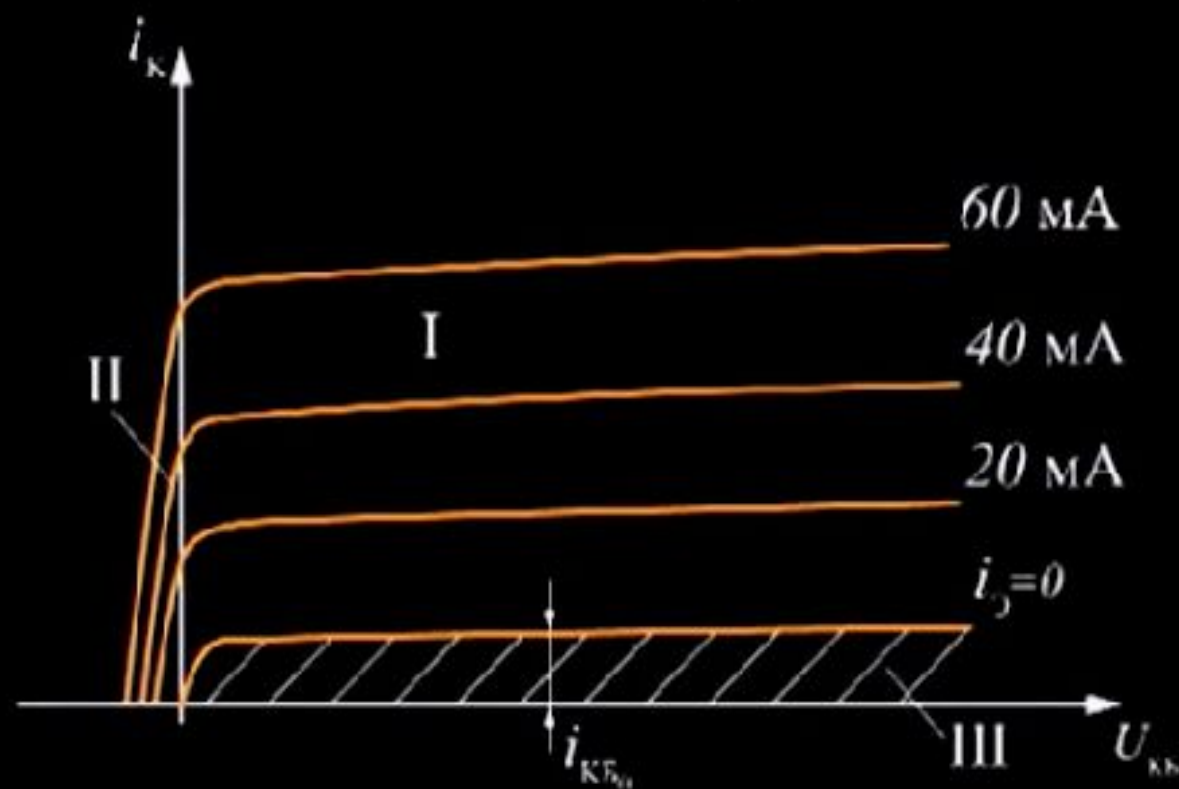
Входные характеристики:

$$i_3 = f(U_{36}) \Big|_{U_{кб} = const}$$



Выходные характеристики:

$$i_{к} = f(U_{кб}) \Big|_{i_3 = const}$$

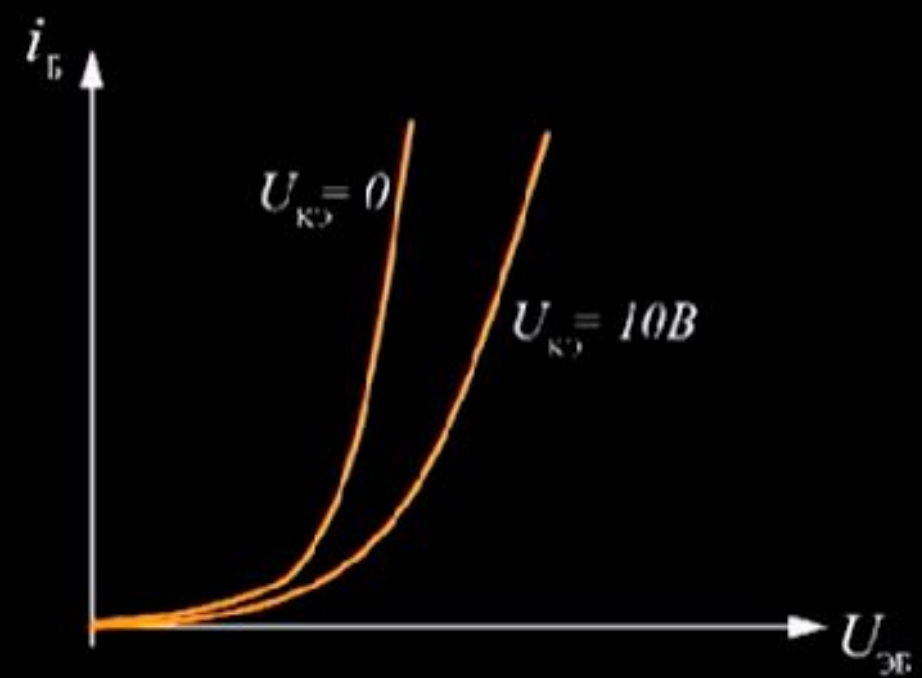


- I – Активный режим  $U_{кб} > 0$
- II – Режим насыщения  $U_{кб} < 0$
- III – Режим отсечки

# ВАХ транзистора для схемы с общим эмиттером

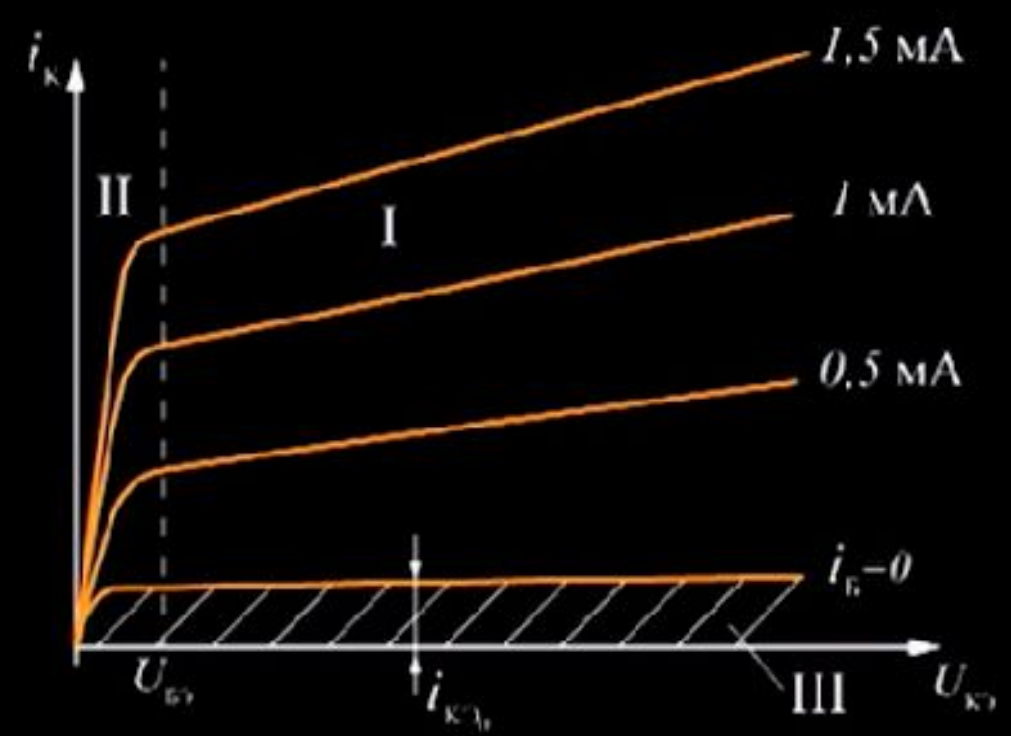
Входные характеристики:

$$i_B = f(U_{BЭ}) \Big|_{U_{КЭ} = const}$$



Выходные характеристики:

$$i_K = f(U_{КЭ}) \Big|_{i_B = const}$$



- I – Область активного режима
- II – Область насыщения
- III – Область отсечки



***Параметры  
и эквивалентные  
схемы***

Собственные (первичные) параметры характеризуют свойства самого транзистора и не зависят от схемы его включения.

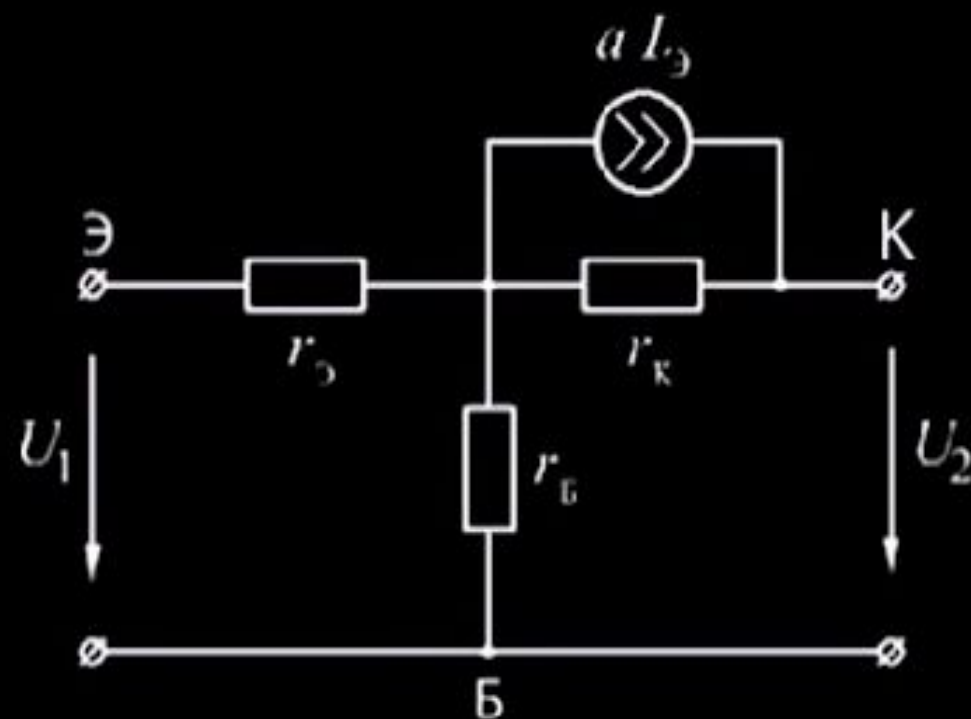
Первичные параметры:

$\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера

$r_{э}$  – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода.  $r_{э} \sim 1-10$  Ом

$r_{б}$  – сопротивление базы (50-200 Ом)

$r_{к}$  – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода ( $\sim 100$  кОм)



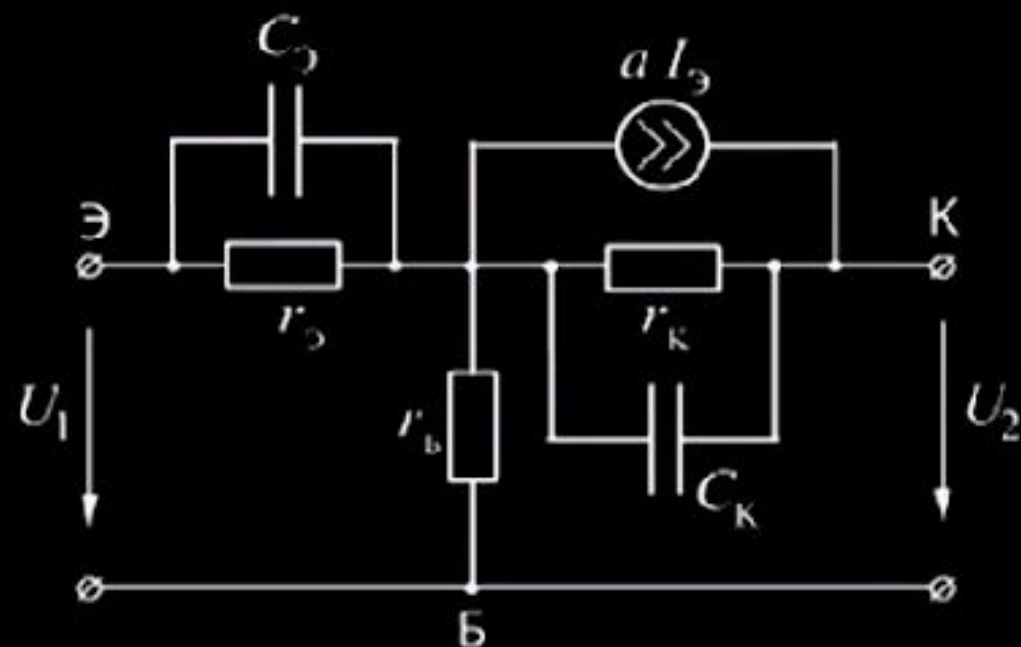
T – образная физическая эквивалентная схема транзистора с ОБ (для низких частот)

## Физическая эквивалентная схема транзистора с ОБ для высоких частот

### Влияние $C_k$ :

НЧ:  $\frac{1}{\omega C_k} \uparrow$  - весь ток генератора  $\alpha I_3$  идет в нагрузку

ВЧ:  $\frac{1}{\omega C_k} \downarrow$  - в емкость ответвляется часть тока  $\downarrow K_i, K_u, K_p$



### Влияние $C_3$ :

Она шунтирует на ВЧ сопротивление  $r_3$ , уменьшается напряжение на эмиттерном переходе, которое управляет током коллектора. Уменьшается усиление.

Влияние  $C_3$  проявляется слабее и на более высоких частотах, поскольку она шунтирована малым  $r_3$ .

В итоге наличие емкостей приводит к уменьшению параметров  $\alpha$  и  $\beta$ .

Частотные свойства биполярного транзистора характеризуются параметрами:

$f_{\alpha}$  - предельная частота коэффициента передачи тока эмиттера.

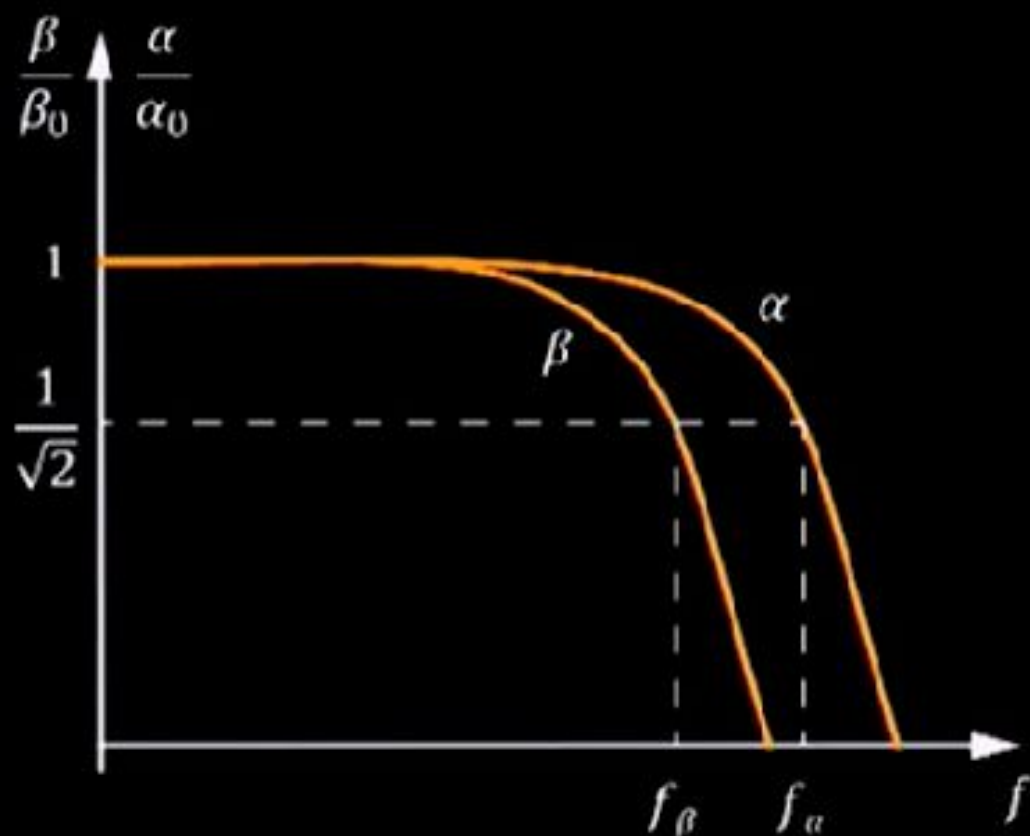
$f_{\beta}$  - предельная частота коэффициента передачи тока базы.

Это частоты, на которых коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз.

Коэффициент  $\beta$  уменьшается с ростом частоты быстрее, чем  $\alpha$ , поэтому схема с ОЭ обладает значительно худшими частотными свойствами, чем схема с ОБ.

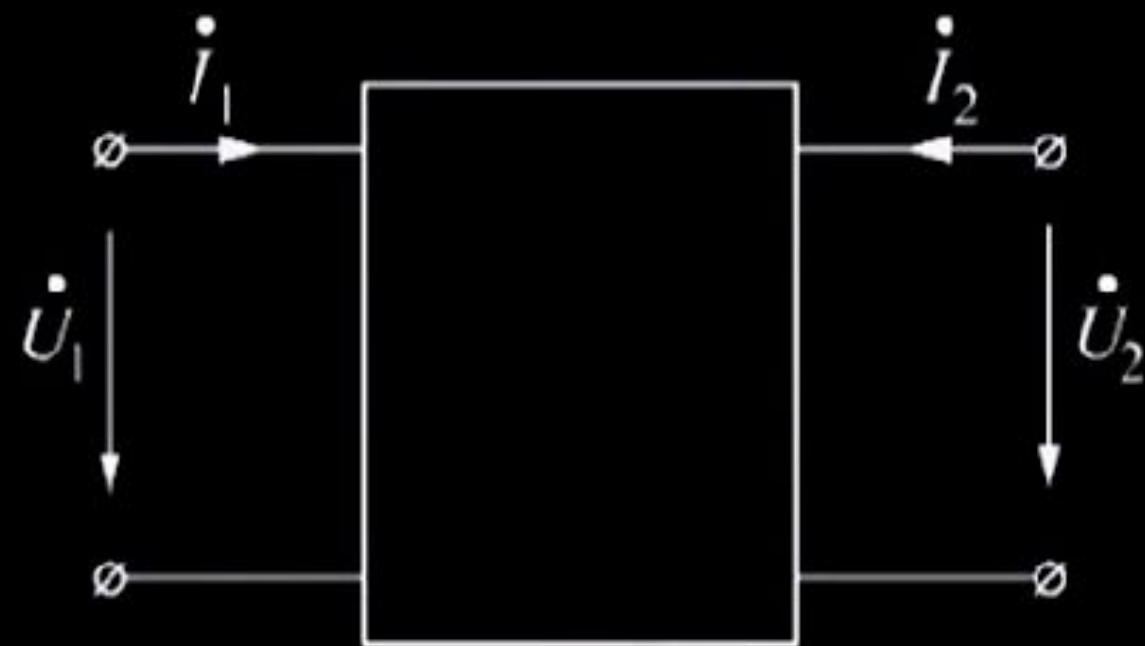
$f_{гр}$  - граничная частота коэффициента передачи тока. Это частота, на которой  $\beta = 1$  (транзистор перестает усиливать ток).

$$f_{гр} = 0,8f_{\alpha}$$



$$f_{\alpha} > f_{\beta}$$

Система вторичных параметров транзистора основана на том, что транзистор рассматривается как линейный четырёхполюсник, имеющий два выходных и два входных зажима.



$\dot{I}_1, \dot{U}_1$  - входные параметры (ток и напряжение)

$\dot{U}_2, \dot{I}_2$  - выходные параметры (ток и напряжение)

# Система $H$ - параметров

$$H_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0} \quad \begin{aligned} U_1 &= H_{11}I_1 + H_{12}U_2 \\ I_2 &= H_{21}I_1 + H_{22}U_2 \end{aligned}$$

входное сопротивление в режиме короткого замыкания по выходу

$$H_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0}$$

коэффициент передачи (усиления) тока в режиме короткого замыкания по выходу

$$H_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0}$$

коэффициент обратной связи по напряжению в режиме холостого хода во входной цепи

$$H_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0}$$

выходная проводимость в режиме холостого хода во входной цепи.

$h$  - параметры зависят от схемы включения транзистора. Для схемы с ОЭ:

$$\begin{aligned} U_{6э} &= h_{11э}I_6 + h_{12э}U_{кэ} \\ I_к &= h_{21э}I_6 + h_{22э}U_{кэ} \end{aligned}$$

## Определение $h$ – параметров по статическим характеристикам

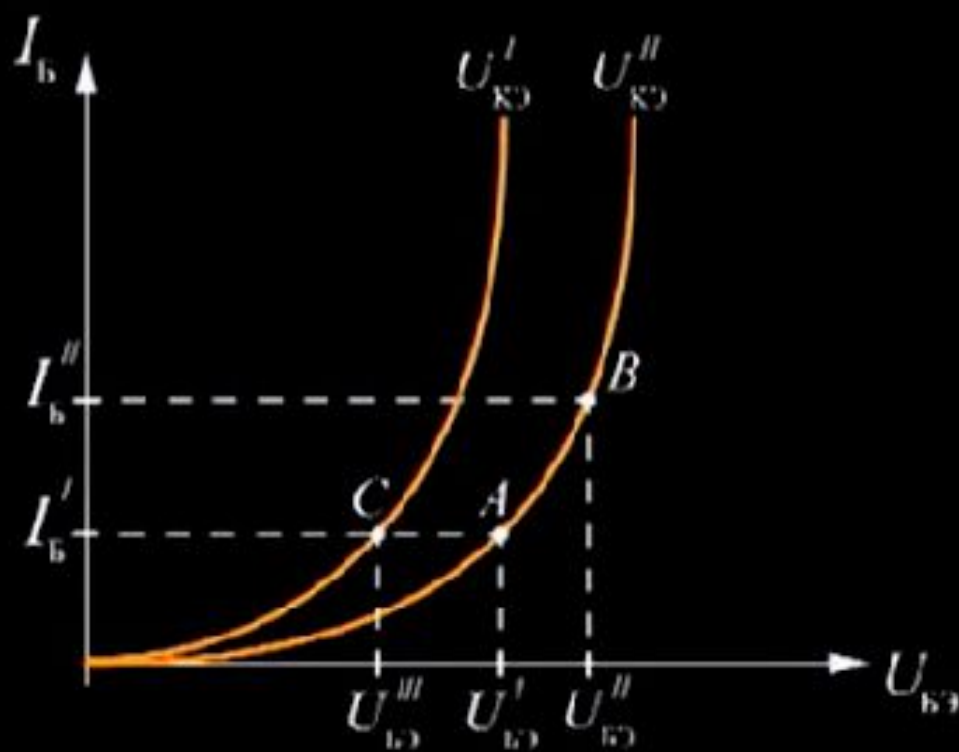
Параметры рассчитываются вблизи рабочей точки транзистора по приращениям токов и напряжений

Параметры  $h_{11}$  и  $h_{12}$  определяются по входным характеристикам:

$$\begin{aligned}\Delta U_{63} &= h_{113} \Delta I_6 + h_{123} \Delta U_{к3} \\ \Delta I_к &= h_{21} \Delta I_6 + h_{223} \Delta U_{к3}\end{aligned}$$

$$h_{113} = \left. \frac{\Delta U_{63}}{\Delta I_6} \right|_{U_{к3} = \text{const}} = \frac{U_{63}'' - U_{63}'}{I_6'' - I_6'}$$

$$h_{123} = \left. \frac{\Delta U_{63}}{\Delta U_{к3}} \right|_{I_6 = \text{const}} = \frac{U_{63}' - U_{63}'''}{U_{к3}'' - U_{к3}'}$$



Параметры  $h_{21}$  и  $h_{22}$  определяются по выходным характеристикам:

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\kappa\text{Э}} = \text{const}} = \frac{I_{\kappa}^{\text{III}} - I_{\kappa}^{\text{I}}}{I_{\text{Б}}^{\text{III}} - I_{\text{Б}}^{\text{I}}}$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappa\text{Э}}} \right|_{I_{\text{Б}} = \text{const}} = \frac{I_{\kappa}^{\text{II}} - I_{\kappa}^{\text{I}}}{U_{\kappa\text{Э}}^{\text{II}} - U_{\kappa\text{Э}}^{\text{I}}}$$

