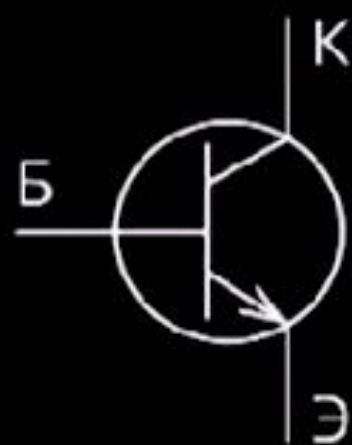


Биполярные транзисторы

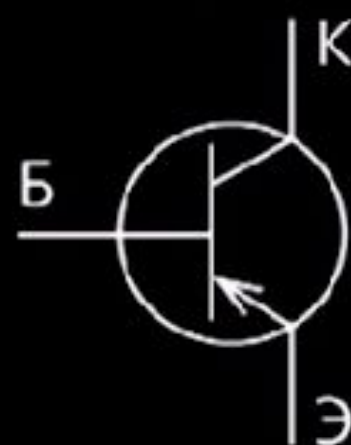
***Устройство
и принцип действия
биполярного
транзистора***

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:

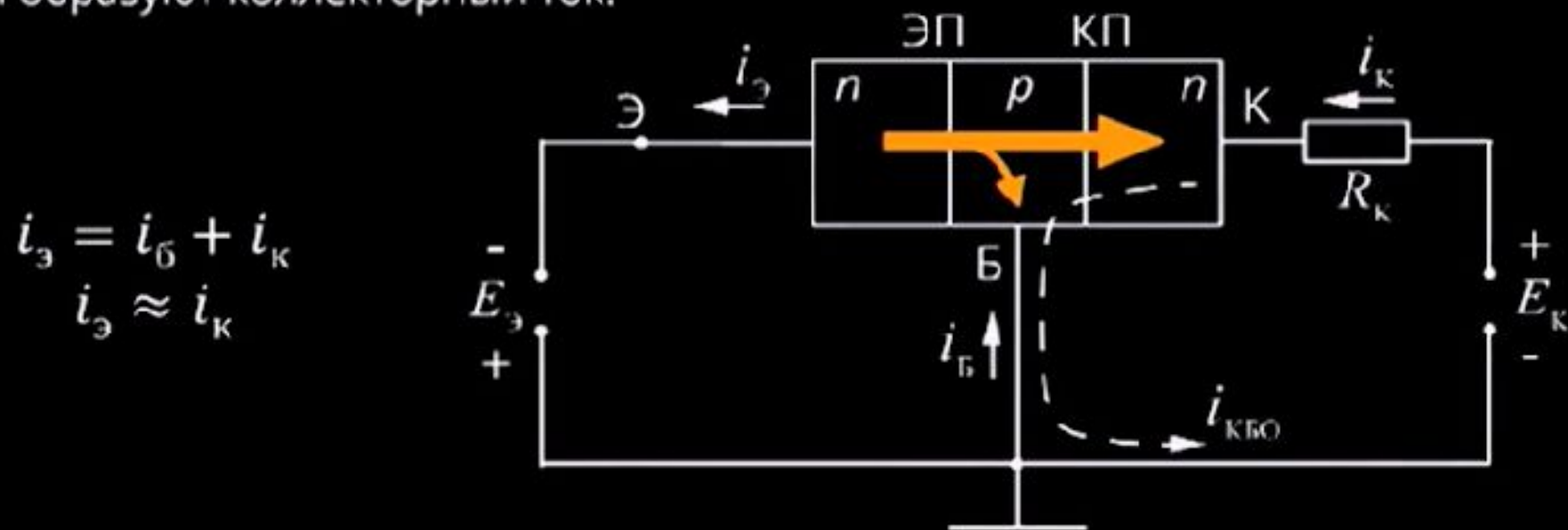
1. **Активный режим.** Эмиттерный переход открыт, коллекторный закрыт. Используется в усилителях.
2. **Режим отсечки.** Оба перехода закрыты. $i \rightarrow 0$.
3. **Режим насыщения.** Оба перехода открыты. Через них протекают прямые токи.
4. **Инверсный режим.** Коллекторный переход открыт, эмиттерный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

Физические процессы в транзисторе в активном режиме

Источники питания E_3 и E_K обеспечивают работу транзистора в активном режиме.
 $E_3 = 0,4 - 0,7В$.

Электроны диффундируют из эмиттера в базу. Из-за низкой концентрации примесей в базе и ее малой толщины подавляющее большинство электронов достигает коллекторного перехода, не успев рекомбинировать с дырками базы. Незначительная рекомбинация обуславливает наличие малого тока базы.

Попадая в коллектор, электроны ускоряются электрическим полем коллекторного перехода и образуют коллекторный ток.



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:

$$i_k = \beta i_б + i_{кэ0}$$

$$i_{кэ0} = (\beta + 1) i_{кб0}$$

α – коэффициент передачи тока эмиттера (0.95-0.99)

β – 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:

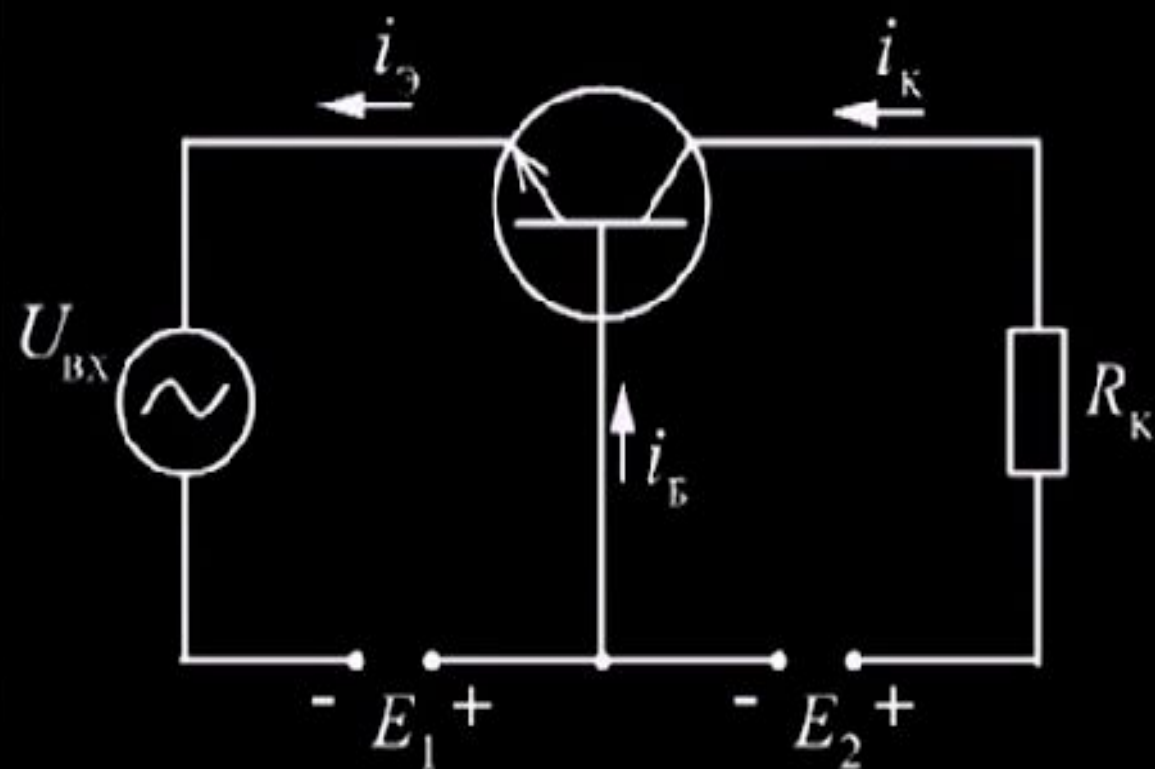
$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}$$

- Выходное сопротивление:

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

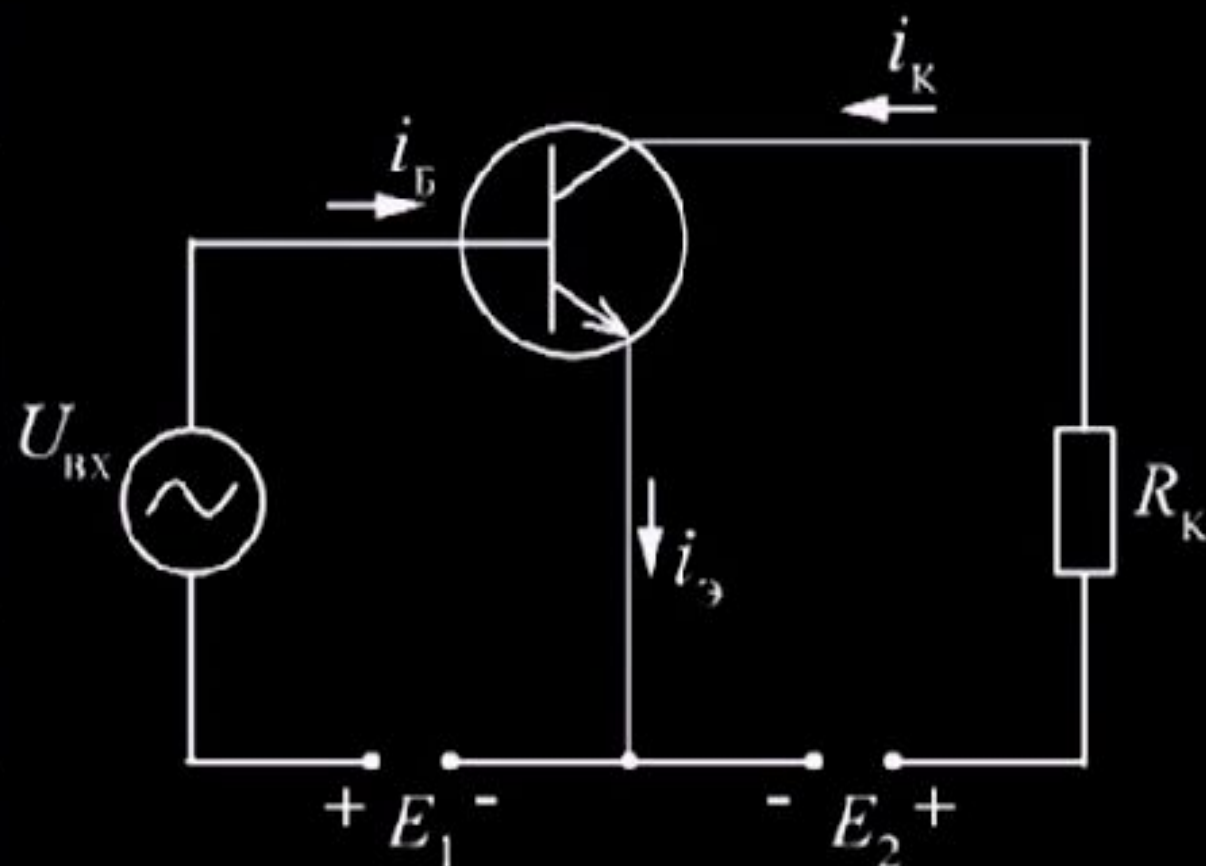
Параметр	Значение
K_i	< 1 (порядка α)
K_u	10 – 100
K_p	10 – 100
$R_{вх}$	10 Ом – 100 Ом
$R_{вых}$	100 кОм – 1 МОм
Фазовый сдвиг между $U_{вых}$ и $U_{вх}$	Отсутствует

Схема с общей базой



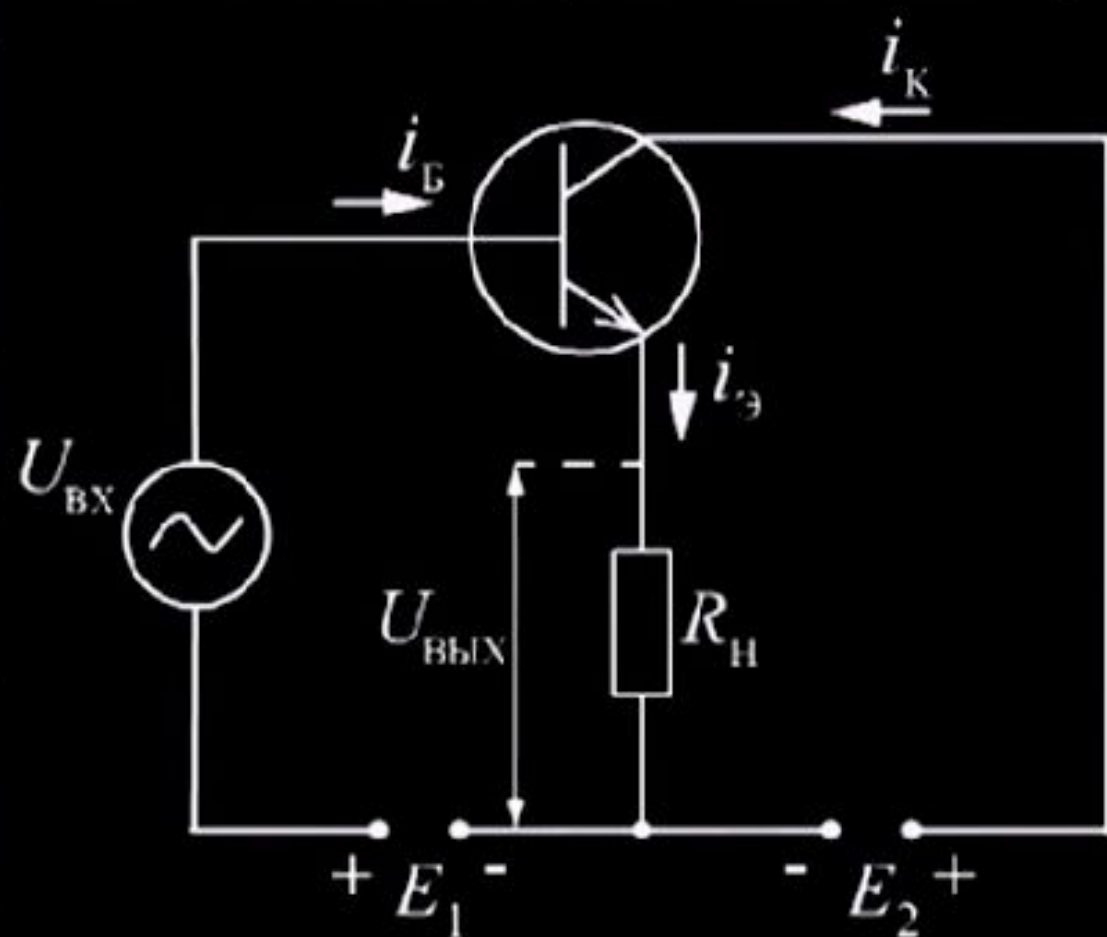
Параметр	Значение
K_i	10 – 100 (порядка β)
K_u	10 – 100
K_p	100 – 10000
$R_{вх}$	100 Ом – 1 кОм
$R_{вых}$	1 – 10 кОм
Фазовый сдвиг между $U_{вх}$ и $U_{вых}$	180° (переворачивает фазу)

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.

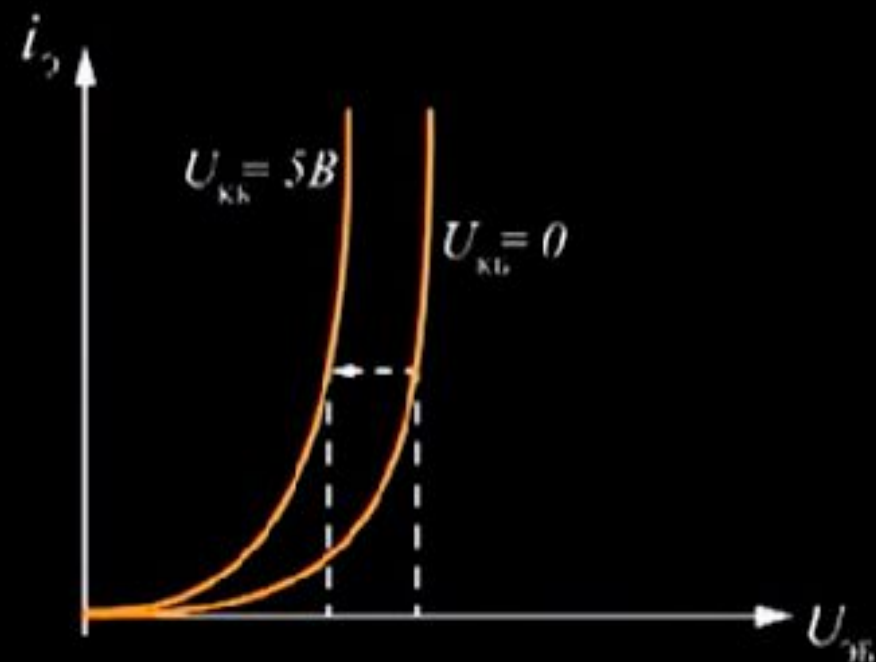
Различают два семейства характеристик:

- **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

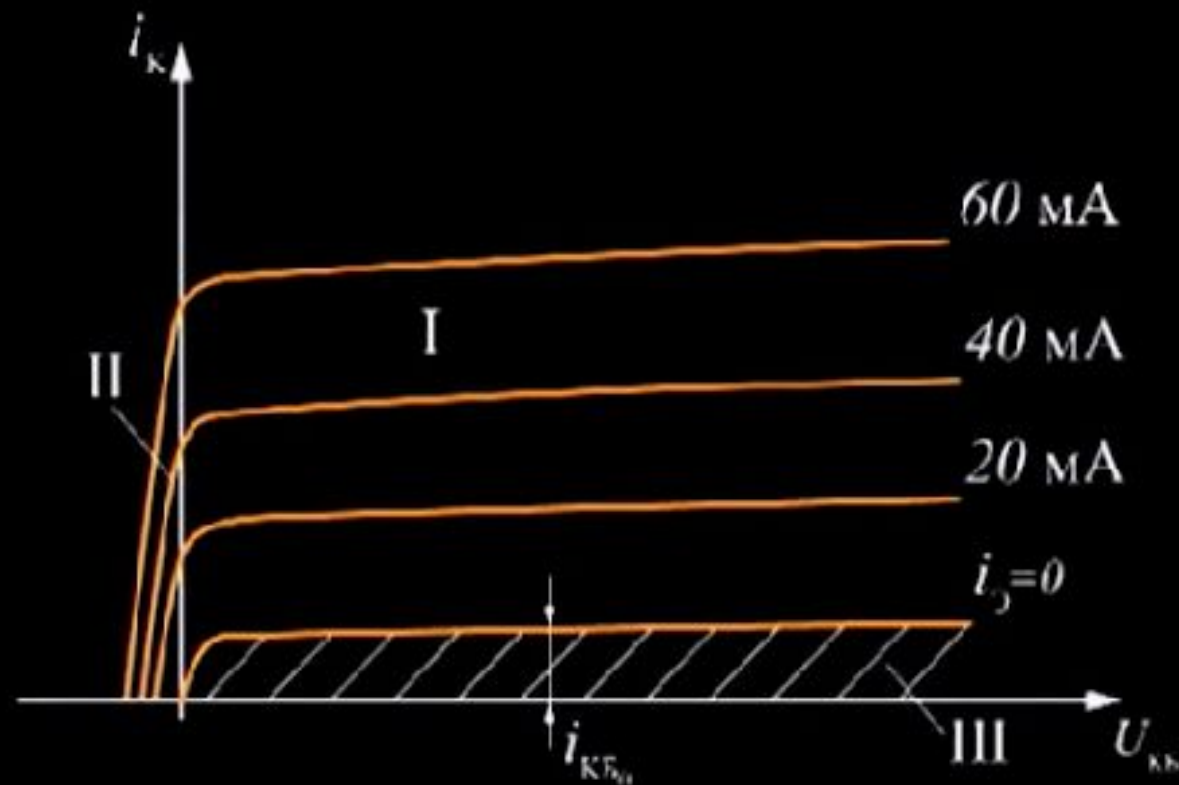
Входные характеристики:

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



Выходные характеристики:

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



I – Активный режим

II – Режим насыщения

III – Режим отсечки

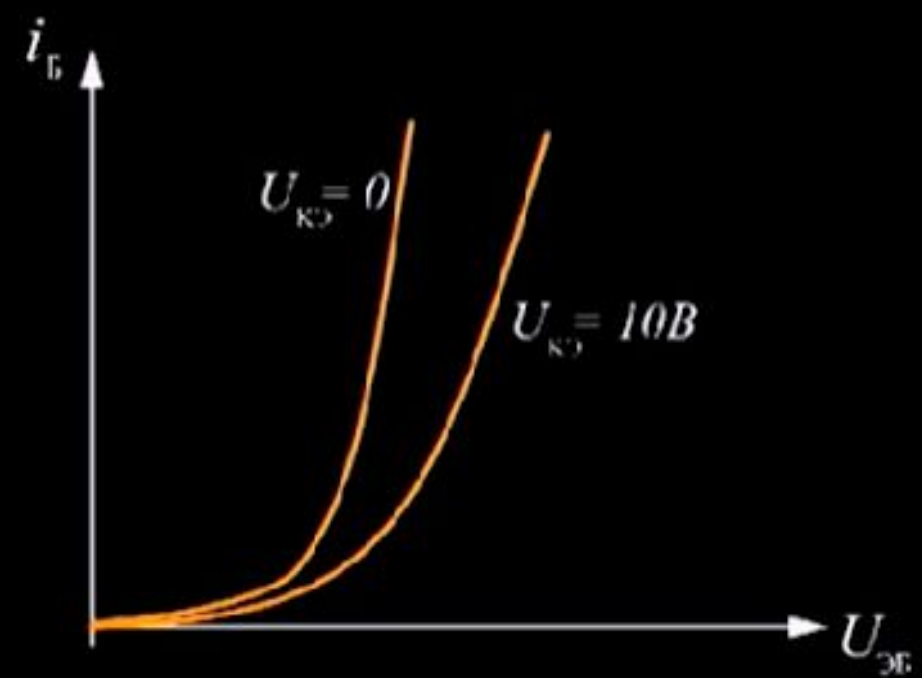
$U_{кб} > 0$

$U_{кб} < 0$

ВАХ транзистора для схемы с общим эмиттером

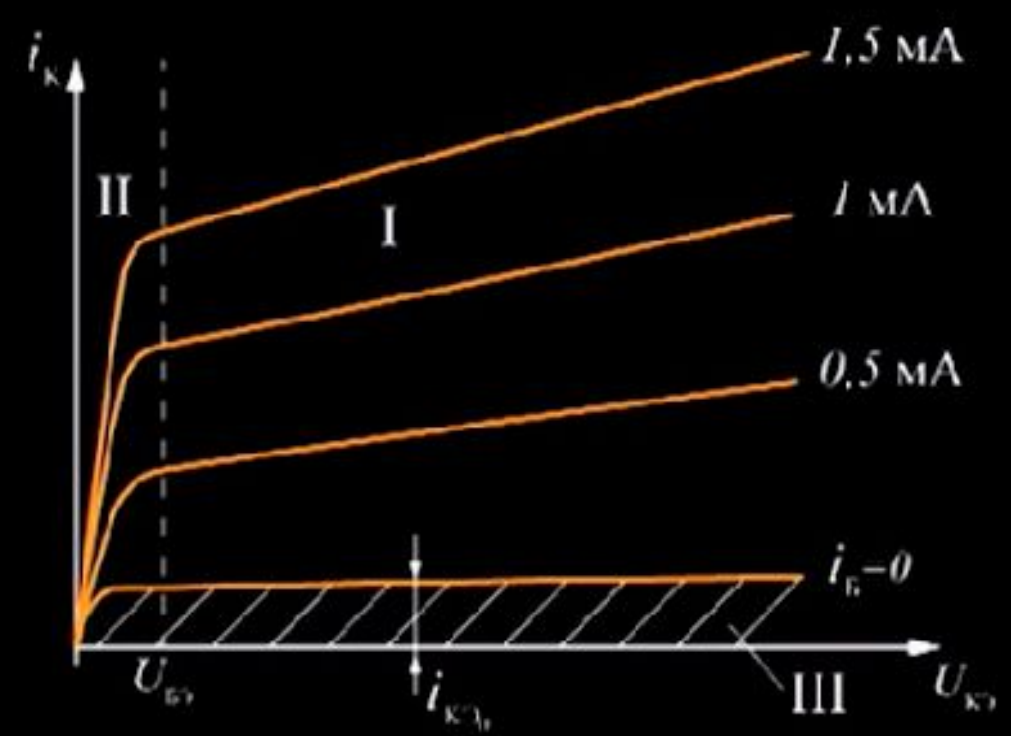
Входные характеристики:

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



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.

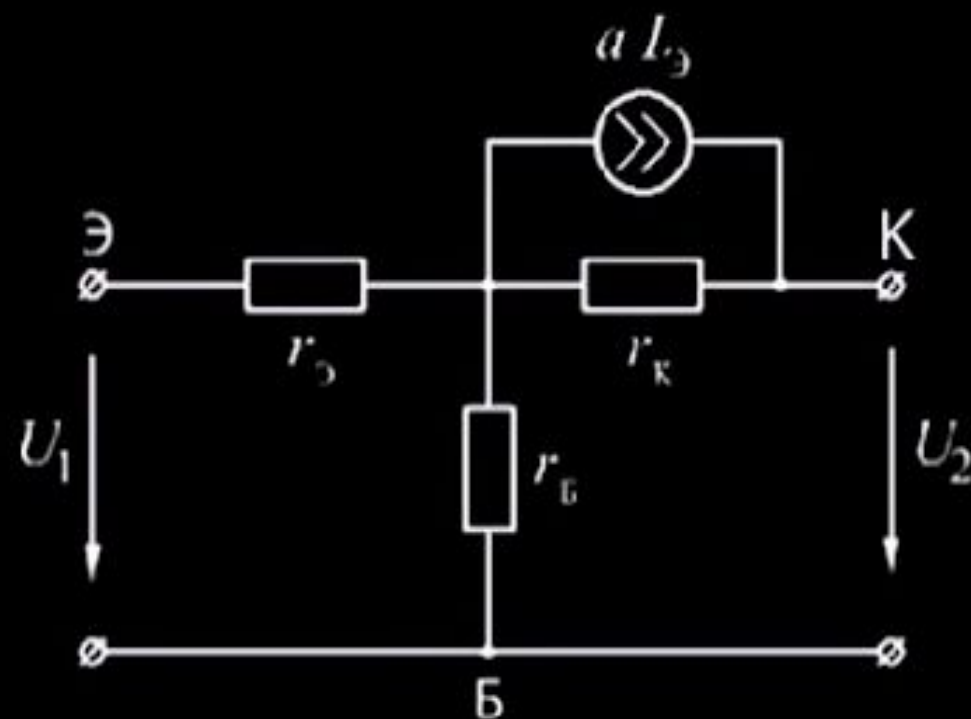
Первичные параметры:

α – 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 (~ 100 кОм)



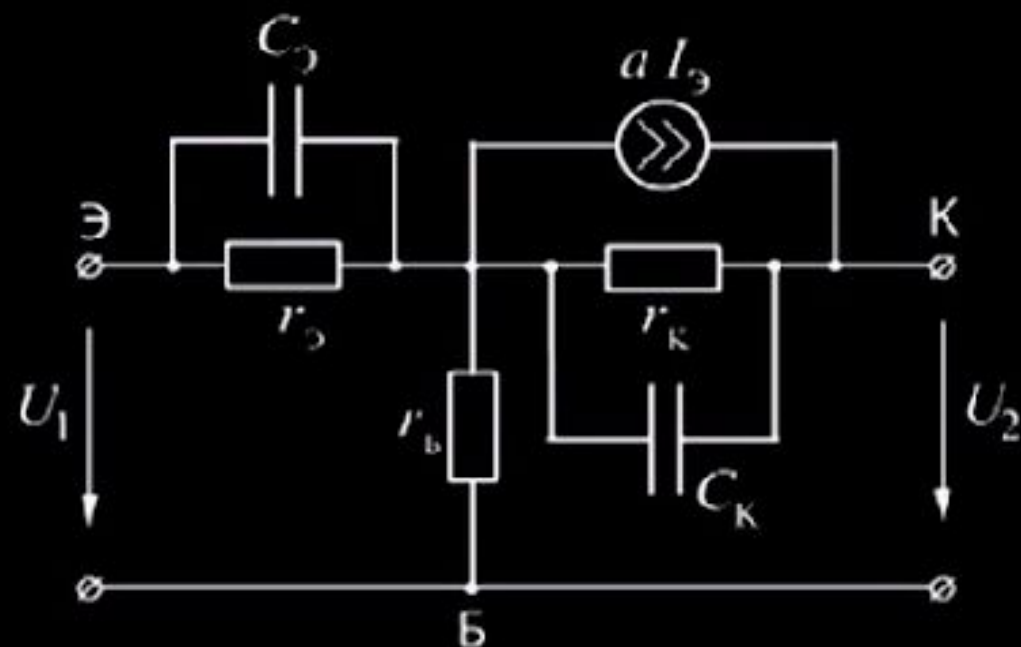
T – образная физическая эквивалентная схема транзистора с ОБ (для низких частот)

Физическая эквивалентная схема транзистора с ОБ для высоких частот

Влияние C_k :

НЧ: $\frac{1}{\omega C_k} \uparrow$ - весь ток генератора αI_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 α и β .

Частотные свойства биполярного транзистора характеризуются параметрами:

f_{α} - предельная частота коэффициента передачи тока эмиттера.

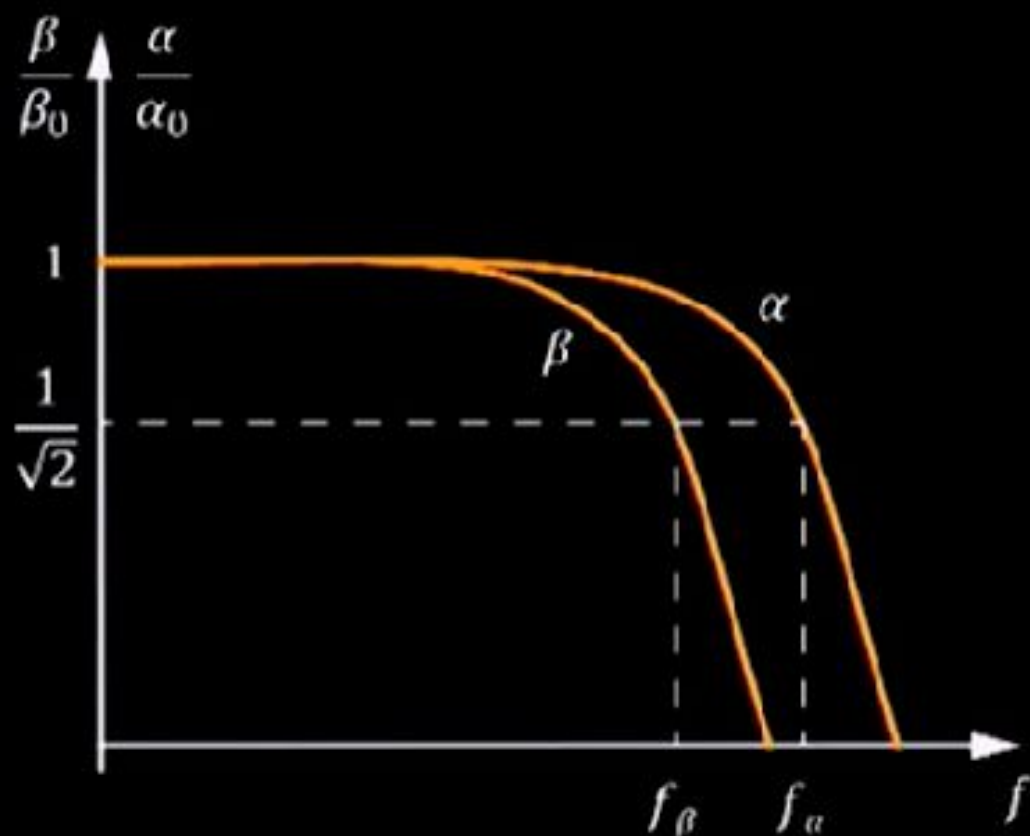
f_{β} - предельная частота коэффициента передачи тока базы.

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

Коэффициент β уменьшается с ростом частоты быстрее, чем α , поэтому схема с ОЭ обладает значительно худшими частотными свойствами, чем схема с ОБ.

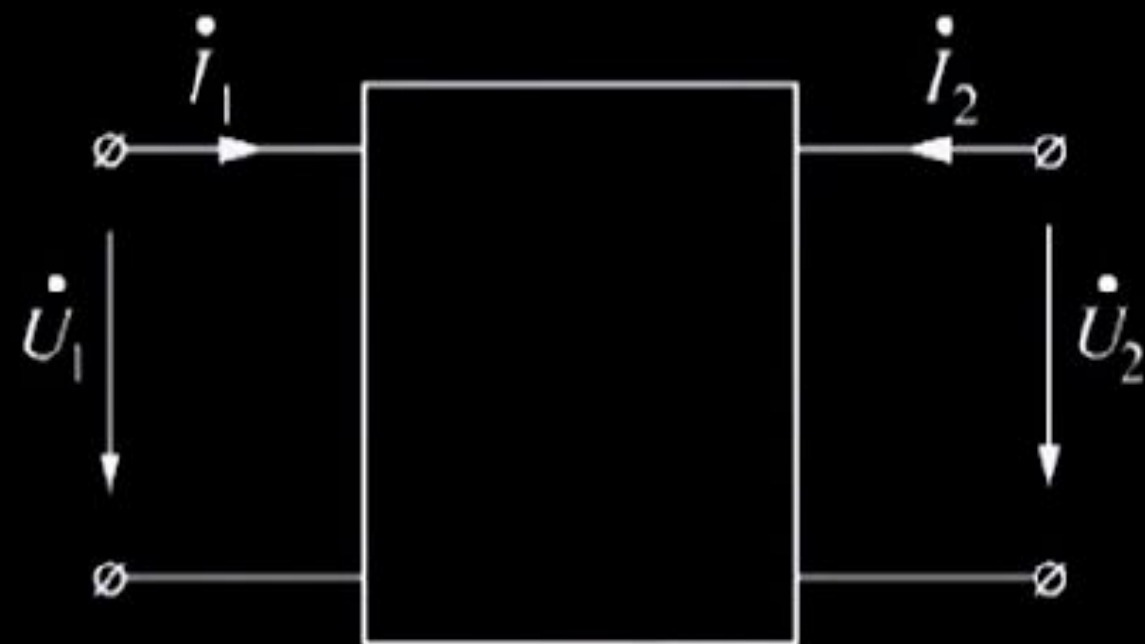
$f_{гр}$ - граничная частота коэффициента передачи тока. Это частота, на которой $\beta = 1$ (транзистор перестает усиливать ток).

$$f_{гр} = 0,8f_{\alpha}$$



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

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



I_1, U_1 - входные параметры (ток и напряжение)
 U_2, 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

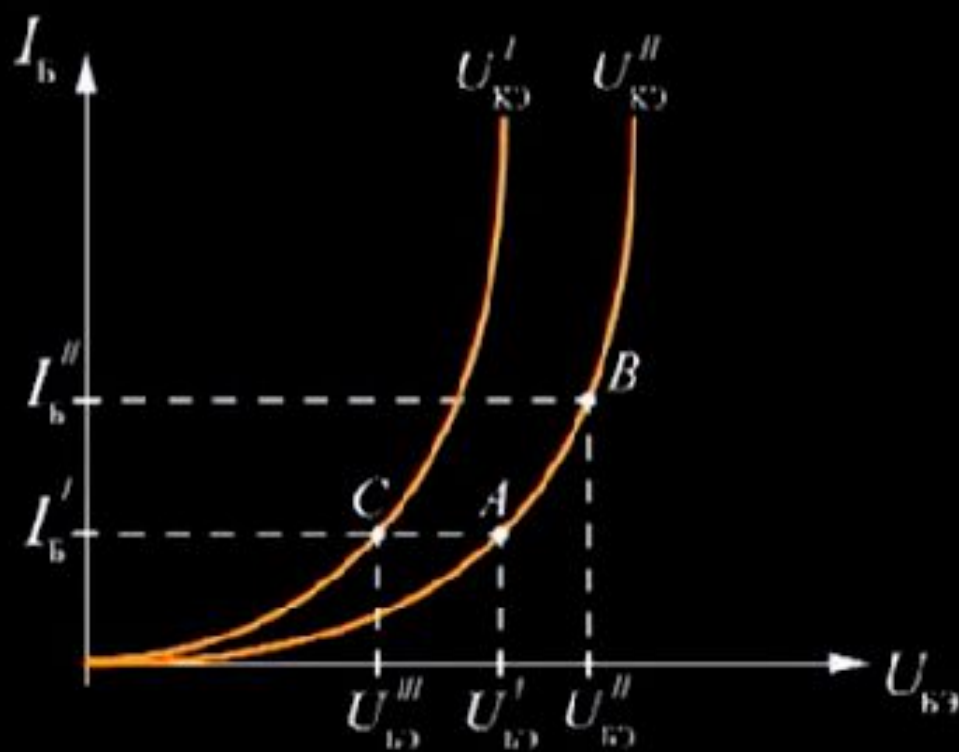
Параметры рассчитываются вблизи рабочей точки транзистора по приращениям токов и напряжений

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

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

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

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



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

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

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

