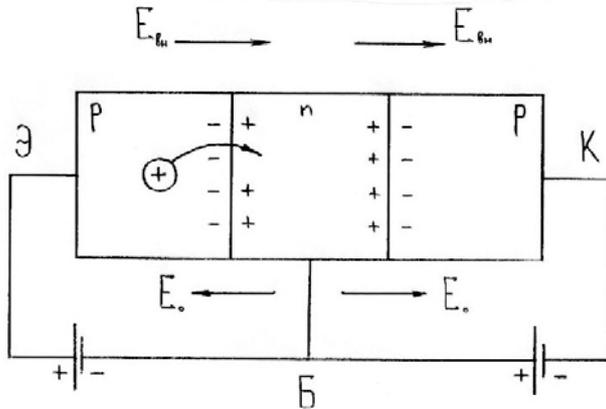
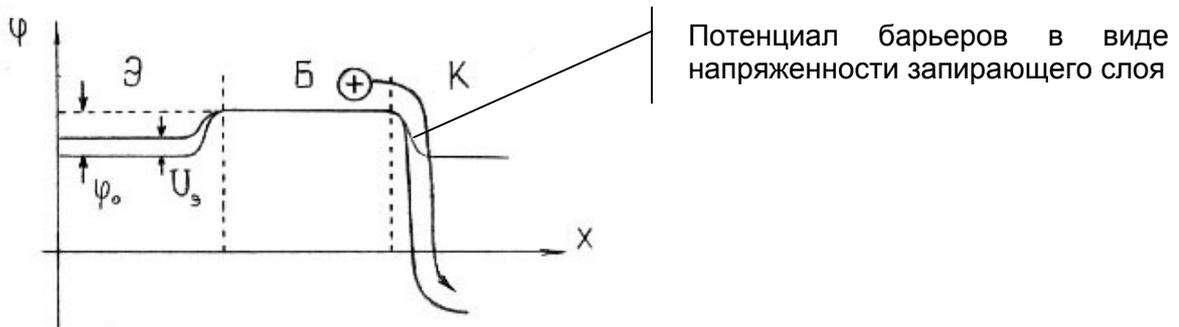


Биполярный транзистор.

Транзисторы бывают **биполярные** (приборы, управляемые током) и **полевые** (приборы, управляемые напряжением).



В основу биполярного транзистора положены два р-п перехода.



Базо-эмиттерный переход сместим в прямом направлении.

$U_{бэ} < 0 \Leftrightarrow U_{эб} > 0 \Rightarrow$ базо-эмиттерный барьер уменьшается

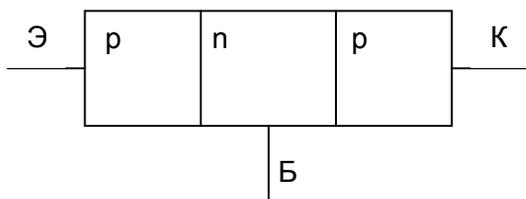
Базо-коллекторный переход смещаем в обратном направлении.

$U_{бк} > 0$

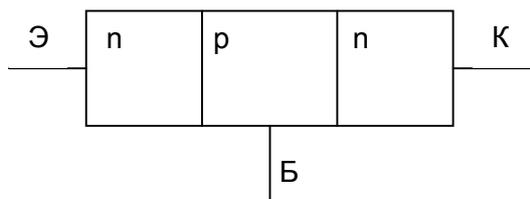
$E_{вн}$ заставит «дырки» из эмиттера перейти в базу. Часть из них рекомбинирует в базе, а часть пролетит в коллектор. Свободные электроны из коллектора соединятся с этими «дырками» и возникнет коллекторный ток. «Дырки», которые рекомбинировали в базе представляют собой базовый ток.

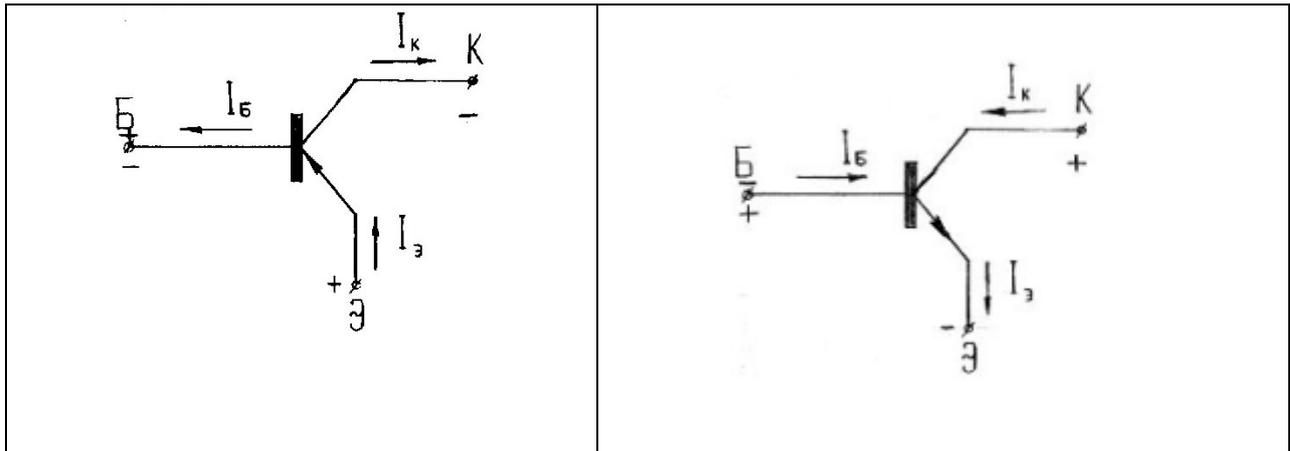
Условное обозначение транзисторов.

р-п-р



п-р-п





$U_{эб} > 0$
 $U_{бк} > 0$ ($\varphi_б > \varphi_к$)

$U_{бэ} > 0$
 $U_{кб} > 0$ ($\varphi_к > \varphi_б$)

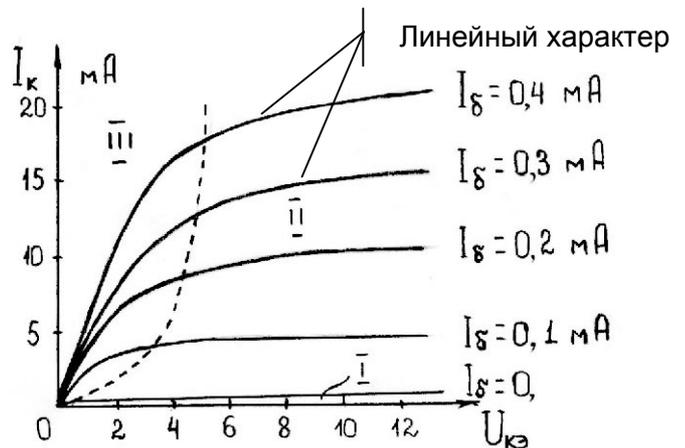
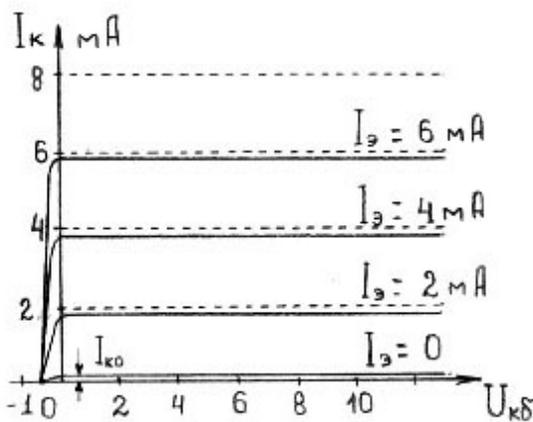
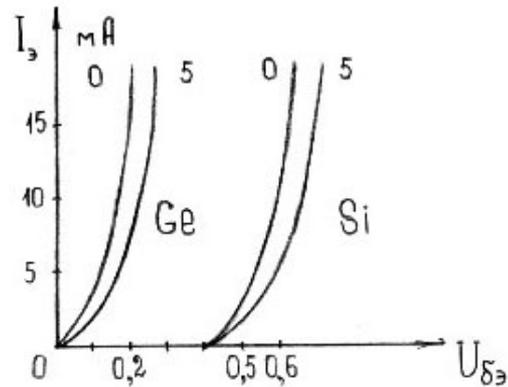
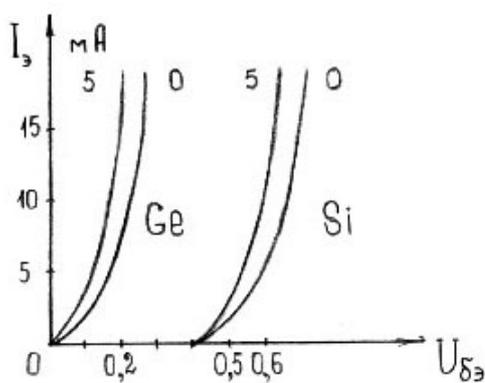
$I_б$ – ток рекомбинации неосновных носителей.

Схема включения транзисторов.

Общая база	Общий эмиттер	Общий коллектор
<p>$I_{вх} = I_э, I_{вых} = I_к$ $I_э = I_к + I_б$ $I_б$ – ток рекомбинации; α - коэффициент передачи по току для схемы с общей базой</p> $\alpha = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_к}{I_э} = \frac{I_к}{I_к + I_б} < 1$ <p>$\alpha = 0.98 \div 0.99$ $I_{вых} = I_к = \alpha I_э + I_{к0}$</p> <p>$I_{к0}$ – тепловой ток, протекающий через базу-коллекторный переход при разомкнутой цепи эмиттера и коллектора.</p> <p>$I_{вых} < I_{вх}$</p>	<p>$I_{вх} = I_б, I_{вых} = I_к$ $I_э = I_к + I_б$</p> $I_к = \alpha (I_к + I_б) + I_{к0}$ $\frac{I_к}{\alpha} - \frac{I_{к0}}{\alpha} = I_к + I_б$ $I_к(1 - \alpha) = \alpha I_б + I_{к0}$ $I_к = \frac{\alpha I_б + I_{к0}}{1 - \alpha}$ $\frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \Rightarrow \alpha = \beta - \alpha\beta$ $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$ $\frac{1}{1 - \alpha} = \frac{1}{1 - \frac{\beta}{\beta + 1}} = 1 + \beta$ $I_к = \beta I_б + (1 + \beta) I_{к0}$	<p>$I_{вх} = I_б, I_{вых} = I_э$ $I_э = I_к + I_б$</p> $I_э = I_б + \alpha I_э + I_{к0}$ $I_э = \frac{I_б + I_{к0}}{1 - \alpha} = (1 + \beta)(I_б + I_{к0})$ <p>учитывая, что $(1 + \beta) \gg 1$, получаем усиление по току.</p> <p>$K_i > 1$ $K_u < 1$ $K_p > 1$</p>

<p>$K_i < 1$ – коэффициент усиления по току.</p> <p>$K_u > 1$</p> <p>$K_p > 1$</p>	<p>$\beta \gg 1; \beta = 50 \div 200$</p> <p>током $I_{к0}$ пренебрегаем</p> <p>$I_k = \beta I_b$</p> <p>$\beta = \frac{I_k}{I_b}$ - получаем усиление по току.</p> <p>$K_i > 1$</p> <p>$K_u > 1$</p> <p>$K_p > 1$</p>	
--	--	--

Входные и выходные характеристики транзистора.



I область – область отсечки. Для нее характерно, что и база-эмиттерный, и база-коллекторный переходы смещены в обратном направлении ($U_3 > U_6, U_k > U_6$).

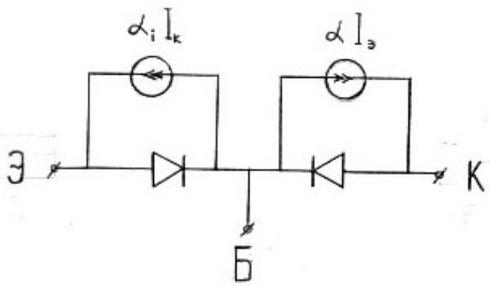
II область – область активного режима (режима усиления). Для нее характерно, что база-эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а база-коллекторный – в обратном ($U_3 < U_6, U_k < U_6$).

III область – область насыщения. Оба перехода смещены в прямом направлении ($U_3 < U_6, U_k < U_6$).

Во второй области транзистор работает как усилитель. В первой – как замкнутый ключ, в третьей – как разомкнутый.

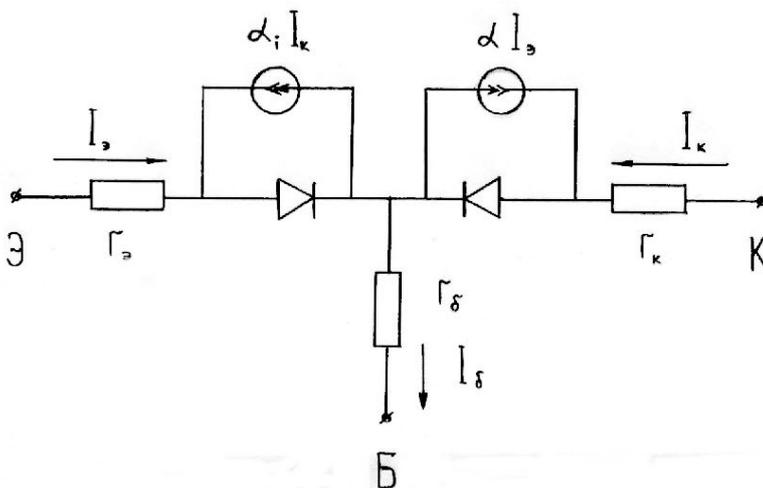
Схема замещения идеального транзистора.

Схема Эберса – Молла.



α – коэффициент передачи эмиттерного тока в коллектор (0.98 ÷ 0.99)
 α_i – инверсный коэффициент – коэффициент передачи коллекторного тока в эмиттер (0.005 ÷ 0.05)

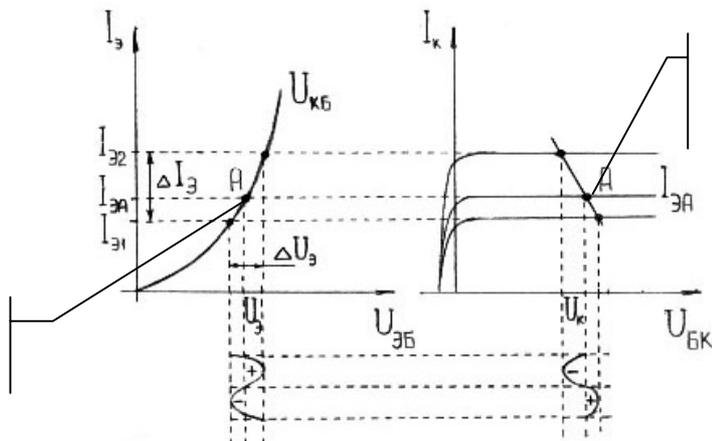
Таким образом, в идеализированной модели транзистор рассматривается, как система двух взаимодействующих рп-переходов, в которой каждый из переходов инжектирует и собирает неосновные носители. В реальном транзисторе всегда имеет место падение напряжения на области базы, эмиттера и коллектора. Это падение напряжения учитывается в сопротивлениях.



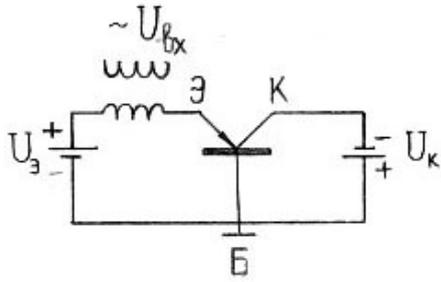
Дифференциальные малосигнальные параметры транзистора.

р-п-р, ОБ

Рабочая точка

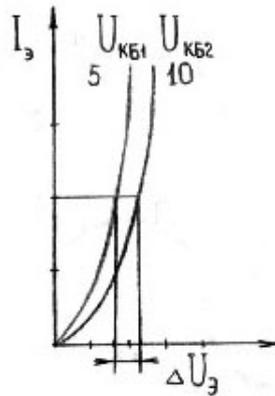
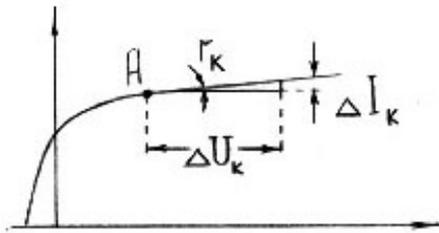


Выходное сопротивление



Способ линеаризации (при малых сигналах отрезок нелинейной характеристики около рабочей точки заменяем прямой) при разных рабочих точках разные углы наклона прямых, следовательно разные малые сигналы.

$$R_э = \frac{\Delta U_э}{\Delta I_э} \Big|_{U_к=const}; \alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \Big|_{U_к=const} = \frac{\Delta I_к}{I_э2 - I_э1}$$



$$R_к = \frac{\Delta U_к}{\Delta I_к} \Big|_{I_э=const}$$

$\mu_{эк}$ показывает какая часть выходного напряжения передается во входную цепь

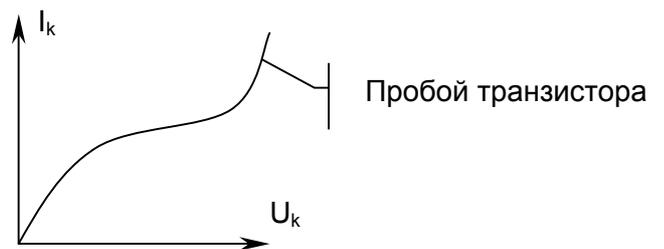
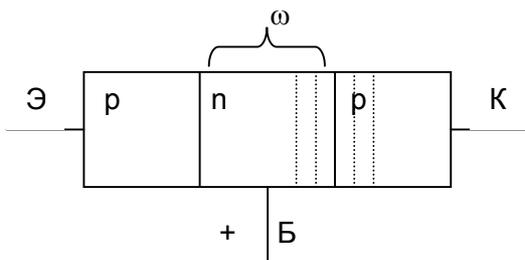
$$\mu_{эк} = \frac{\Delta U_э}{\Delta U_к} - \text{коэффициент передачи обратной связи по напряжению}$$

$$\mu_{эк} = 0.005$$

$\Delta U_э = \mu_{эк} \cdot \Delta U_к \ll 1 \Rightarrow$ характеристики при $U_{кб} > 5$ сливаются в одну

$$\beta = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{I_{б2} - I_{б1}} \Big|_{U_{кэ}=const}$$

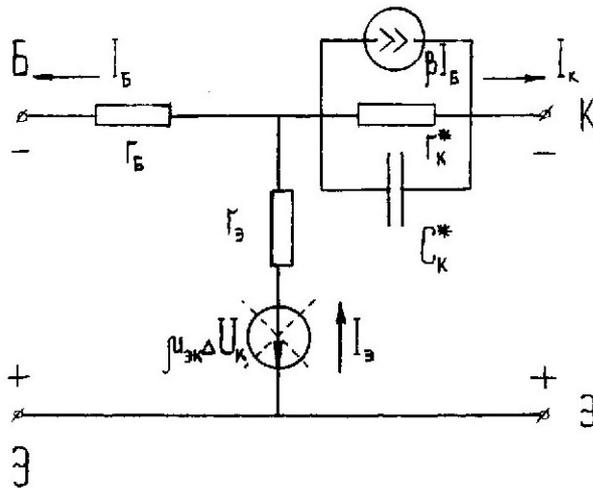
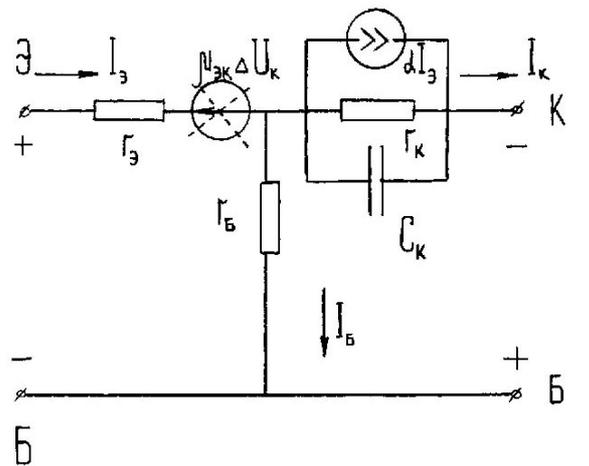
$$C_к = \frac{\Delta Q_к}{\Delta U_к} - \text{емкость коллекторного перехода}$$



Пробой транзистора

$\uparrow U_k \Rightarrow \uparrow D \Rightarrow$ ширина базы $\omega \downarrow \Rightarrow \uparrow$ коллекторного тока, что может привести к пробое коллектора.

Малосигнальная Т-образная схема замещения транзистора (для переменного сигнала).

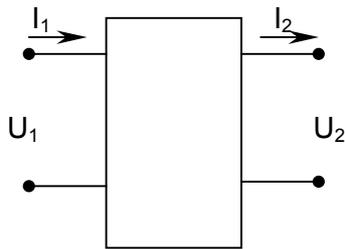


$C_k r_k = \text{const} = C_k^* r_k^*$ - постоянная времени коллекторной цепи $\Rightarrow C_k^* = (1 + \rho) C_k$

ОБ: $r_{вх} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_э r_э + \Delta I_б r_б}{\Delta I_э} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э} [r_э + r_б(1 - \alpha)]$
 $r_k \gg r_б \Rightarrow I_б$ пренебрегаем
 $r_{вх} = r_k$

ОЭ $r_{вх} = r_б + r_э(1 + \beta)$ (закарачиваем выход)
 $r_{вх} \cong$ (закарачиваем вход)

Малосигнальные Н – параметры



Для транзистора выбраны H-параметры, т.к. $U_{ВХ} \downarrow$ и $U_{ВЫХ} \uparrow$.

За независимые параметры принимаются $I_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2 \\ I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2 \end{cases}$$

1. $U_2 = 0 \Rightarrow h_{11} = \frac{U_1}{I_1}$ – входное сопротивление транзистора

$h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ – коэффициент передачи по току

2. $I_1 = 0 \Rightarrow h_{21} = \frac{U_1}{U_2}$ – коэффициент по напряжению (коэффициент обратной связи $\mu_{ЭК}$)

$h_{22} = \frac{I_2}{U_2}$ – выходная проводимость

H-параметры зависят от схемы включения.

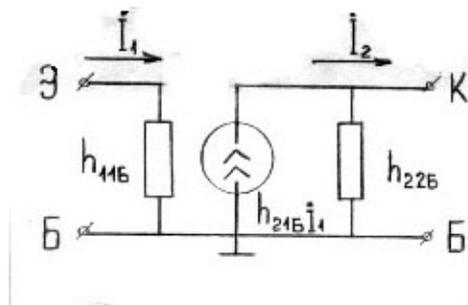
Связь H-параметров с физическими параметрами T-образной схемы замещения.

ОБ

$$h_{11\text{Б}} = r_3 + r_6 (1-\alpha)$$

$$h_{22\text{Б}} = \frac{1}{r_k}$$

$$h_{21\text{Б}} = \alpha$$

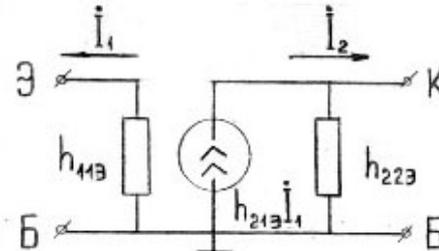


ОЭ

$$h_{11\text{Э}} = r_6 + r_3 (1-\beta)$$

$$h_{22\text{Э}} = \frac{1}{r_k^*}$$

$$h_{21\text{Э}} = \beta$$

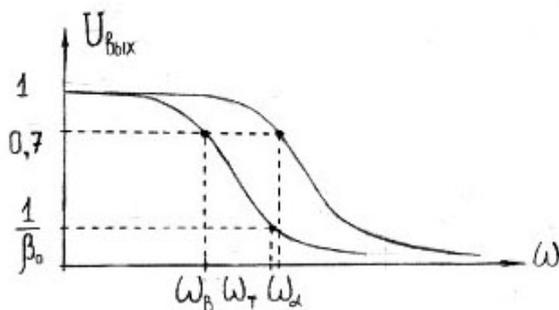


Частотные свойства транзисторов.

В общем случае α и β - комплексные величины, зависящие от частоты.

$$\dot{\alpha}(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\alpha}}; \quad \alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\alpha}\right)^2}};$$

$$\dot{\beta}(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\beta}}; \quad \beta(\omega) = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\beta}\right)^2}};$$



ω_β - граничная частота для схемы с общим эмиттером.

ω_β - частота, при которой коэффициент передачи \downarrow в $\sqrt{2}$ раз.

ω_α - //

$$\omega_\alpha = 2\pi f_\alpha$$

$$\omega_\beta = 2\pi f_\beta$$

$$\omega_\alpha = (1 + \beta)\omega_\beta$$

ω_τ - предельная частота, частота, при которой $\beta=1$

$$\omega_\tau \cong \omega_\alpha$$

τ_α - постоянная времени

$$\tau_\alpha = \frac{1}{\omega_\alpha} \text{ (ОБ)}$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{\omega_\beta} \text{ (ОЭ)}$$

$$\tau_p = (1 + \beta)\tau_\alpha \text{ - схема с ОБ более высокочастотна.}$$

Предельные эксплуатационные параметры транзистора.

1. T_n - предельная температура перехода

$$\begin{aligned} \text{Для Si: } T_n &= 90^\circ \text{ C} & T_{\min} &= -60^\circ \text{ C} \\ \text{Si: } T_n &= 150^\circ \text{ C} & T_{\min} &= -85^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

2. $R_\tau = \frac{T_0 - T}{P_{\text{допуст}}}$ - тепловое сопротивление перехода, который показывает на сколько изменилась T_n перехода при изменении температуры окружающей среды.

Электрические параметры:

1. $U_{к\text{ доп}}; U_k < U_{к\text{ доп}}$

2. $I_{k \text{ доп}}; I_k < I_{k \text{ доп}}$

3. $P_{k \text{ доп}}; I_k U_k = P_k, P_k < P_{k \text{ доп}}$

— мощность рассеивания