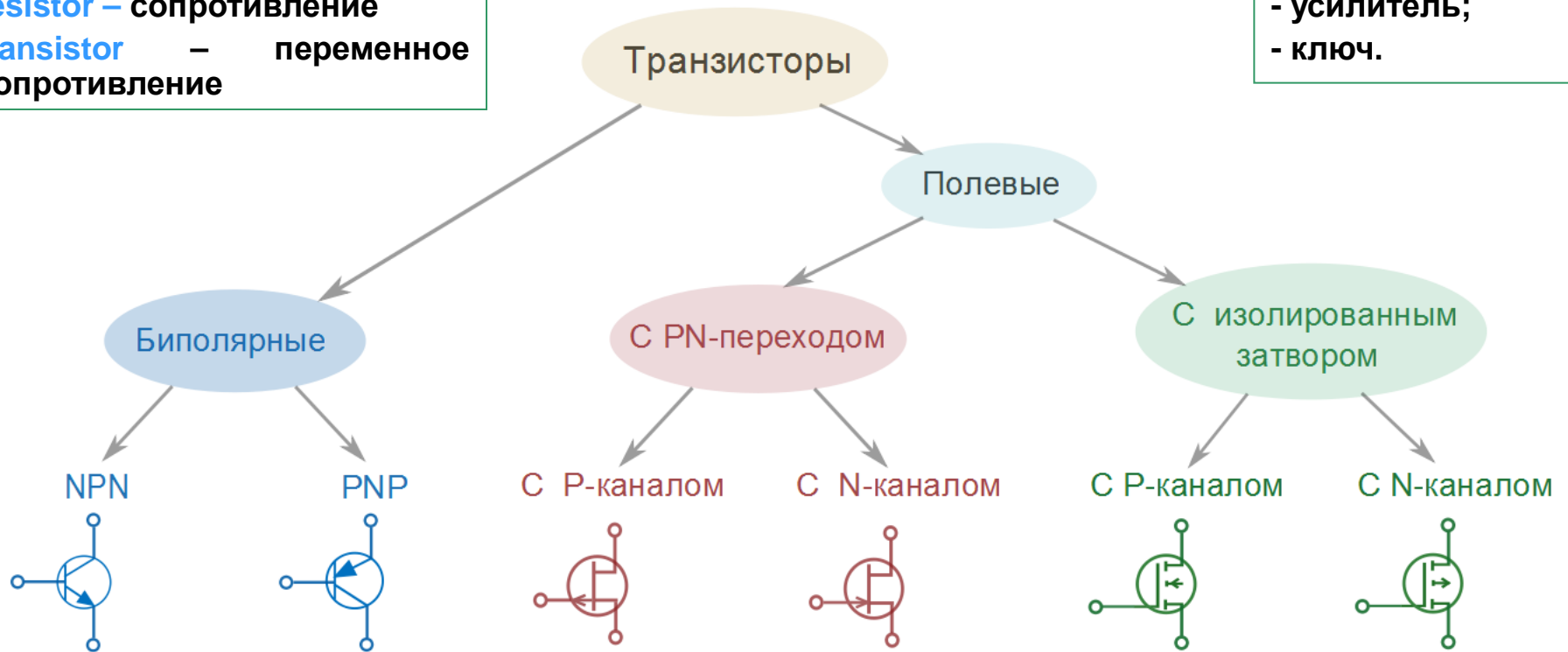


Транзисторы

Транзисторы – полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Позволяют регулировать ток в электрической цепи.

transfer – переносить
resistor – сопротивление
transistor – переменное сопротивление

2 функции:
- усилитель;
- ключ.

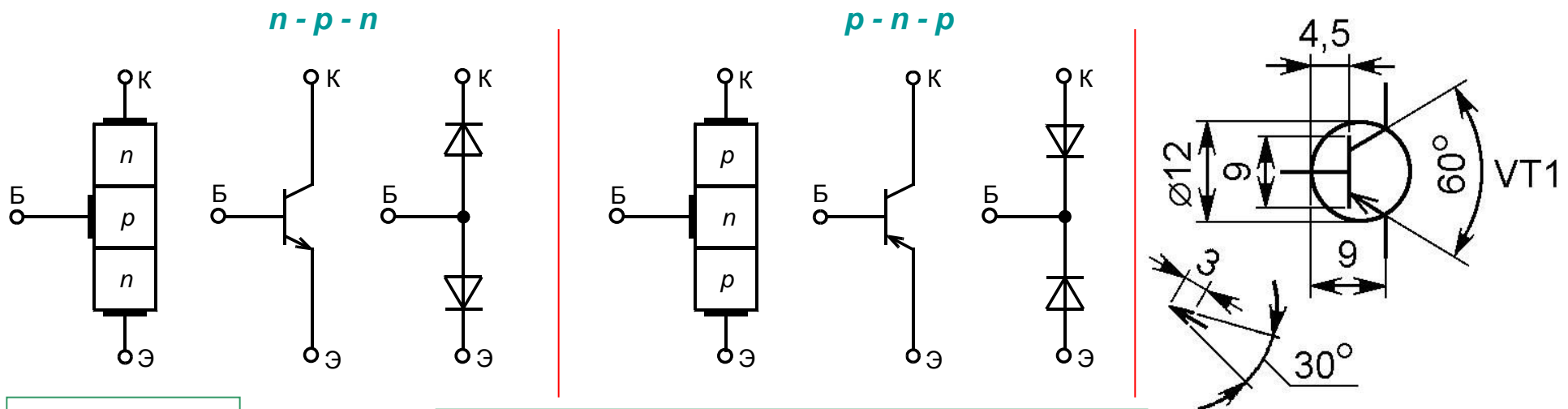


Классификация основных типов транзисторов и обозначение на схеме

Биполярные транзисторы (ВТ)

Биполярные транзисторы – полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими $p-n$ -переходами и тремя выводами.

Термин «биполярный» - используются носители обоих знаков: электроны и дырки.



Б – база
К – коллектор
Э - эмиттер

ЭП – эмиттерный переход (между Б и Э)
КП – коллекторный переход (между К и Б)

*УГО транзистора.
Стрелка показывает направление тока эмиттера при прямом смещении эмиттерного перехода.*

На пластинке полупроводника создаются три области различной электропроводности. В зависимости от порядка расположения областей различают $n-p-n$ и $p-n-p$ -транзисторы.

Расстояние между переходами (толщина базового слоя - базы) весьма мало – единицы мкм. Концентрация примесей в коллекторе и эмиттере значительно больше, чем в базе.

Режимы работы биполярного транзистора

1. **активный** (усилительный) используется в усилителях и генераторах:
КП смещен в обратном направлении;
ЭП смещен в прямом направлении;
2. **режим отсечки** (транзистор заперт) используется в ключевых схемах (ключ разомкнут);
КП, ЭП смещены в обратном направлении;
3. **режим насыщения** (транзистор открыт) используется в ключевых схемах (ключ замкнут);
КП, ЭП смещены в прямом направлении;
4. **инверсный режим** (К и Э меняют местами) используется редко, т.к. все параметры падают:
КП смещен в прямом направлении;
ЭП смещен в обратном направлении.

В схемах с транзисторами, как правило, образуется две цепи:

входная цепь – служит для управления транзисторами

выходная цепь – служит для подключения нагрузки.

Принцип действия биполярного транзистора

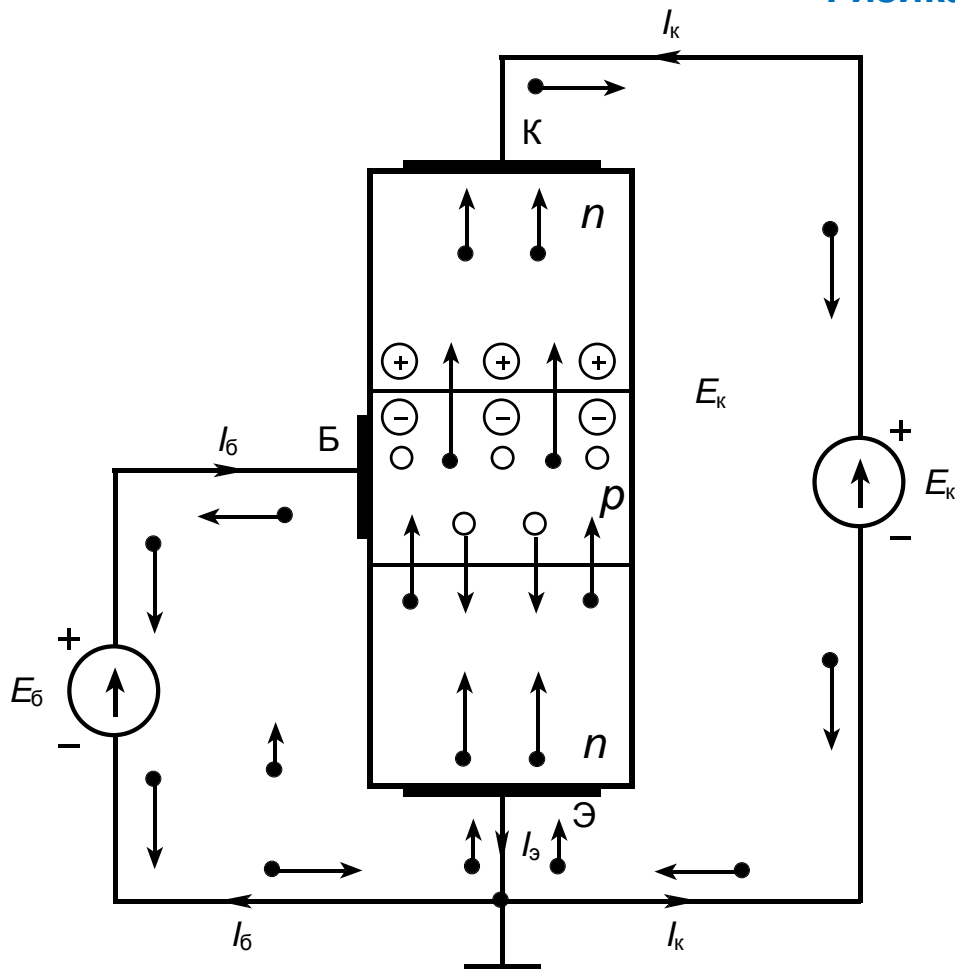
Рассмотрим физические процессы в транзисторе на примере *n-p-n*-транзистора, работающего в активном режиме без нагрузки (статический режим).

Напряжения на переходах задаются внешними источниками постоянного напряжения E_b и E_k . Их полярность и величина напряжения обеспечивают смещение ЭП в прямом направлении, а КП – в обратном, т.е. активный режим работы:

$$E_b \text{ (десяты́е доли В)} < E_k \text{ (единицы } \div \text{ сотни В)}.$$

Потенциал базы меньше потенциала коллектора, \Rightarrow КП смещен в обратном направлении, при этом сопротивление ЭП малó, а сопротивление КП великó.

Физика процессов



Ток базы $I_б$ стараются сделать как можно меньше (считают его бесполезным). С этой целью базу делают очень тонкой и уменьшают концентрацию примесей (дырок). В этом случае меньшее число электронов будет рекомбинировать в базе с дырками и следовательно $I_б$ будет меньше.

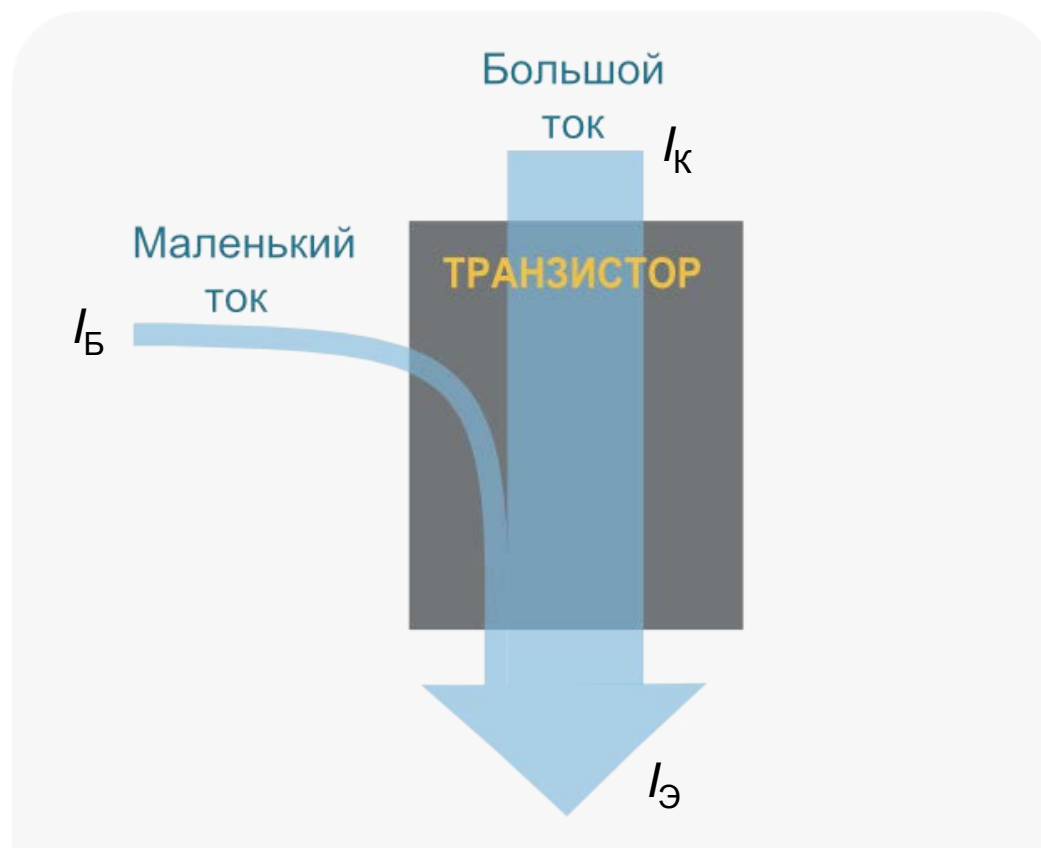
Так как ЭП смещен в прямом направлении, то потенциальный барьер (как в обычном p - n -переходе) в этом переходе понижен, поэтому электроны легко, его преодолевая, инжектируются из эмиттера в базу.

Небольшая часть электронов ($\approx 5\%$) в базе рекомбинируют с дырками и в результате возникает сравнительно небольшой базовый ток $I_б$ (дырок в базе мало, т.к. толщина база мала), а большая оставшаяся часть электронов ($\approx 95\%$) достигает коллекторного перехода. Поскольку КП смещен в обратном направлении, то на этом переходе образуются объемные заряды (подобно обычному p - n -переходу при обратном напряжении). Между зарядами возникает электрическое поле, которое способствует продвижению (экстракции) через КП электронов из эмиттера. Эти электроны и создают коллекторный ток.

Ток коллектора $I_к$ получается меньше тока эмиттера $I_э$ на величину тока базы $I_б$. В соответствии с 1 законом Кирхгофа между токами всегда справедливо соотношение:

$$I_э = I_к + I_б,$$

т.к. $I_б \ll I_э$, то $I_э \approx I_к$.



Демонстрация протекания токов биполярного транзистора (n-p-n)

Физические процессы в $p-n-p$ транзисторе подобны процессам, рассмотренным для $n-p-n$ транзистора. Для перехода от одного типа транзистора к другому необходимо:

1. поменять носители: дырки и электроны;
2. изменить полярности напряжений на противоположные;
3. изменить направление токов в транзисторе.

При изменении напряжений на КП и ЭП происходит изменение толщины этих переходов, а => меняется толщина базы. Это явление (эффект) называется **модуляцией толщины базы**.

Соотношения между токами транзистора

Ранее было показано, что $I_k < I_э$ из-за тока базы. Поэтому можно записать:

$$I_k = \alpha \cdot I_э$$

Чем меньше $I_б$, тем ближе $\alpha \rightarrow 1$.

где α – коэффициент передачи тока эмиттера.

$$\alpha_{\text{тип}} = 0,950 \div 0,998$$

Выразим I_k . $I_k = \alpha \cdot I_э = \alpha \cdot I_k + \alpha \cdot I_б \Rightarrow I_k(1 - \alpha) = \alpha \cdot I_б \Rightarrow$

$$I_k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_б = \beta \cdot I_б$$

$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ - коэффициент передачи тока базы (десятки ÷ сотни).

$$I_k = \beta \cdot I_б$$

Видно, что между током базы и током коллектора существует линейная связь, поэтому говорят, что транзистор управляется током $I_б$.

Зная β , можно рассчитать α по формуле:

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

Коэффициенты α , β зависят от режима работы транзистора. Максимум их достигается при средних токах, а при малых и больших данные коэффициенты снижаются.

Через обратно смещенный КП всегда протекает тепловой (обратный) ток. Различают два вида тока:

$I_{к0}$ – обратный ток, протекающий из коллектора в базу (для $n-p-n$ транзистора), составляет единицы мкА. В справочниках может обозначаться как $I_{кБ0}$. Данный ток определяется при оторванном проводе эмиттера, т.е. $I_э = 0$.

$I_{к0}$ – **сквозной** или **начальный ток**, протекающий из коллектора в эмиттер (для $n-p-n$ транзистора) через все переходы, определяется при оторванной базе, т.е. $I_б = 0$, составляет десятки ÷ сотни мкА.

С учетом обратного тока коллекторный ток равен:

$$I_к = \alpha \cdot I_э + I_{к0}, \quad \text{т.к. } I_э \gg I_{к0}, \text{ то } I_к \cong \alpha \cdot I_э.$$

Выразим $I_к$ с учетом $I_{к0}$: $I_к = \alpha \cdot I_э + I_{к0} = \alpha \cdot (I_к + I_б) + I_{к0} \Rightarrow$

$$I_к(1 - \alpha) = \alpha \cdot I_б + I_{к0} \Rightarrow I_к = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_б + \frac{I_{к0}}{1 - \alpha} = \beta \cdot I_б + I_{к0(э)}$$

$$I_к = \beta \cdot I_б + I_{к0(э)}$$

При $I_б = 0$

$$I_к = I_{к0(э)} = \frac{I_{к0}}{1 - \alpha} = \frac{\alpha}{1 - \frac{\beta}{\beta + 1}} = \frac{I_{к0}(\beta + 1)}{\beta + 1 - \beta} = I_{к0}(\beta + 1) \cong I_{к0} \cdot \beta.$$

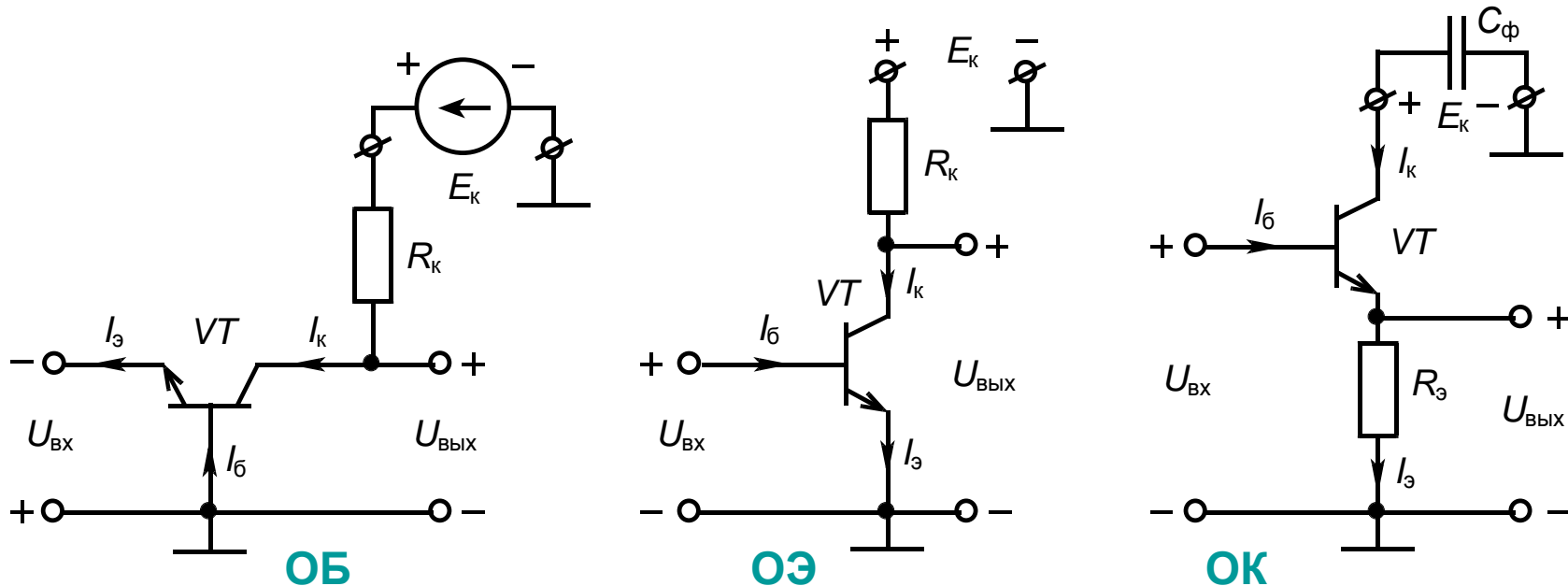
$$I_{к0(э)} \square I_{к0}$$

Схемы включения биполярного транзистора

На практике применяют три основных схемы включения транзисторов:

- с общим эмиттером (ОЭ);
- с общей базой (ОБ);
- с общим коллектором.

Правило! Тип схемы включения определяется по выводу (электроду) транзистора, который является общим для входной и выходной цепей по переменному току.



В схеме ОК коллектор соединен с общей точкой схемы, входом и выходом через источник E_k по переменной составляющей, для которой $C_ф$ является короткой.

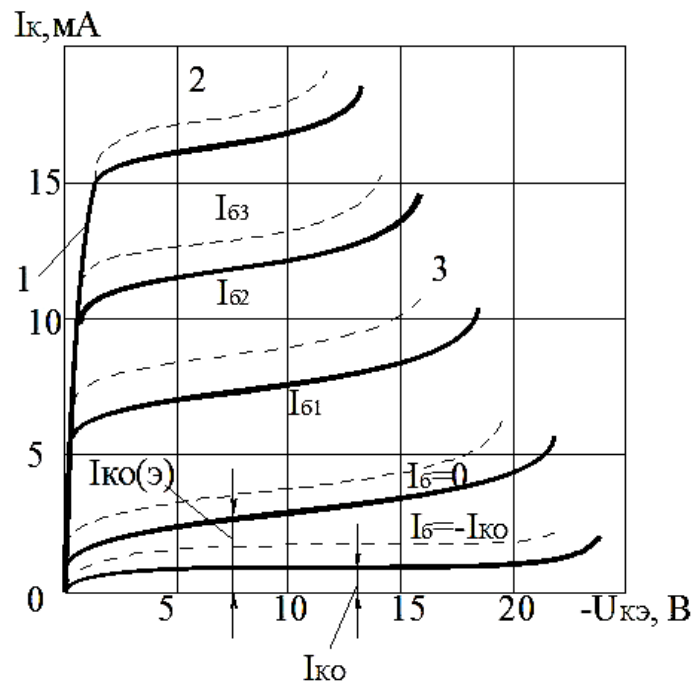
Отсюда, требование к источнику E_k : для переменного тока его внутреннее сопротивление должно быть равно нулю!

Статические вольт-амперные характеристики биполярного транзистора

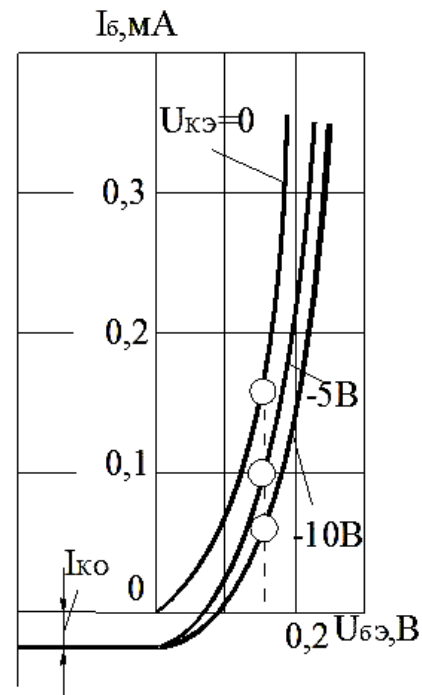
Статические характеристики снимаются на постоянном токе и без нагрузки в выходной цепи. Данные характеристики используются для расчета транзисторных схем. На практике интересны входные и выходные характеристики. Входные ВАХ отражают зависимость напряжения и тока во входной цепи, выходные ВАХ – в выходной цепи.

Для каждой из схем включения транзистора имеют место быть свои характеристики. Наиболее распространены ВАХ для схем ОЭ и ОБ, которые и приводятся в справочниках.

Входные и выходные ВАХ подобны ВАХ полупроводникового диода. Входные х-ки относятся к прямо смещенному ЭП, поэтому они подобны прямой ветви ВАХ диода. Выходные х-ки отражают свойства обратно смещенного коллекторного перехода и аналогичны обратной ветви ВАХ диода.



а)

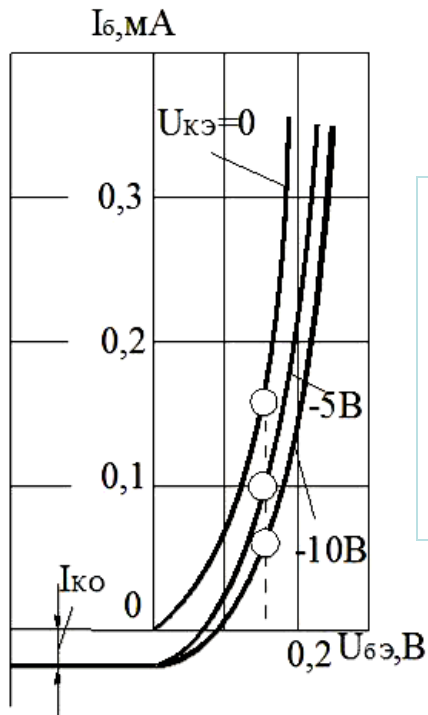


б)

ВАХ биполярного транзистора (р-п-р) в схеме ОЭ:
а) выходные; б) входные.

Схема ОЭ

Входные характеристики $I_{\bar{6}} = f(U_{\bar{6}\bar{3}}) \Big|_{U_{\bar{к}\bar{3}} = \text{const}}$

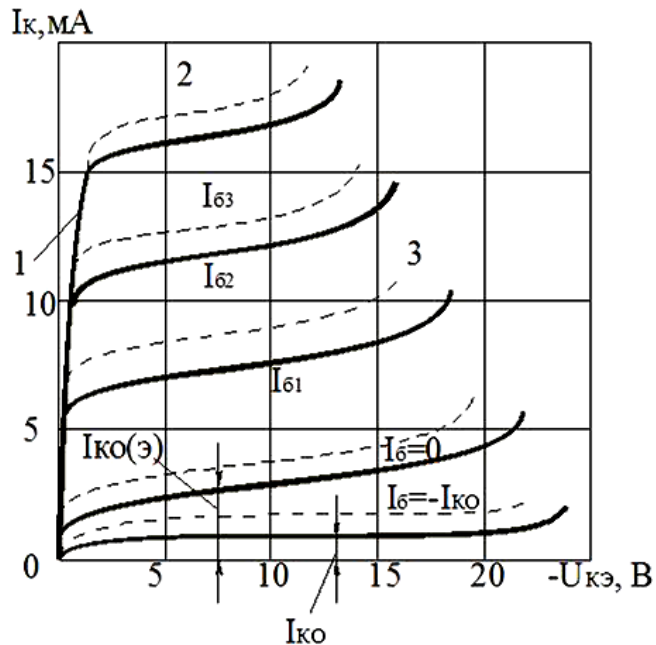


При $U_{\bar{к}\bar{3}} = 0$ входная х-ка представляет собой прямую ветвь ВАХ двух параллельно включенных диодов.

При $U_{\bar{к}\bar{3}} < 0$ характеристики сдвинуты вправо и вниз относительно предыдущего случая. Смещение вниз вызвано протеканием встречно основному базовому току обратного тока $I_{\bar{к}\bar{0}}$, и при $U_{\bar{6}\bar{3}} = 0$ значение $I_{\bar{6}} < 0$. Смещение х-к вправо обусловлено эффектом модуляции базы: с ростом $U_{\bar{к}\bar{3}}$ растет $U_{\bar{к}\bar{6}} \Rightarrow$ толщина обратно смещенного КП увеличивается, а толщина базы уменьшается \Rightarrow в базе рекомбинирует меньше носителей и \Rightarrow ток $I_{\bar{6}}$ уменьшается.

Входные х-ки при $U_{\bar{к}\bar{3}} > 0$ расположены близко друг к другу, поэтому в справочниках, как правило, приводят одну х-ку при заданном $U_{\bar{к}\bar{3}}$ и иногда при $U_{\bar{к}\bar{3}} = 0$.

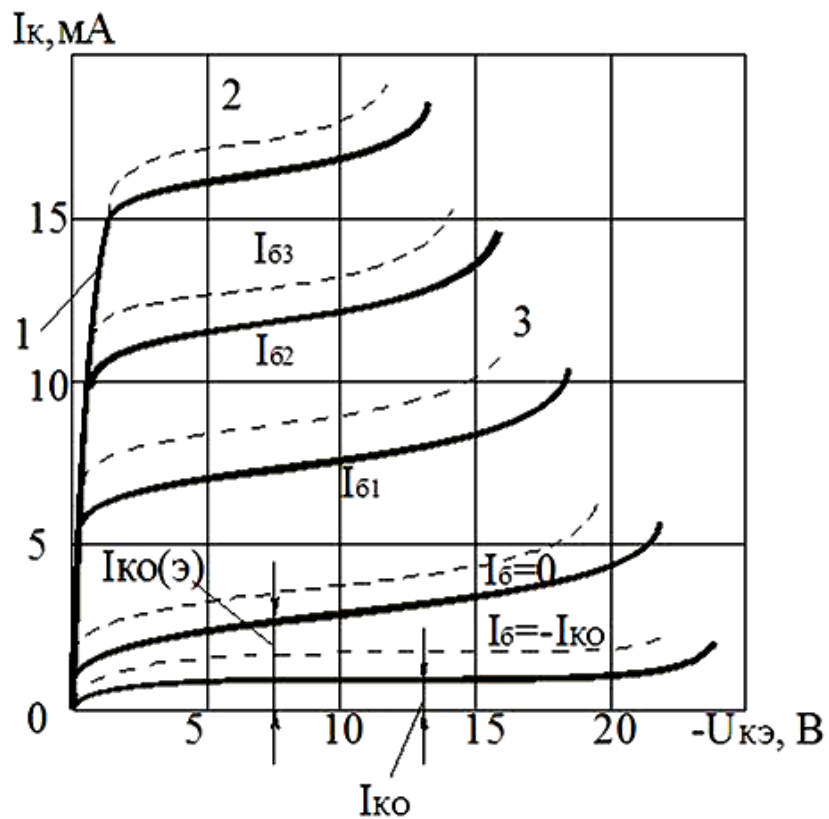
Выходные характеристики $I_{\bar{к}} = f(U_{\bar{к}\bar{3}}) \Big|_{I_{\bar{6}} = \text{const}}$



Первая снизу х-ка соответствует режиму глубокой отсечки, когда $U_{\bar{6}\bar{3}} < 0$. При этом ЭП и КП заперты ($I_{\bar{6}} = -I_{\bar{к}\bar{0}}$). Из К в Б течет тепловой ток $I_{\bar{к}\bar{0}}$. Характеристика при $I_{\bar{6}} = 0$ соответствует режиму с оторванной базой, т.е. $I_{\bar{к}} = \beta \cdot I_{\bar{6}} + I_{\bar{к}\bar{0}(\bar{э})} = I_{\bar{к}\bar{0}(\bar{э})} = (1 + \beta) \cdot I_{\bar{к}\bar{0}}$, при этом из К в Э течет сквозной ток $I_{\bar{к}\bar{0}(\bar{э})}$.

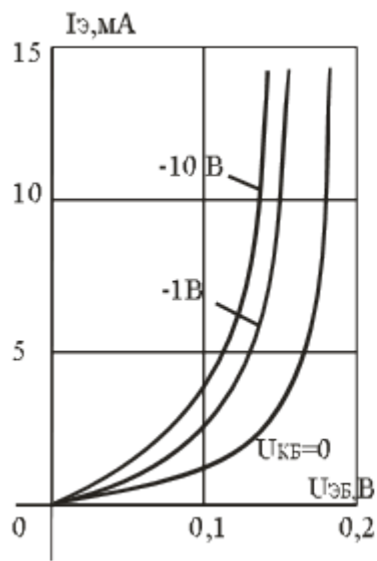
На выходных характеристиках можно выделить три области.

1. **Нелинейная область** с сильной зависимостью $I_{\bar{к}}$ от $U_{\bar{к}\bar{3}}$. При малых $U_{\bar{к}\bar{3}}$ и $U_{\bar{6}\bar{3}} > 0$ КП смещен в прямом направлении. (режим насыщения).
2. **Линейная область**. КП смещен в обратном направлении (активный режим). Здесь наблюдается слабая зависимость $I_{\bar{к}}$ от $U_{\bar{к}\bar{3}}$. Небольшой подъем характеристик объясняется эффектом модуляции базы.

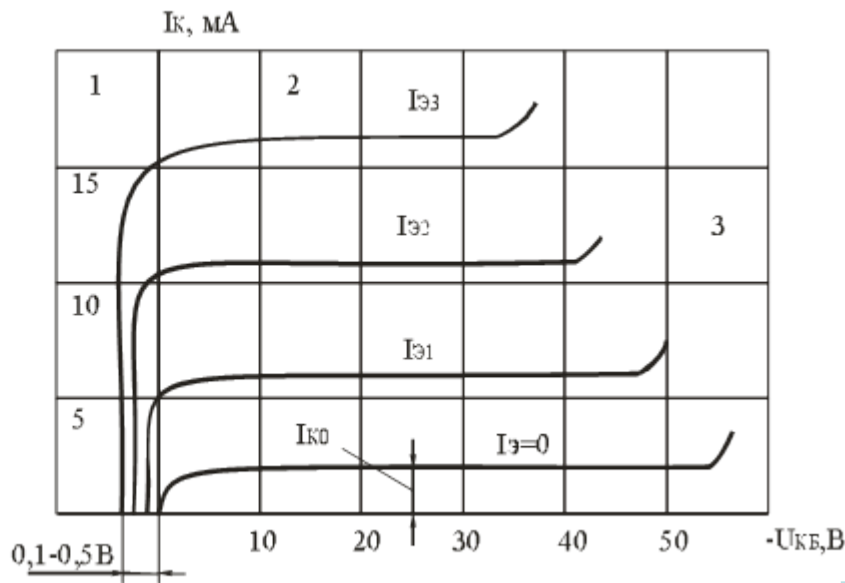


Эффект модуляции. При увеличении $U_{кэ}$ толщина базы уменьшается \Rightarrow ток I_b уменьшается (аналогично случаю для входной х-ки), но т.к. ток базы необходимо поддерживать постоянным ($I_b = \text{const}$) приходится увеличивать $U_{бэ}$. За счет этого ток I_b увеличивается, и ток $I_k = I_b \cdot \beta$ тоже возрастает.

3. **Область пробоя КП.** Как правило, это нерабочая область за исключением специальных типов транзисторов.



а)

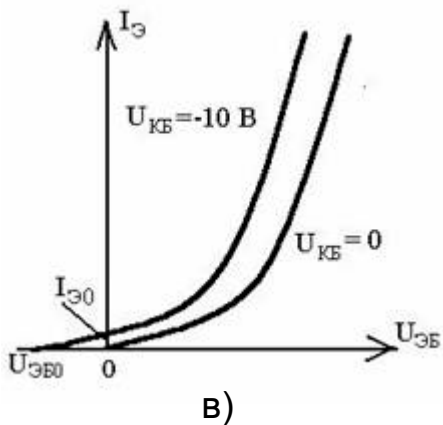


б)

Выходные характеристики (рис. б)

$$I_k = f(U_{кб}) \Big|_{I_э = \text{const}}$$

Выходные ВАХ имеют три области:
 1. **Нелинейная область** с сильной зависимостью I_k от $U_{кб}$ (режим насыщения). Находится левее оси ординат.



в)

Самая нижняя характеристика при $I_э = 0$ соответствует режиму с оторванным эмиттером. Это значит, что напряжение приложено только к КП и через него в базу течет обратный ток $I_{к0}$.

Схема ОБ

Входная характеристика (рис. а)

$$I_э = f(U_{эб}) \Big|_{U_{кб} = \text{const}}$$

X-ки, снятые при большем $U_{кб}$ сдвинуты влево и вверх относительно случая $U_{кб} = 0$. X-ки подняты вверх за счет протекания сквозного тока $I_{к0(э)}$ через ЭП, что явно видно при $U_{эб} = 0$ (рис. в).

Сдвиг характеристик влево обусловлен эффектом модуляции базы.

2. **Линейная область** со слабой зависимостью I_k от $U_{кб}$ (активный режим). Ее особенностью является небольшой подъем характеристик (меньший, чем у сх. ОЭ), обусловленный эффектом модуляции базы.

3. **Область пробоя**. При некотором $U_{кб}$ начинается электрический пробой КП и ток I_k резко возрастает.

Схемы для снятия ВАХ биполярного транзистора

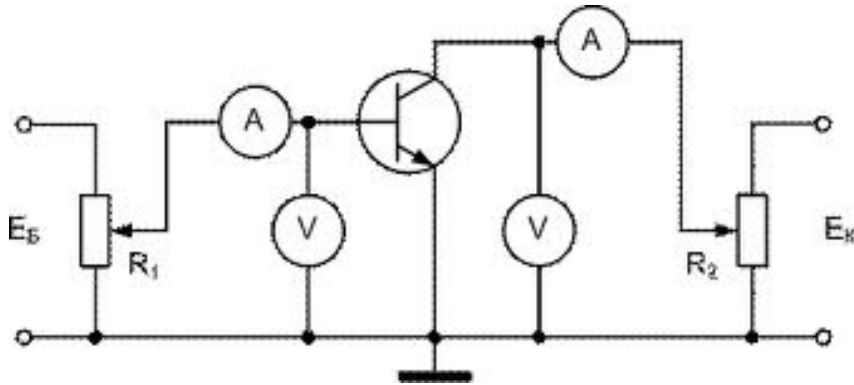


Схема ОЭ

R_1 , R_2 – переменные резисторы, предназначенные для регулировки напряжения.

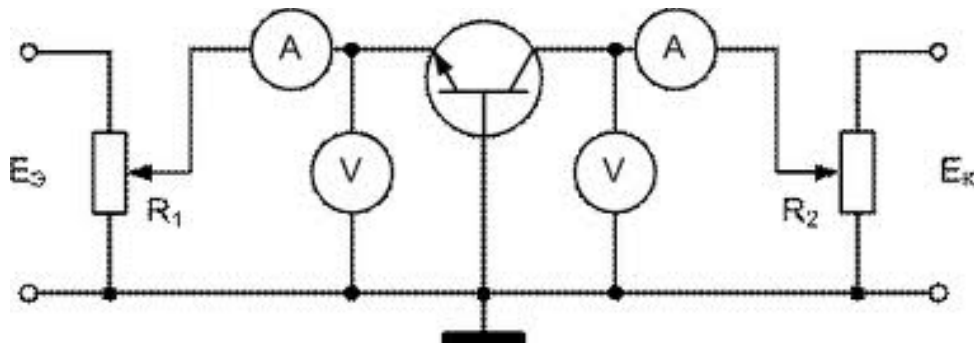
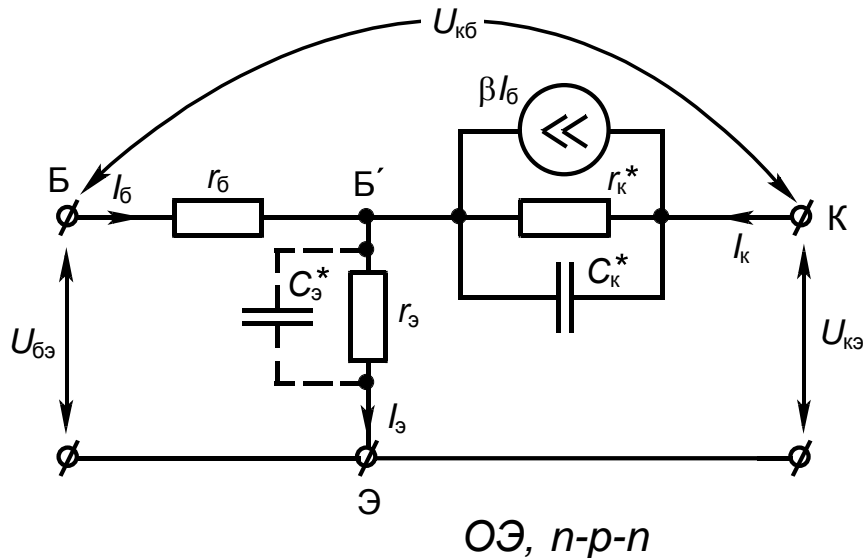
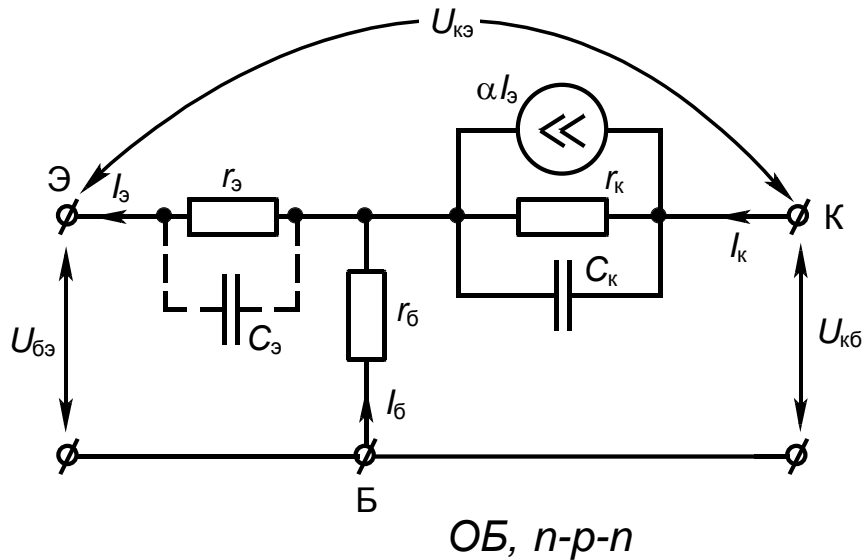


Схема ОБ

Схемы замещения биполярного транзистора в физических параметрах



Т – образные малосигнальные схемы замещения построены с помощью физических (внутренних) параметров транзистора, которые характеризуют физические свойства трехслойной полупроводниковой структуры транзистора. Состав этих схем одинаков.

Границы применимости схем замещения:

- 1) транзисторы работают в активном режиме;
- 2) справедливы для переменных составляющих токов и напряжений (название «схема замещения на переменном токе»);
- 3) справедливы для транзисторов, работающих на линейных участках входных и выходных статических характеристик.

Так как значения переменных составляющих токов и напряжений транзистора, как правило, значительно меньше постоянных составляющих, то данные схемы замещения называют **малосигнальными**, а их параметры – малосигнальными.

Все сопротивления, входящие в схемы являются дифференциальными, т.е. определяются для приращений (изменений) тока и напряжения.

Элементы схемы замещения

r_6 – объемное сопротивление базового слоя (базы), справочный параметр, иногда приводится в справочниках и составляет $100 \div 400$ Ом.

r_3 – дифференциальное сопротивление прямо смещенного эмиттерного перехода. Величина r_3 зависит от величины постоянной составляющей эмиттерного тока $I_{0э}$ (тока покоя эмиттера) и определяется:

$$r_3 = \frac{\varphi_T}{I_{0э}}; \quad \varphi_T = \frac{k \cdot T}{e},$$

где φ_T – температурный потенциал.

Пример: если $I_{0э} = 1$ мА, то $r_3 \approx 26$ Ом при $t = 27^\circ\text{C}$.

Ориентировочные значения: $r_3 = \text{единицы} \div \text{десятки Ом}$.

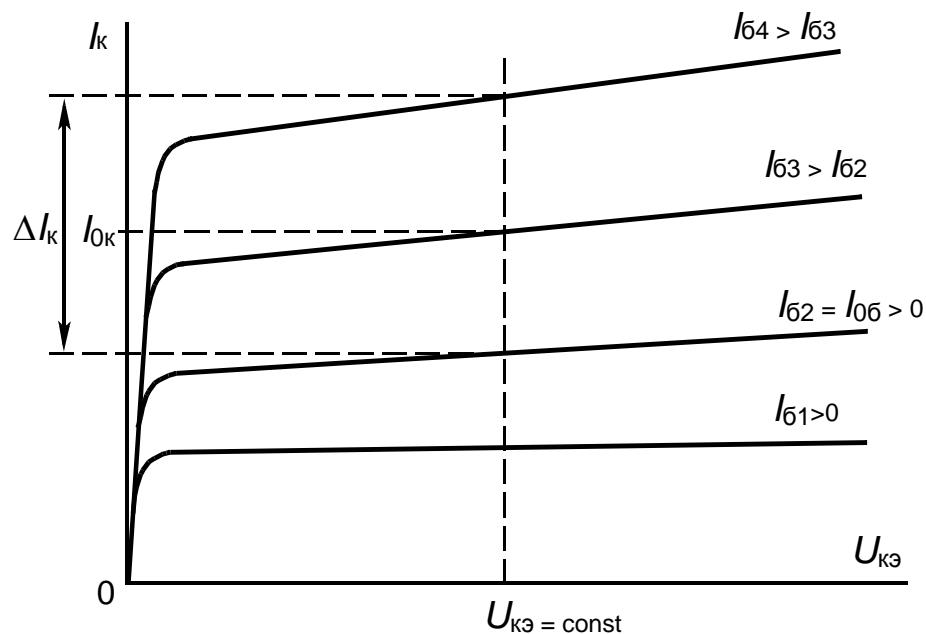
$\beta \cdot I_6$ – эквивалентный источник тока, учитывающий зависимость коллекторного тока от базового.

β – динамический коэффициент передачи тока базы; определяется по выходным характеристикам для сх. ОЭ:

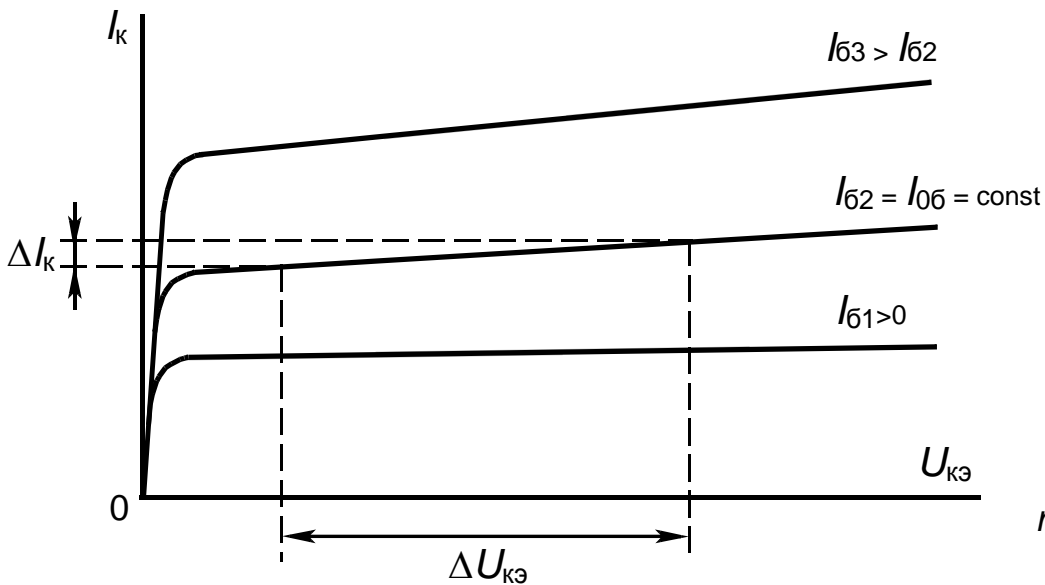
$$\beta = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ} = \text{const}}$$

$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_э} \right|_{U_{кэ} = \text{const}}$$

- динамический коэффициент передачи тока эмиттера; может быть определен по выходным х-кам сх. ОБ.



Пример определения приращений тока для расчета β



Пример определения приращений тока и напряжения для расчета r_k^*

$r_k^* = r_{k(э)}$ – дифференциальное сопротивление обратно смещенного КП (справочный параметр):

$$r_k^* = r_{k(э)} = \left. \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_k} \right|_{I_б = \text{const}}$$

$r_k^* = \text{десятки} \div \text{сотни кОм}$.

$r_k = r_{k(б)} = r_{k(э)}(1 + \beta)$ – сх. ОБ (сотни кОм \div единицы МОм).

$C_k^* = C_{k(э)}$ – емкость обратно смещенного КП – справочный параметр: $C_{k(э)} = \text{единицы} \div \text{сотни пФ}$. Зависит от частотных свойств транзистора.

Чем меньше $C_{k(э)}$, тем лучше частотные свойства!

$C_k = C_{k(б)} = \frac{C_{k(э)}}{1 + \beta} \approx \frac{C_{k(э)}}{\beta}$ – емкость обратно смещенного КП в сх. ОБ

$\tau_{Ck} = C_k^* \cdot r_k^* = C_k \cdot r_k = \text{const}$

$C_э^* = C_{э(э)}$ – емкость эмиттерного перехода. Обычно в расчетах не учитывается, т.к. $\tau_{вх} < \tau_{вых}$.

$C_э^* = C_{э(э)}$ – единицы \div сотни пФ.

Полагают: $C_{э(э)} = C_{э(б)}$

При анализе малосигнальных схем замещения (напр., усилительных каскадов) рассматриваются только переменные составляющие токов и напряжений, следовательно все принятые обозначения $I_б, I_k, I_э, U_{бэ}, U_{кэ}, U_{бэ}$ и др. характеризуют действующие значения гармонического сигнала, т.е. $I_m = \sqrt{2} \cdot I_{\text{дейст}}$

h - параметры транзистора

Физические параметры, входящие в Т-образную схему замещения транзистора не могут быть измерены напрямую, т.к. слои и переходы транзистора недоступны для подключения измерительных приборов. Поэтому в качестве измеряемых параметров выбраны те, которые отражают свойства транзистора как четырехполюсника.

При любой схеме включения транзистор может быть представлен в виде активного (линейного) четырехполюсника – «черного ящика».



$$U_1 = U_{\text{ВХ}}; U_2 = U_{\text{ВЫХ}}; I_1 = I_{\text{ВХ}}; I_2 = I_{\text{ВЫХ}}.$$

На входе действует переменное напряжение U_1 и протекает переменный ток I_1 , а на выходе действует переменное напряжение U_2 и переменный ток I_2 .

Существуют различные системы параметров, которые связывают переменные токи и напряжения в четырехполюснике. Наиболее удобными для измерения считаются h - параметры.

« h » от слова «*hybrid*» - гибридное или смешанные. Включают в себя: 2 коэффициента, одно сопротивление, одну проводимость. Приводятся в справочниках.

Система уравнений, связывающая токи и напряжения через h - параметры:

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

h - параметры – соответствующие коэффициенты.

Физический смысл коэффициентов (h - параметров) в уравнениях

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току при неизменном выходном напряжении (по переменке на выходе К.З., т.е. переменки нет, т.е. $U_2 = \text{const}$);

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

- коэффициент передачи по току при неизменном выходном напряжении (по переменке на выходе К.З., т.е. переменки нет, т.е. $U_2 = \text{const}$);

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

- коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном входном токе, показывает какая часть переменного выходного напряжения передается на вход транзистора из-за наличия обратной связи в нем (по переменке входная цепь разрыв, т.е. $I_1 = \text{const}$);

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

- выходная проводимость транзистора при неизменном входном токе транзистора (по переменке входная цепь разрыв, т.е. $I_1 = \text{const}$), измеряется в сименсах.

Значения h – параметров зависят от схемы включения:

Схема ОЭ: $I_1 = I_{\text{б}}$; $I_2 = I_{\text{к}}$; $U_1 = U_{\text{бэ}}$; $U_2 = U_{\text{кэ}}$.

Схема ОБ: $I_1 = I_{\text{э}}$; $I_2 = I_{\text{к}}$; $U_1 = U_{\text{эб}}$; $U_2 = U_{\text{кб}}$.

h – параметры для схемы ОЭ

$$h_{11\text{Э}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{кэ}}=\text{const}} = r_{\text{вх}}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току; определяется по входной характеристике;

$$h_{21\text{Э}} = \left. \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{кэ}}=\text{const}} = \beta$$

- коэффициент передачи тока базы; определяется по выходным характеристикам;

$$h_{12\text{Э}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} \right|_{I_{\text{б}}=\text{const}} = \varepsilon$$

- коэффициент обратной связи по напряжению; определяется по входным характеристикам;

$$h_{22\text{Э}} = \left. \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} \right|_{I_{\text{б}}=\text{const}}$$

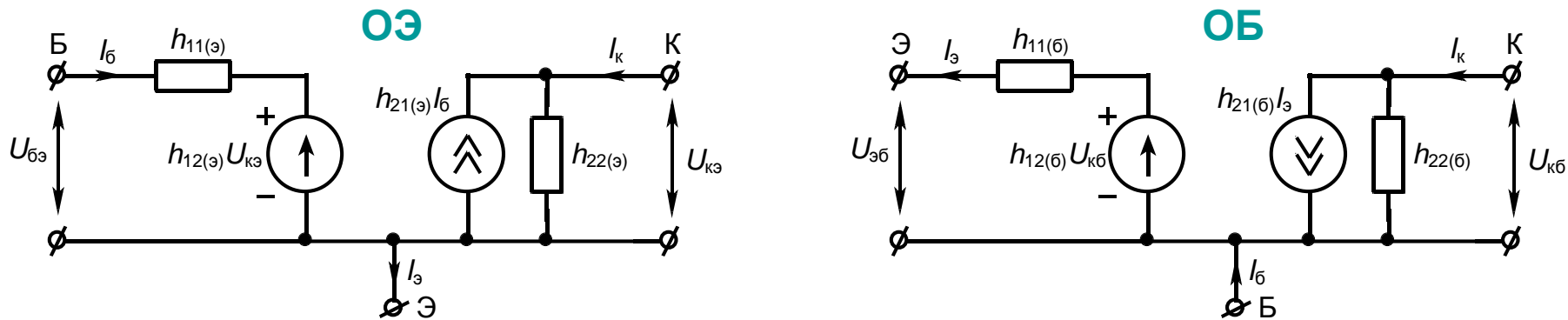
- выходная проводимость транзистора; определяется по выходной характеристике.

Если провести замену соответствующих параметров можно записать h – параметры для схемы ОБ. Однако, если известны h – параметры для схемы ОЭ, параметры для схемы ОБ получаются простым пересчетом.

Подробнее в книге:

Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.

Эквивалентные схемы транзистора на средних частотах через h – параметры



Показатели схем ОЭ, ОБ и ОК для маломощных транзисторов

Параметр	ОЭ	ОБ	ОК
h_{11}	сотни Ом ÷ единицы кОм	единицы ÷ десятки Ом	десятки ÷ сотни кОм
h_{12}	$10^{-3} ÷ 10^{-4}$ См	$10^{-3} ÷ 10^{-4}$ См	$10^{-3} ÷ 10^{-4}$ См
$ h_{21} $	десятки ÷ сотни	0,95 ÷ 0,998	сх. ОЭ
$1/h_{22}$	единицы ÷ десятки кОм	сотни кОм ÷ единицы МОм	десятки Ом

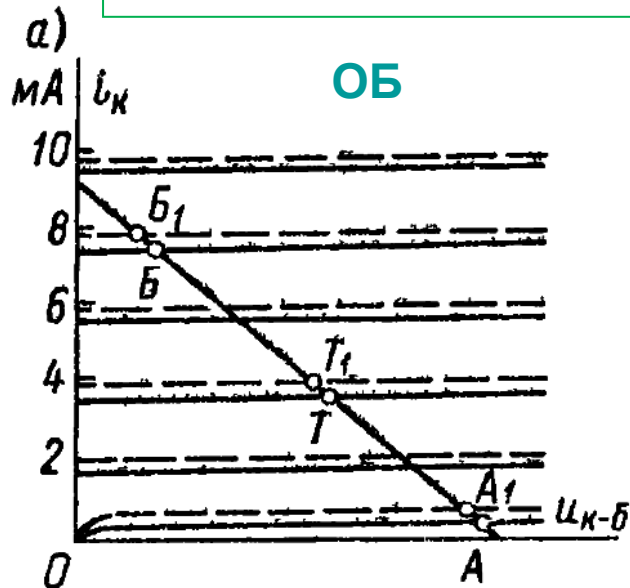
Кроме системы h – параметров пользуются также системой параметров в виде проводимостей (Y - параметры).

Влияние температуры

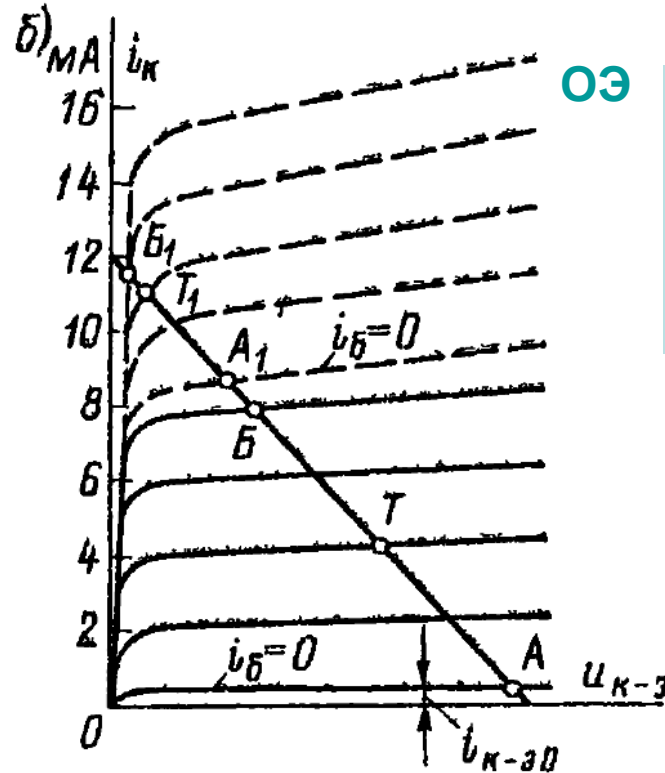
В процессе работы транзисторов в электронной аппаратуре они нагреваются. Причины нагрева транзисторов:

- температура окружающей среды;
- внешние источники тепла (например, находящиеся нагретые детали);
- токи, протекающие через транзистор.

Пунктиром показано изменение тока при увеличении температуры.



$$I_K = \alpha \cdot I_{\text{э}} + I_{\text{к0}},$$



$$\begin{aligned} I_K &= \beta \cdot I_B + I_{\text{к0(э)}} = \\ &= \beta \cdot I_B + (1 + \beta) I_{\text{к0}} \end{aligned}$$

При увеличении температуры изменение коллекторного тока в сх. ОЭ более существенно, чем в схеме ОБ. => Схема ОЭ менее температурно стабильна, чем сх. ОБ.

При изменении температуры изменяются все характеристики и параметры транзистора. На практике для минимизации влияния температуры применяют специальные схемные решения: дополнительные цепи термокомпенсации и термостабилизации.

Частотные свойства транзисторов

С увеличением частоты усиление, даваемое транзистором снижается. Существует две главных причины:

1. Влияние емкостей транзистора.
2. Снижение коэффициента передачи тока.

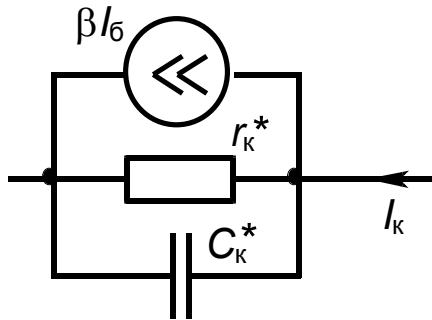
1. Влияние емкостей транзистора

С ростом частоты сопротивление емкостей транзистора уменьшается:

$$X_C \downarrow = \frac{1}{\omega \uparrow C}$$

Наиболее существенное влияние оказывает емкость коллекторного перехода C_k , т.к. имеет наибольшую величину.

Влияние всех емкостей одинаково: они шунтируют цепи транзистора, вызывая тем самым снижение усиления.



На высоких частотах емкость C_k шунтирует источник коллекторного тока. => часть тока источника тока замыкается через C_k , и лишь оставшаяся часть тока источника будет создавать коллекторный ток I_k . С ростом частоты ток через C_k возрастает, а ток I_k уменьшается.

Часть малосигнальной схемы замещения. Полная схема на слайде 14

2. Снижение коэффициента передачи тока

На высоких частотах коэффициент передачи тока базы β является комплексной величиной:

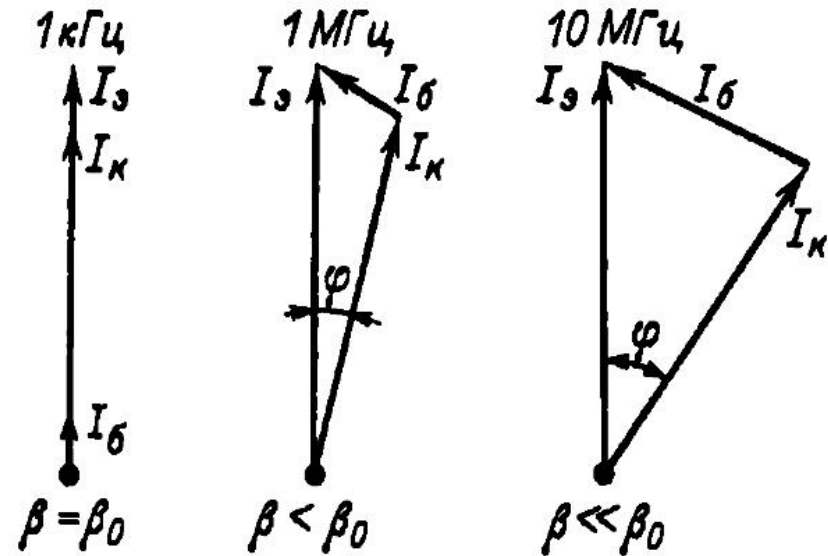
$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\beta}} = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}$$

f_β (ω_β) – предельная (аналог граничной частоты при определении полосы пропускания цепи) частота коэффициента передачи тока базы транзистора (сх. ОЭ) – справочный параметр;
 β_0 – статический коэффициент передачи тока базы (на постоянном токе).

Модуль и фаза коэффициента передачи:

$$\beta(\omega) = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\beta}\right)^2}} = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}},$$

$$\varphi_\beta = \text{arctg} \frac{\omega}{\omega_\beta}.$$



Векторные диаграммы, демонстрирующие возрастание тока базы и фазового сдвига между токами с увеличением частоты работы транзистора

Снижение β с ростом частоты с ростом частоты обусловлено инерционностью перемещения носителей из ЭП через базу в КП. Время пробега носителей через базу составляет $\approx 10^{-7}$ с. На частотах единицы ÷ десятки МГц это время соизмеримо (или больше) с периодом усиливаемого сигнала (т.е. носители не успевают перескочить через базу и задерживаются в ней). В результате коллекторный ток отстает от эмиттерного (появляется фазовый сдвиг) и I_k уменьшается, а ток базы I_b увеличивается.

Для коэффициента передачи тока эмиттера:

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\alpha}}$$

ω_α – предельная частота коэффициента передачи тока эмиттера транзистора (сх. ОБ) – справочный параметр;
 α_0 – статический коэффициент передачи тока базы.

Формулы для пересчета

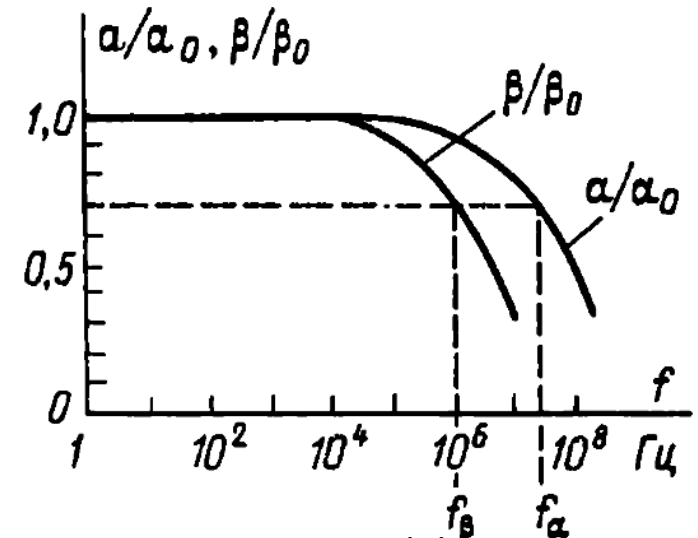
$$f_\beta = \frac{f_\alpha}{1 + \beta} \cong \frac{f_\alpha}{1 + \beta}; \quad f_\beta = f_\alpha (1 - \alpha).$$

Очевидно, что предельная частота в схеме ОЭ в $(1 + \beta)$ раз меньше, чем в схеме ОБ, т.е. частотные свойства транзистора при включении по сх. ОБ существенно лучше частотных свойств при включении транзистора по схеме ОЭ.

Граничная частота коэффициента передачи тока базы – это частота, на которой $\beta = 1$, справочный параметр:

$$f_{гр} = f_\beta \sqrt{\beta_0^2 - 1} \cong f_\beta \cdot \beta_0.$$

Зависимость относительного коэффициента передачи тока транзистора и



f_β – предельная частота коэффициента передачи тока – частота, на которой коэффициент снижается в 1,41 раза (или на 3 дБ) от максимального значения, т.е.

$$f_{гр} = f_\beta \sqrt{\beta_0^2 - 1} \cong f_\beta \cdot \beta_0.$$

f_β – предельная частота является аналогом граничной частоты, используемой при определении полосы пропускания цепи по АЧХ

Основные параметры биполярных транзисторов

Эксплуатационные параметры

1. Коэффициенты передачи эмиттерного α или базового β токов.
2. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении на КП:
$$I_{кбо} = I_{к0} \text{ (доли мкА } \div \text{ десятки мА)}$$
3. $r_{б}$ – объемное сопротивление базы (сотни Ом);
4. $r_{к}$ – дифференциальное сопротивление обратно смещенного КП (сотни кОм \div единицы МОм) или h_{22} – выходная проводимость;
5. $U_{кн}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер (десятые доли В \div единицы В);
6. $C_{к}$ – емкость обратно смещенного коллекторного перехода (единицы \div десятки пФ);
7. R_{T} - тепловое сопротивление между КП и корпусом $R_{T} = \Delta T / P_{к \max}$, где $\Delta T = T_{п} - T_{к}$ – перепад температур между переходом и корпусом транзистора;
8. f_{β} , f_{α} – предельная частота передачи тока в схеме ОЭ и ОБ, соответственно.

Предельно-допустимые параметры

9. $I_{к \max}$ – максимально допустимый ток коллектора (сотни мА \div десятки А);
10. $U_{кэ \max}$ – максимально допустимое напряжение К-Э;
11. $P_{к \max}$ – максимально допустимая мощность, рассеиваемая коллектором (до десятков Вт);
12. $U_{бэ \text{ обр } \max}$ – максимально допустимое обратное напряжение ЭП;
13. $I_{б \max}$ – максимально допустимый прямой ток базы.

Превышение параметрами предельно-допустимых значений $I_{к \max}$, $U_{кэ \max}$, $P_{к \max}$, $I_{б \max}$, $U_{бэ \text{ обр } \max}$ ведет к выходу транзистора из строя.

