

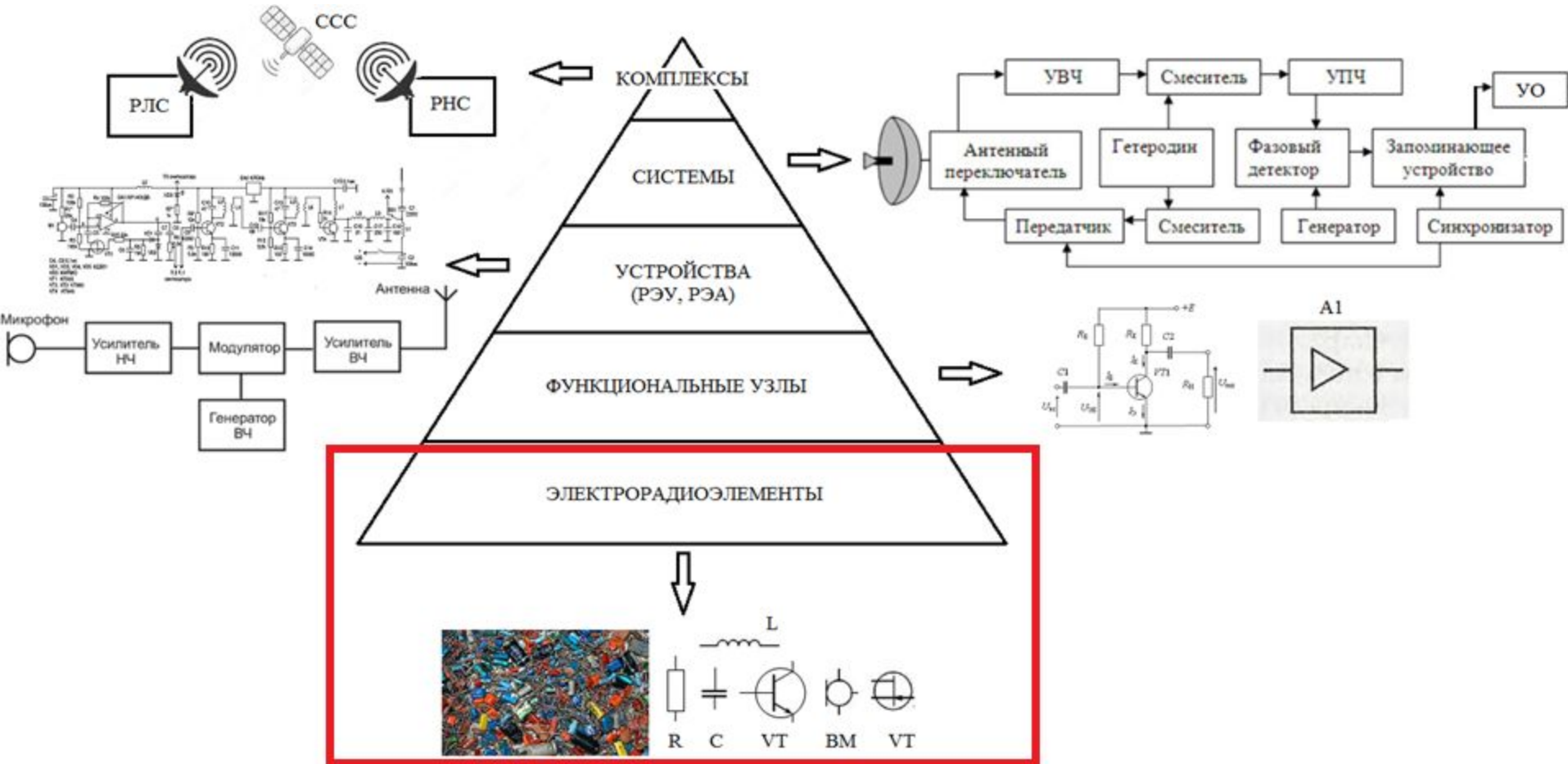
**Кривин Николай Николаевич**

(старший преподаватель КИПР, канд. техн. наук)

# **СХЕМО- И СИСТЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

## ***1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СЭС. Биполярные транзисторы***

# ИЕРАРХИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ



# АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ НОВОГО ДЛЯ ВАС ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТА

Определение

Классификация

Назначение (функция) и области применения

Основные параметры и их расчетные формулы

Принцип работы (ФЭ)

Отличительные особенности работы в экстремальных режимах эксплуатации

Внешний вид

Условно-графическое и позиционное обозначения

Маркировка и кодировка номиналов

Эквивалентные схемы и схемы замещения

Типовая схема включения, примеры использования в схемах различных ФУ

# ИСТОЧНИКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТАМ

**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ**

**ГОСТ, ОСТ, ТУ, ФОРМУЛЯР, ПАСПОРТ, ЭТИКЕТКА,  
ИНСТРУКЦИИ ПО МОНТАЖУ, НАЛАДКЕ,  
РЕГУЛИРОВКЕ...**

**РУКОВОДСТВА ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ (ПРИМЕНЕНИЮ) ОТ  
ЗАВОДА-ПРОИЗВОДИТЕЛЯ (DATASHEET)**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПРАВОЧНИКИ ПО НОМЕНКЛАТУРЕ  
ЭРЭ**

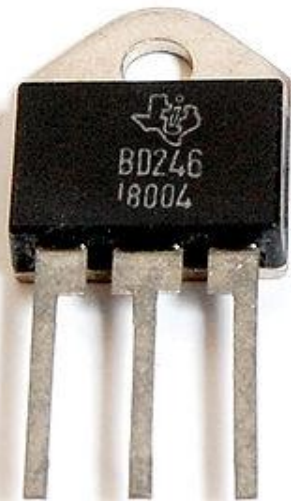
**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПРАВОЧНИКИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ И  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭРЭ**

**ОТРАСЛЕВЫЕ ЖУРНАЛЫ**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОДПИСНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ  
ИЗДАНИЯ**



# ТРАНЗИСТОРЫ



I. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СХЕМОТЕХНИКИ ЭС

# ТРАНЗИСТОРЫ



KD617



2П904А



2Т704Б



П217Б



ГТ905А



П401, П403



КТ312А



КТ961



КТ940А1



КП303Е



КТ361Е

# ТРАНЗИСТОРЫ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ

**ТРАНЗИСТОР** – радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, способный с помощью небольшого входного сигнала управлять значительным током в выходной цепи, что позволяет его использовать для усиления, генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов.

В настоящее время транзистор является основой схемотехники подавляющего большинства электронных устройств и интегральных микросхем.

# ТРАНЗИСТОРЫ

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ОСНОВНОМУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМУ МАТЕРИАЛУ\*

### Первый элемент обозначения

Условное обозначение	Исходный материал
Г или 1	Германий или его соединения
К или 2	Кремний или его соединения
А или 3	Соединения галлия (например, арсенид галлия)
И или 4	Соединения индия (например, фосфид индия)

\*МРБ 1190 А.И.Аксенов, А.В.Нефедов. Элементы схем БРА. Диоды. Транзисторы 1992

### НАПРИМЕР:

КРЕМНИЕВЫЕ (КТ315А; 2Т312; КП303)

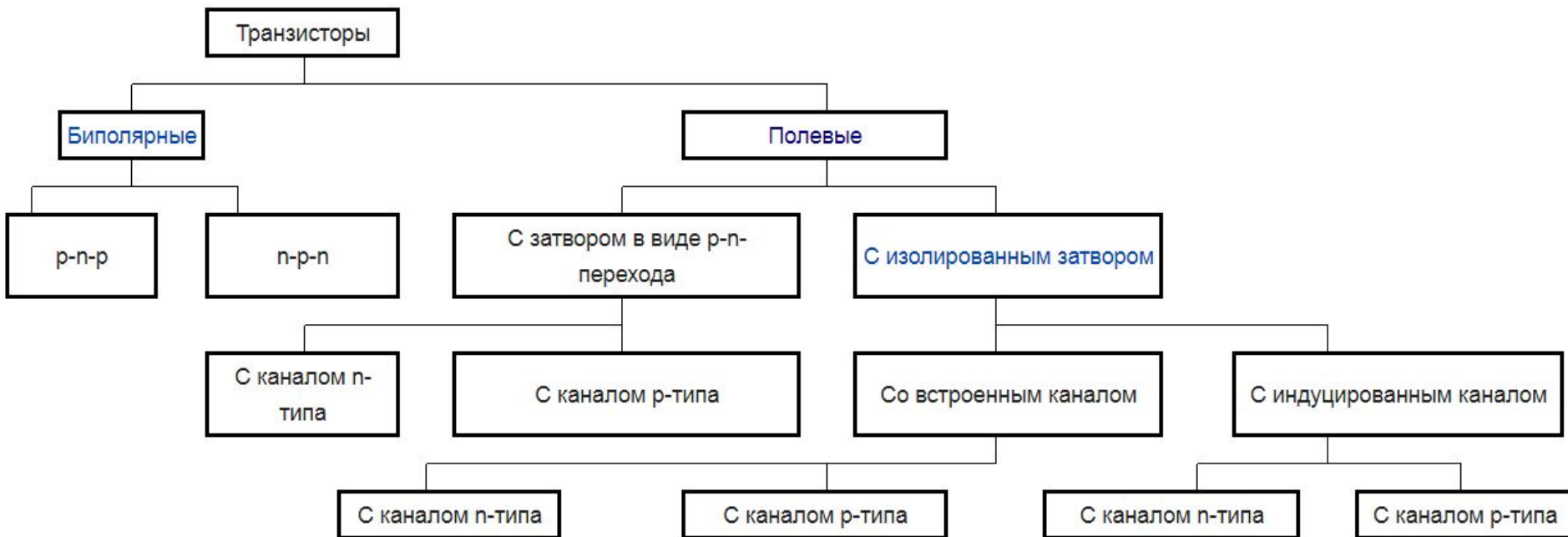
ГЕРМАНИЕВЫЕ (ГТ313Б; 1Т313А; ) © КРИВИН Н.Н. 2017

АРСЕНИД ГАЛЛИЕВЫЕ (2П22Б)

I. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СХЕМОТЕХНИКИ ЭС

# ТРАНЗИСТОРЫ

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПО СТРУКТУРЕ



# ТРАНЗИСТОРЫ

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПО СТРУКТУРЕ

Второй элемент обозначения	
Условное обозначение	Подкласс (или группа) приборов
Т	Транзисторы (за исключением полевых)
П	Транзисторы полевые
Д	Диоды выпрямительные и импульсные, магнитодиоды, термодиоды
К	Стабилизаторы тока
Ц	Выпрямительные столбы и блоки
С	Стабилитроны, стабисторы и ограничители
В	Варикапы
Л	Излучающие оптоэлектронные приборы
О	Оптопары
Н	Тиристорные диоды
У	Тиристорные триоды
И	Туннельные диоды
Г	Генераторы шума
Б	Приборы с объемным эффектом (приборы Ганна)
А	Сверхвысокочастотные диоды

# ТРАНЗИСТОРЫ

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ЧАСТОТЕ И МОЩНОСТИ

Третий элемент обозначения	
Условное обозначение	Назначение прибора
	<b>Транзисторы биполярные</b>
	<i>Транзисторы малой мощности с мощностью рассеяния <math>P_K &lt; 0,3</math> Вт :</i>
1	низкой частоты ( $f_{гр} < 3$ МГц)
2	средней частоты ( $f_{гр} = 3 \dots 30$ МГц)
3	высокой частоты ( $f_{гр} > 30$ МГц)
	<i>Транзисторы средней мощности (<math>P_K = 0,3 \dots 1,5</math> Вт):</i>
4	низкой частоты
5	средней частоты
6	высокой и сверхвысокой частот
	<i>Транзисторы большой мощности (<math>P_K &gt; 1,5</math> Вт):</i>
7	низкой частоты
8	средней частоты
9	высокой и сверхвысокой частот



# ТРАНЗИСТОРЫ

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ЧАСТОТЕ И МОЩНОСТИ

### Третий элемент обозначения

Условное обозначение	Назначение прибора
<b>Транзисторы полевые</b>	
<i>Транзисторы малой мощности (<math>P_C &lt; 0,3</math> Вт):</i>	
1	низкой частоты
2	средней частоты
3	высокой и сверхвысокой частот
<i>Транзисторы средней мощности (<math>P_C = 0,3... 1,5</math> Вт):</i>	
4	низкой частоты
5	средней частоты
6	высокой и сверхвысокой частот
<i>Транзисторы большой мощности (<math>P_C &gt; 1,5</math> Вт):</i>	
7	низкой частоты
8	средней частоты
9	высокой и сверхвысокой частот



# ТРАНЗИСТОРЫ

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

**Активный режим** — соответствует случаю, рассмотренному при анализе усилительных свойств транзистора. *В этом режиме прямо смещенным оказывается эмиттерный переход, а на коллекторном присутствует обратное напряжение.* Именно в активном режиме транзистор наилучшим образом проявляет свои усилительные свойства. Поэтому часто такой режим называют основным или нормальным.

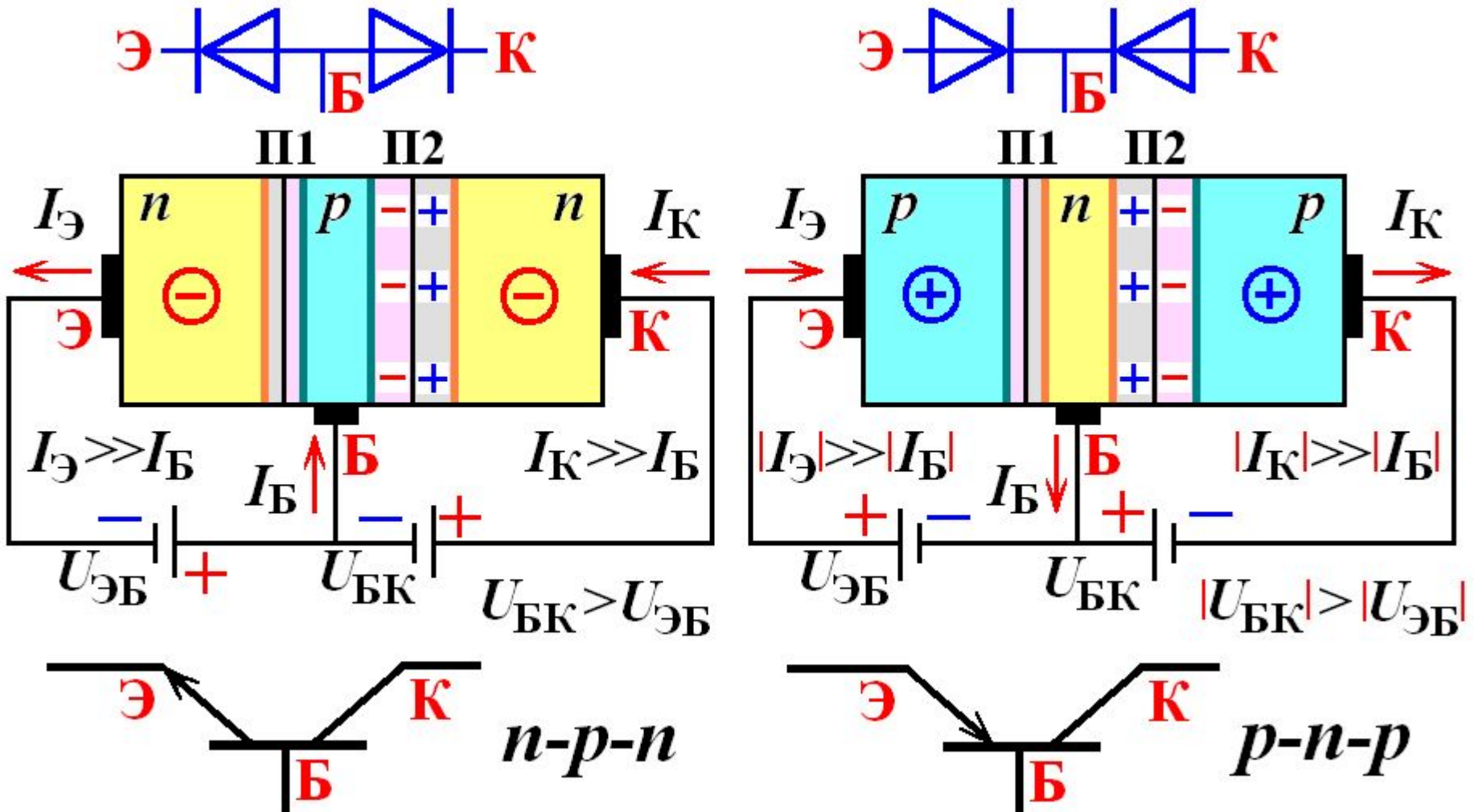
**Инверсный режим** — полностью противоположен активному режиму, т.е. *обратно смещенным является эмиттерный переход, а прямо смещенным — коллекторный.* В таком режиме транзистор также может использоваться для усиления. Однако из-за конструктивных различий между областями коллектора и эмиттера усилительные свойства транзистора в инверсном режиме проявляются гораздо хуже, чем в режиме активном. Поэтому на практике инверсный режим практически не используется.

**Режим насыщения** (режим двойной инжекции) — *оба перехода транзистора находятся под прямым смещением.* В этом случае выходной ток транзистора не может управляться его входным током, т.е. усиление сигналов невозможно. Режим насыщения используется в ключевых схемах, где в задачу транзисторов входит не усиление сигналов, а замыкание/размыкание разнообразных электрических цепей.

**Режим отсечки** — *к обоим переходам подведены обратные напряжения.* Такой режим также используется в ключевых схемах. Поскольку в нем выходной ток транзистора практически равен нулю, то он соответствует размыканию

# Биполярные транзисторы *n-p-n* и *p-n-p* типа

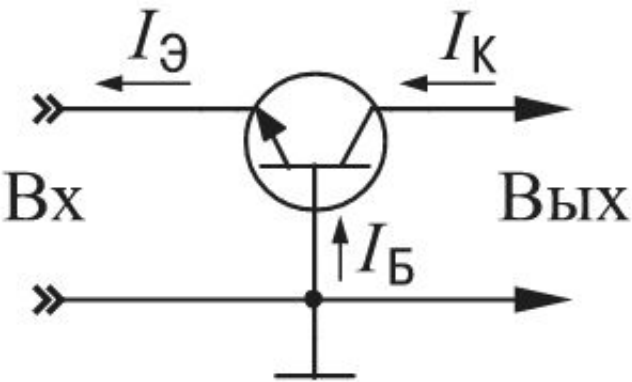
Структурная схема и условно-графическое обозначение



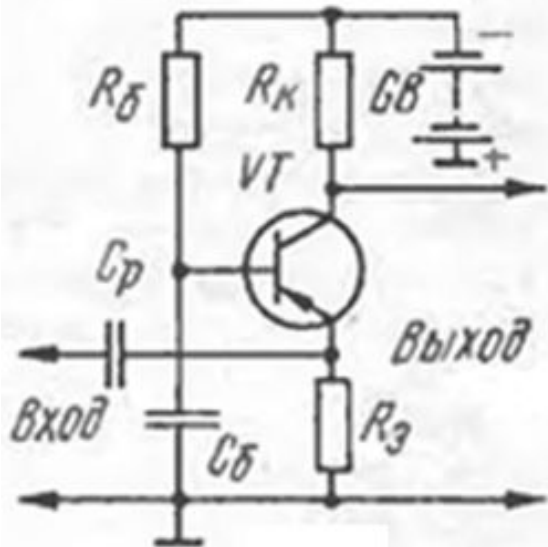
# ТРАНЗИСТОРЫ

## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

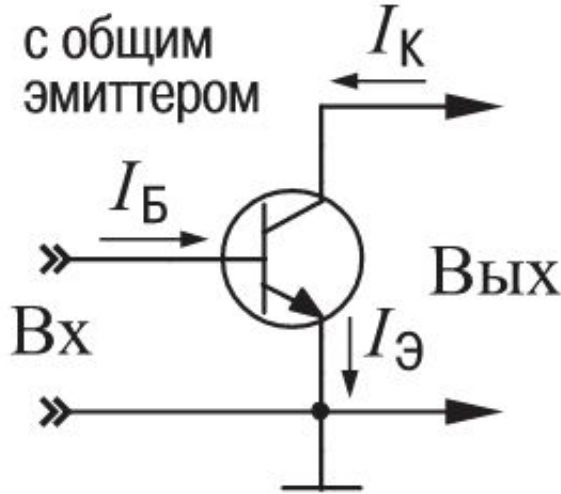
с общей базой



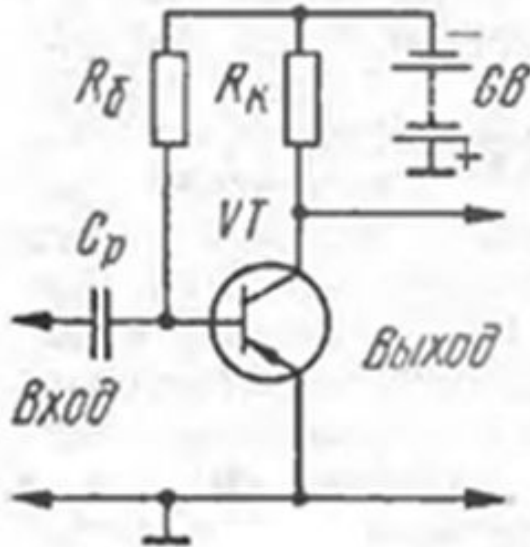
ОБ



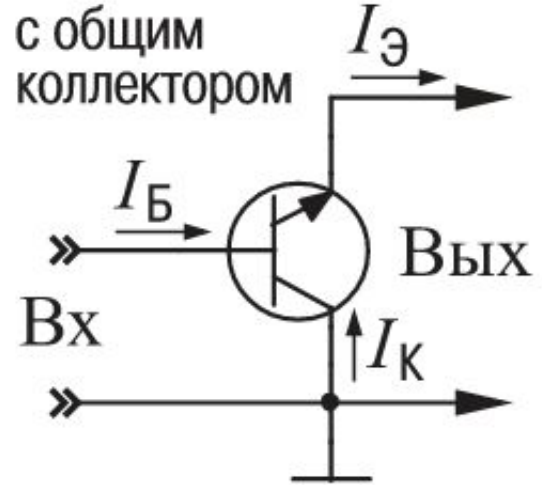
с общим эмиттером



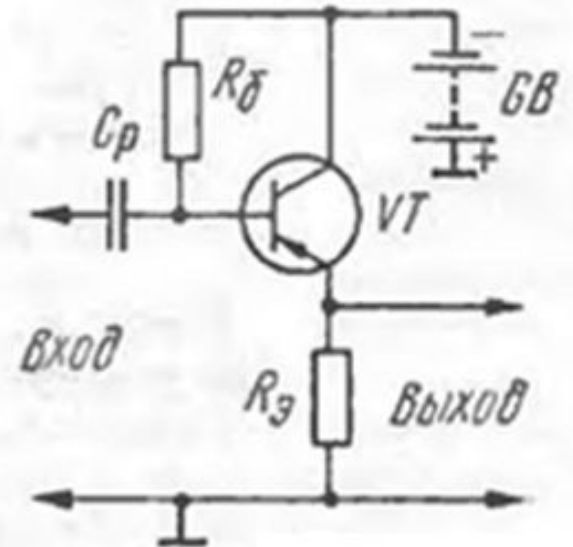
ОЭ



с общим коллектором

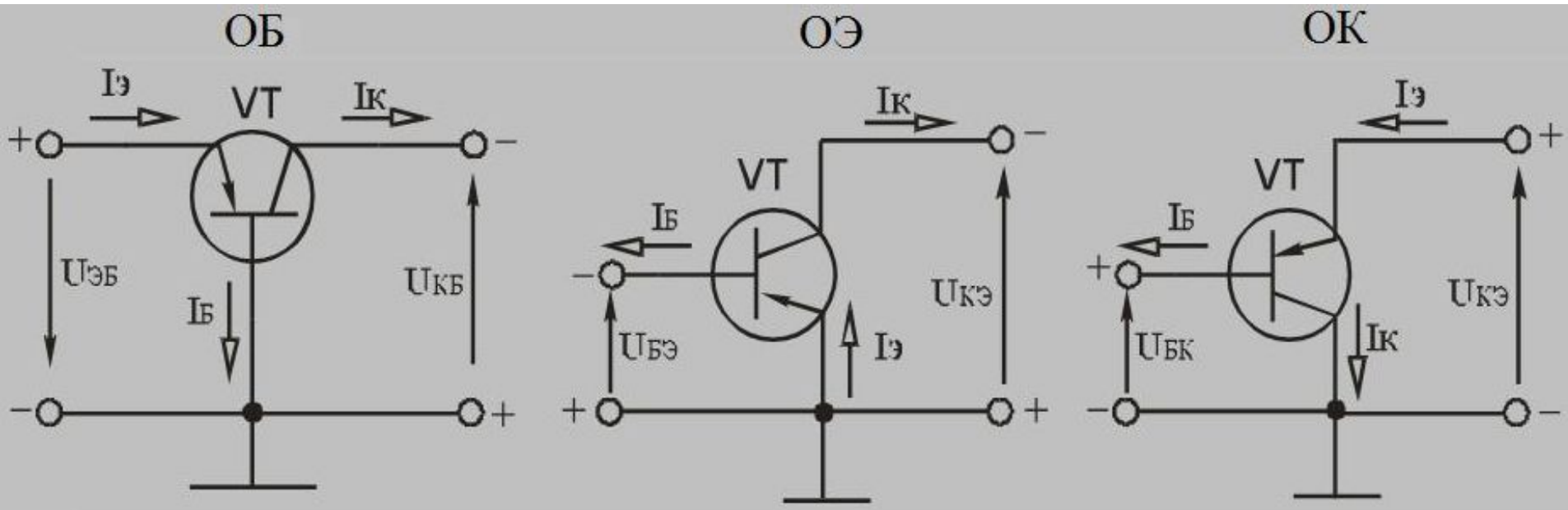


ОК

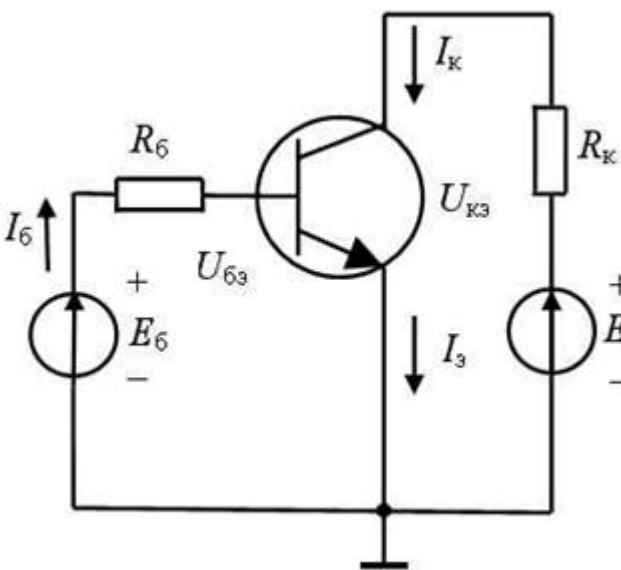


# ТРАНЗИСТОРЫ

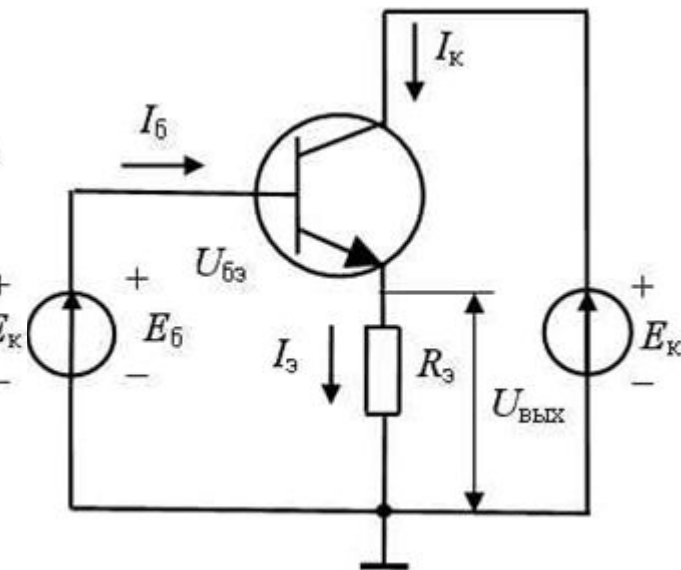
## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО $p-n-p$ ТРАНЗИСТОРА



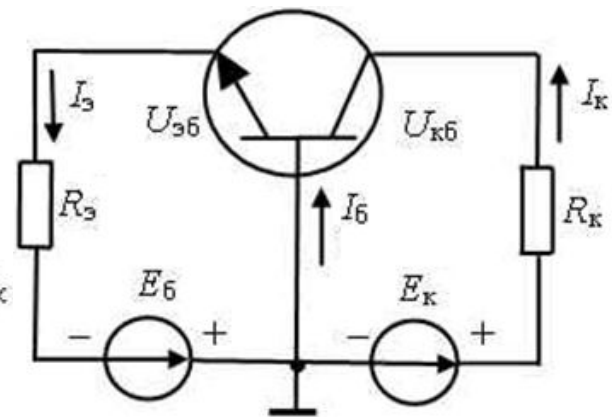
Включение  
биполярного п-р-п  
транзистора по  
схеме с ОЭ



Включение  
биполярного  
п-р-п  
транзистора  
по схеме с ОК

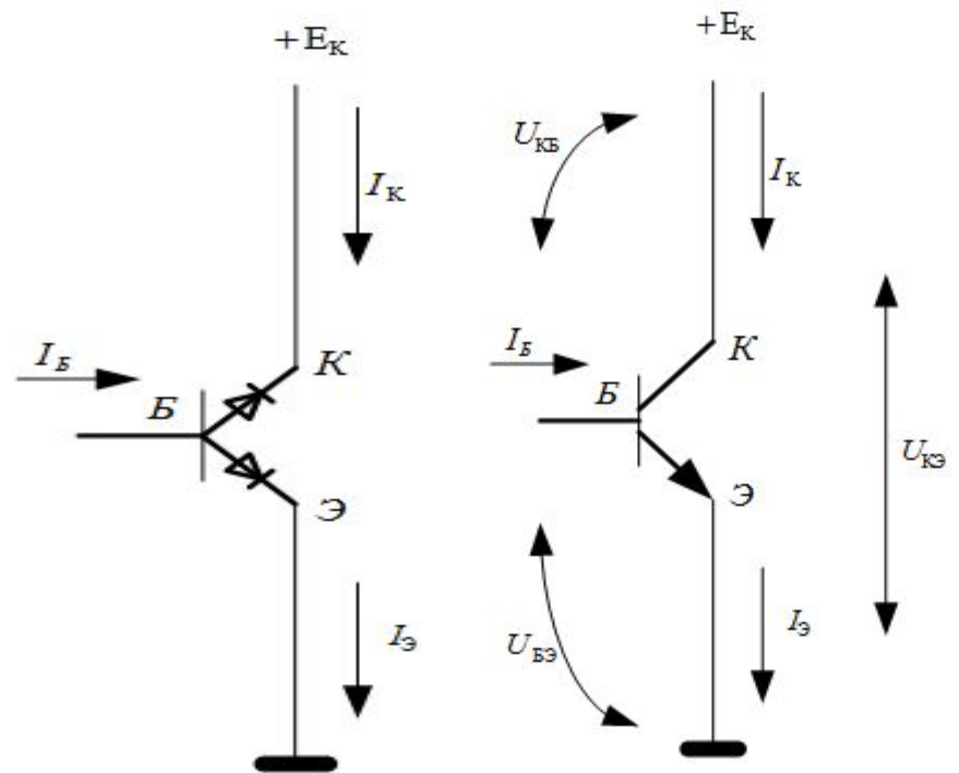
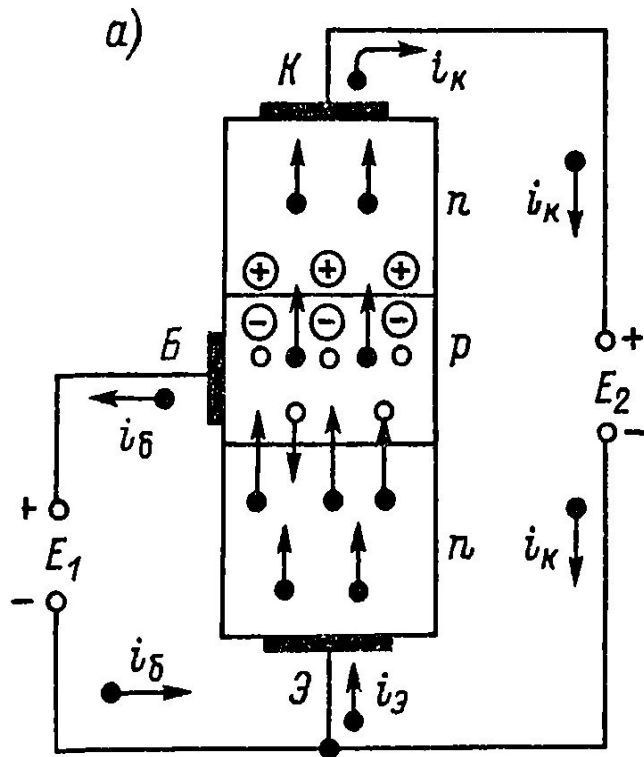


Включение  
биполярного  
п-р-п транзистора  
по схеме с ОБ



# Процессы, протекающие в транзисторе в активном режиме

$$U_{KЭ} = U_{KБ} + U_{БЭ}, \quad U_{БЭ} \ll U_{KБ}, \quad U_{KЭ} \approx U_{KБ}.$$



$$i_э = i_к + i_б, \quad i_б \ll i_э, \quad i_к \approx i_э.$$

$$i_{\mathcal{E}} = i_K + i_B; \quad i_K \approx \alpha i_{\mathcal{E}}; \quad \text{т.к. } i_K < i_{\mathcal{E}}; \quad \alpha < 1$$

$\alpha < 1$  - коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера

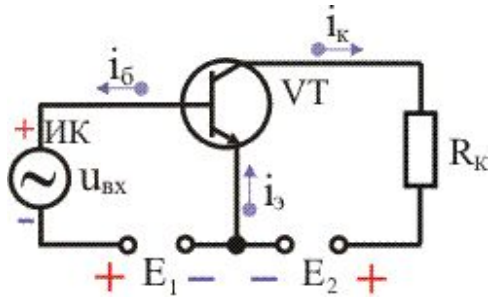
$$i_K = \alpha(i_K + i_B);$$

$$i_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_B; \quad \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \gg 1$$

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

$\beta = \frac{i_K}{i_B} \gg 1$  - коэффициент передачи (усиления) тока базы

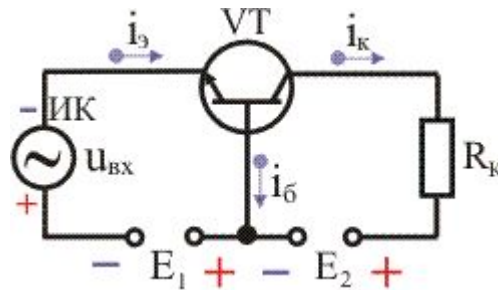
# Схемы включения БТ



**ОЭ**

обладает высоким усилением как по напряжению, так и по току. У нее самое большое усиление по мощности. Это самая распространенная усилительная схема

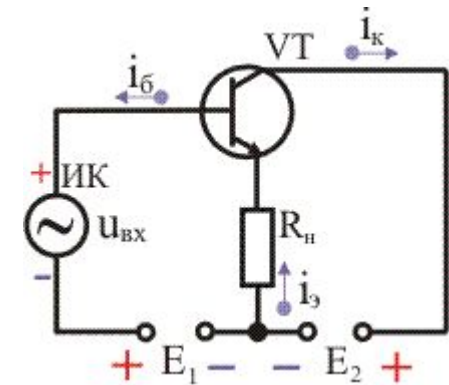
$$\beta = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_b}$$



**ОБ**

усиливает напряжение (примерно, как и схема с ОЭ), но не усиливает ток. Схема находит применение в усилителях ВЧ и СВЧ. Схема с ОБ не дает значительного усиления, но обладает хорошими частотными и температурными свойствами. Применяется не так часто, как схема с ОЭ. Коэффициент усиления по току схемы с ОБ всегда немного меньше единицы:

$$k_i = \frac{I_{ик}}{I_{иэ}} = 1$$



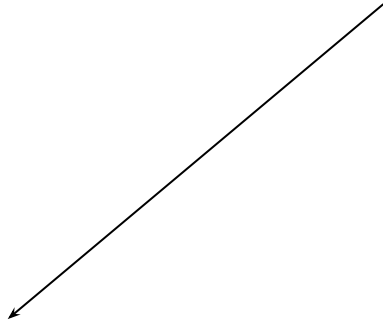
**ОК**

Эмиттерный повторитель: не усиливает напряжение, но усиливает ток. Основное применение – согласование сопротивлений источника сигнала и низкоомной нагрузки. Входное напряжение полностью передается обратно на вход, т. е. очень сильна отрицательная обратная связь.

$$\alpha = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_b}$$



# Параметры биполярного транзистора

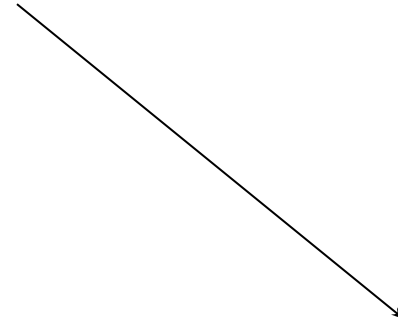


собственные

(первичные, физические)




характеризуют  
свойства самого  
транзистора



вторичные



различны для  
различных схем  
включения

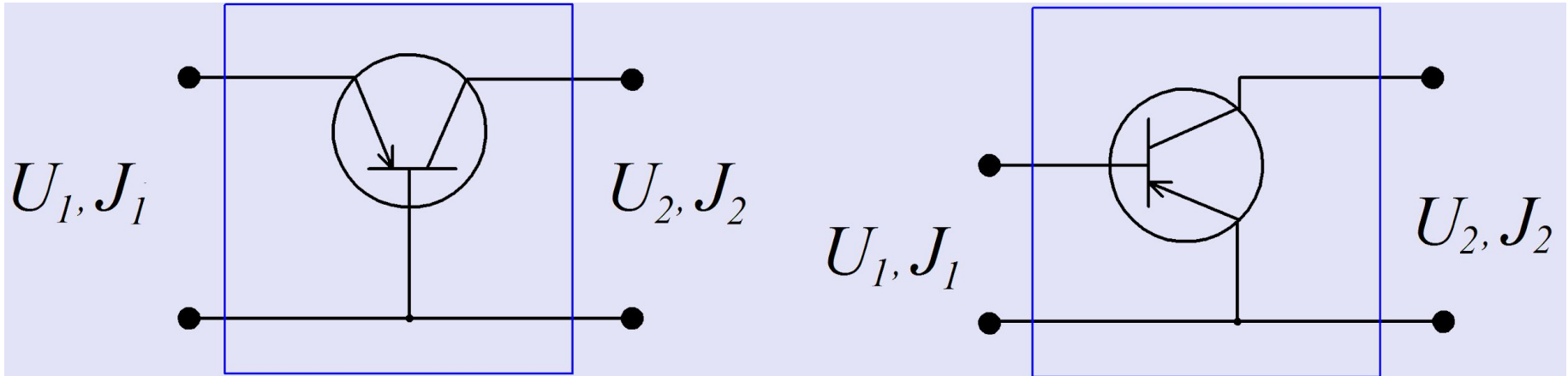


Удобство физических параметров заключается в том, что они позволяют наглядно представить влияние конструктивно-технологических параметров транзистора на его эксплуатационные характеристики.

Так, например, уменьшение степени легирования базы или ее толщины должны приводить к росту  $r_b$  и, соответственно, к увеличению обратной связи в транзисторе.

К недостаткам физических параметров следует отнести то, что их нельзя непосредственно измерить и значения для них получают пересчетом из других параметров.

# Характеристики БТ как четырёхполюсника.



$$U_1 = f(I_1, I_2)$$

$$U_2 = f(I_1, I_2)$$

# Характеристики БТ как четырехполюсника.

Если на постоянные составляющие токов и напряжений наложены достаточно малые сигналы переменного напряжения  $u$  или тока  $i$ , то их амплитуды (или действующие значения) можно рассматривать как малые приращения постоянных составляющих.

В зависимости от того, какие из этих параметров выбраны в качестве входных, а какие в качестве выходных, можно построить три системы формальных параметров транзистора как четырехполюсника.

Это системы  $r$ -параметров ( $Z$ ),  $g$ -параметров ( $Y$ ) и  $h$ -параметров.

# Эквивалентные схемы замещения транзисторов

Различают:

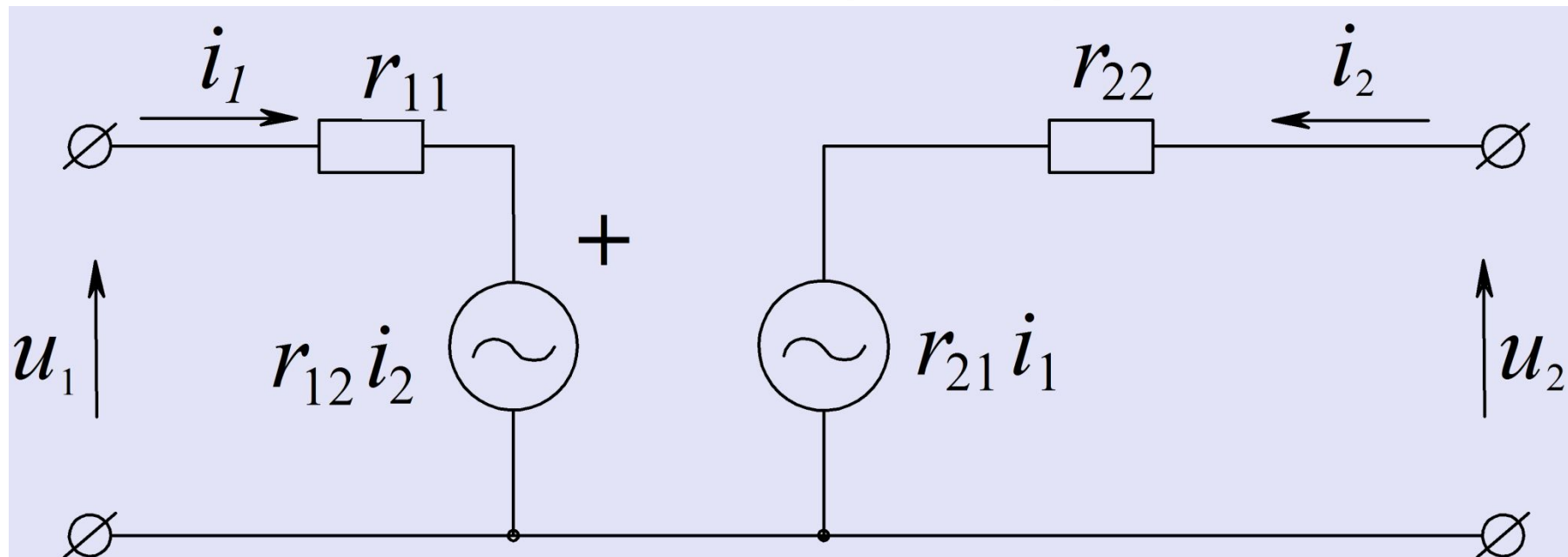
1. Физическую T-образную эквивалентную схему,
2. формальные модели в h-параметрах, Y-параметрах, Z-параметрах.

Эквивалентные схемы необходимы для проведения анализа и синтеза электро- и радиотехнических схем

Рассматриваемые далее эквивалентные схемы можно использовать при условии, что:

- транзистор работает в линейном режиме,
- изменения токов и напряжений малы по амплитуде,
- нелинейные ВАХ можно заменить линейными,
- параметры транзистора в общем случае являются дифференциальными.

# Эквивалентная схема транзистора для системы $r$ -параметров



Система  $r$ -параметров

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial I_2} dI_2$$

$$u_1 = r_{11}i_1 + r_{12}i_2$$

$$dU_2 = \frac{\partial U_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_2}{\partial I_2} dI_2$$

$$u_2 = r_{21}i_1 + r_{22}i_2$$

# Описание $r$ -параметров

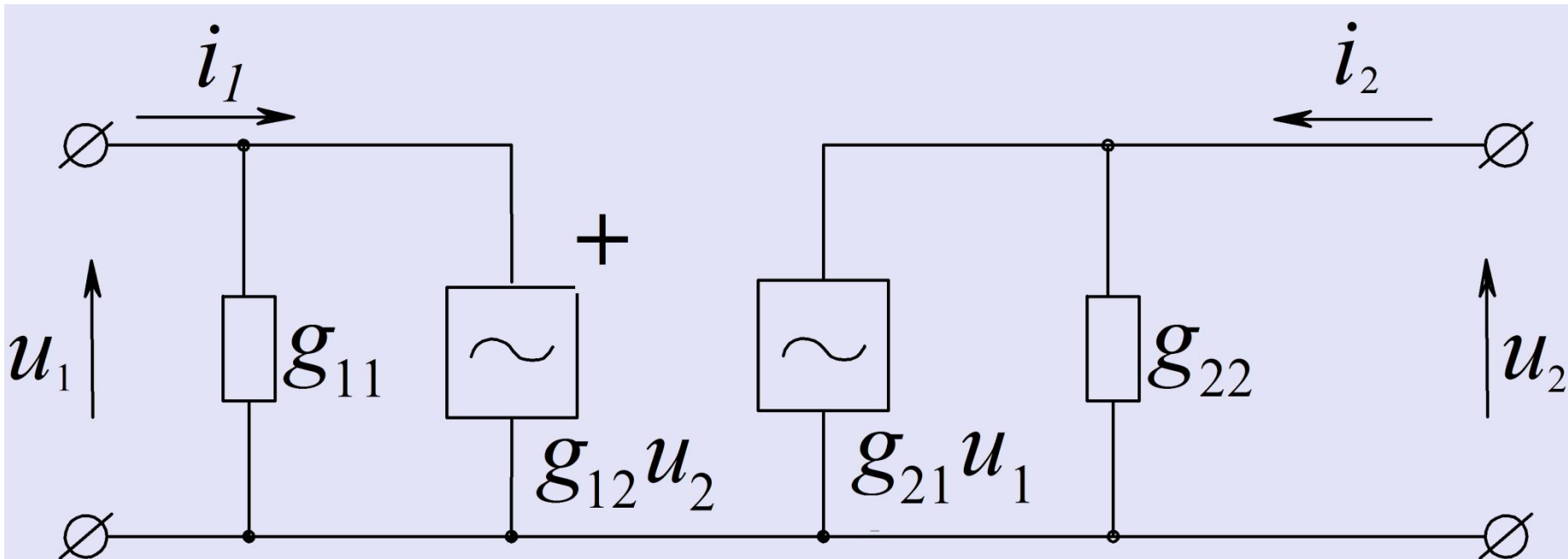
$$r_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{i_2=0} \quad - \quad \text{входное сопротивление транзистора в режиме ХХ в выходной цепи.}$$

$$r_{12} = \frac{u_1}{i_2} \Big|_{i_1=0} \quad - \quad \text{сопротивление обратной связи в режиме ХХ во входной цепи.}$$

$$r_{21} = \frac{u_2}{i_1} \Big|_{i_2=0} \quad - \quad \text{сопротивление прямой передачи сигнала, измеренное в режиме ХХ в выходной цепи.}$$

$$r_{22} = \frac{u_2}{i_2} \Big|_{i_1=0} \quad - \quad \text{выходное сопротивление транзистора, измеренное в режиме ХХ во входной цепи.}$$

# Эквивалентная схема для $g$ -параметров



## Система $g$ -параметров

$$I_1 = f(U_1, U_2)$$
$$dI_1 = \frac{\partial I_1}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_1}{\partial U_2} dU_2$$
$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2$$

$$I_2 = f(U_1, U_2)$$

$$i_1 = g_{11}u_1 + g_{12}u_2$$

$$i_2 = g_{21}u_1 + g_{22}u_2$$



# Описание $g$ -параметров

$g_{11} = \frac{i_1}{u_1} \Big|_{u_2=0}$  – входная проводимость транзистора при КЗ на выходе.

$g_{12} = \frac{i_1}{u_2} \Big|_{u_1=0}$  – проводимость обратной передачи при КЗ на входе.

$g_{21} = \frac{i_2}{u_1} \Big|_{u_2=0}$  – проводимость прямой передачи, которая характеризует влияние входного напряжения на выходной ток при КЗ на выходе.

$g_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{u_1=0}$  – выходная проводимость транзистора при КЗ на входе.

Следует особо подчеркнуть, что  $r_{ij} \neq \frac{1}{g_{ij}}$ , так как  $r$ -

параметры измеряются в режиме ХХ, а  $g$ -параметры – в режиме КЗ на входе и выходе транзистора.

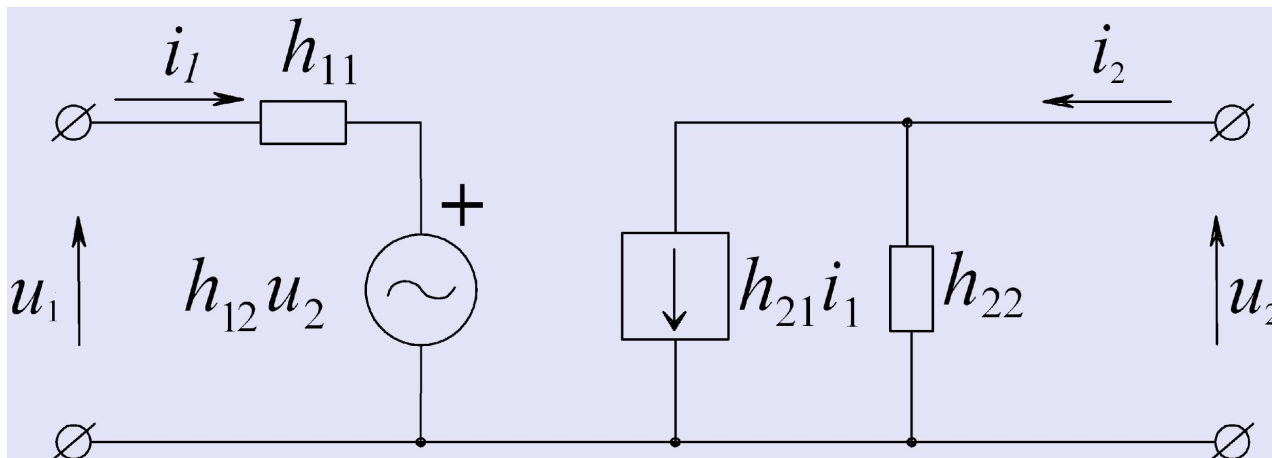
Поскольку при измерениях задаются напряжения, необходимо осуществлять режим генератора напряжения, т.е. сопротивление генератора на частоте сигнала должно быть много меньше входного или выходного сопротивления транзистора.

# Система $h$ -параметров

Система  $h$ -параметров используется как комбинированная система из двух предыдущих, причем из соображений удобства измерения параметров биполярного транзистора выбирается режим короткого замыкания на в ( $u_2=0$ ) и режим холостого хода на входе ( $i_1=0$ ).

Поэтому для системы  $h$ -параметров в качестве входных параметров задаются ток  $i_1$  и напряжение  $u_2$ , а в качестве выходных параметров рассчитываются ток  $i_2$  и напряжение  $u_1$ ,  $U_1 = f_1(I_1, U_2)$ ,  $I_2 = f_2(I_1, U_2)$ .

# Эквивалентная схема для $h$ -параметров



$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2 \quad (5.12)$$

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \quad (5.13)$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2 \quad (5.14)$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \quad (5.15)$$

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{K\Theta}} \Big|_{i_B = \text{const}}$$

$$h_{21} = \beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} \Big|_{u_{K\Theta} = \text{const}}$$

$$h_{11\Theta} = \frac{\Delta u_{B\Theta}}{\Delta i_B} \Big|_{u_{K\Theta} = \text{const}}$$

$$h_{12\Theta} = \frac{\Delta u_{B\Theta}}{\Delta u_{K\Theta}} \Big|_{i_B = \text{const}}$$

$$\Delta i_K = I'_K - I_K(0)$$

$$\Delta u_{K\Theta} = U'_{K\Theta} - U_{K\Theta}(0)$$

$$\Delta i_B = I'_B - I_B(0)$$

$$\Delta u_{B\Theta} = U'_{B\Theta} - U_{B\Theta}(0)$$

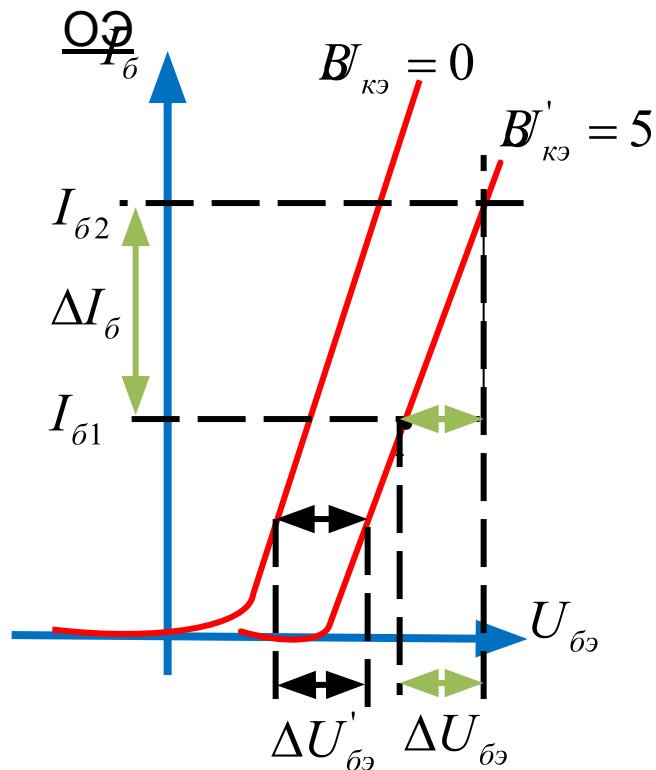
$$\Delta u_{B\Theta} = U_{B\Theta}(0) - U'_{B\Theta}$$

$$\Delta u_{K\Theta} = U_{K\Theta}(0) - U'_{K\Theta}$$

## Способы получения $h$ - параметров

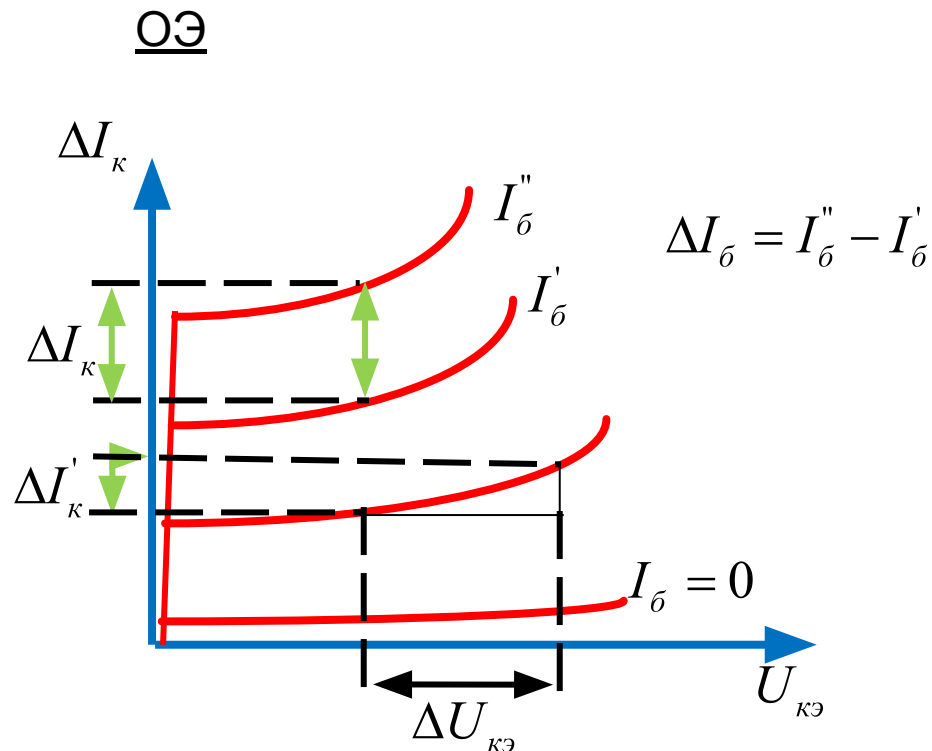
Основное достоинство  $h$ -параметров состоит в том, что их можно получить экспериментально: прямым измерением на основе вольт-амперных характеристик.

Входные характеристики



$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} \quad h_{12} = \frac{\Delta U'_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}}$$

Выходные характеристики



$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \beta \quad h_{22} = \frac{\Delta I'_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} = \frac{1}{r_{\text{к}}^*} \quad r_{\text{э}} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{э}}}$$

# Сводные значения h-параметров для различных схем включения

Параметр	ОБ	ОЭ	ОК
$h_{11}$	1-10 Ом	100-1000 Ом	10кОм-100кОм
$h_{12}$	$10^{-3}$ - $10^{-4}$	$10^{-3}$ - $10^{-4}$	$10^{-3}$ - $10^{-4}$
$h_{21}$	0.95-0.98	10-500	10-100
$1/h_{22}$	100кОм-1мОм	1кОм-10кОм	100-1000 Ом

## Вывод

ы

1. ВАХ транзистора существенно нелинейны. Значение  $h$ -параметров зависит от точки ВАХ, в которой они определяются.
2. Значения  $h$ -параметров зависят от температуры и приводятся в справочной литературе.
3. Значение  $h$ -параметров зависит от схемы включения транзистора. В справочной литературе приводятся таблицы переводов из одной системы параметров  $h$ - в другие системы ( $Z$ -,  $Y$ -) и для схем включения транзистора ОБ и ОЭ.



# Описание $h$ -параметров

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0}$$

– входное сопротивление при КЗ на выходе.

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

– коэффициент обратной связи при ХХ во входной цепи.

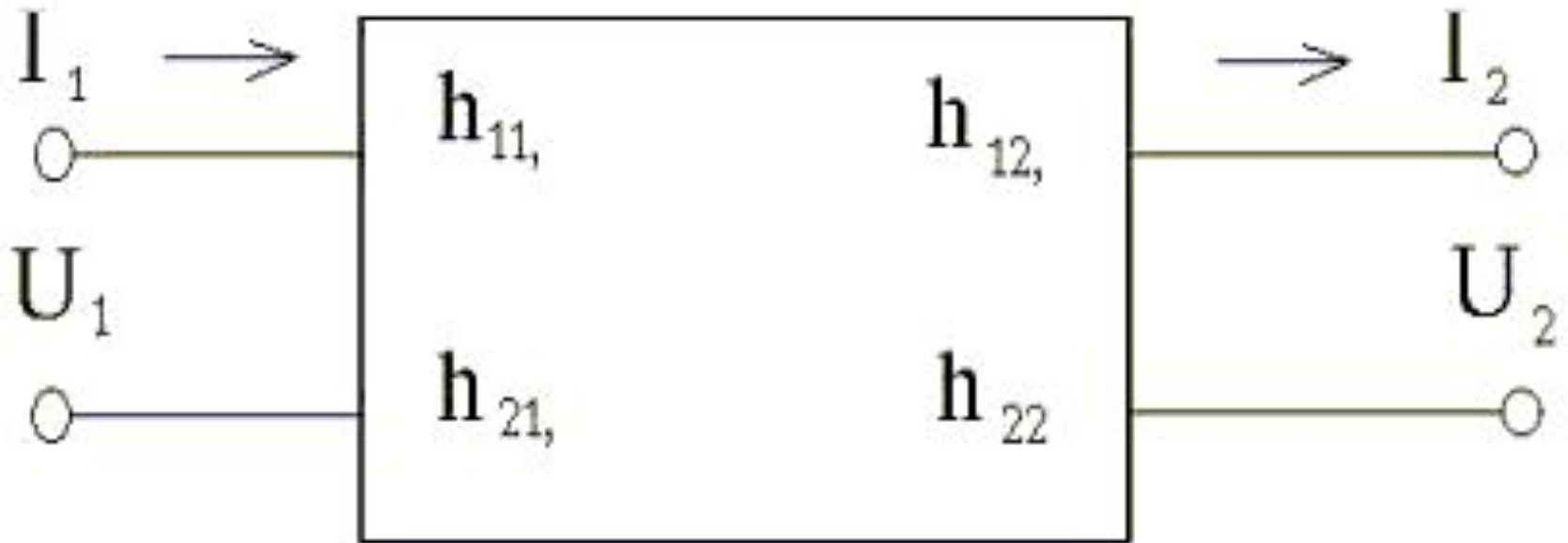
$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \Big|_{u_2=0}$$

– коэффициент прямой передачи тока при КЗ на выходе.

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{i_1=0}$$

– выходная проводимость при ХХ во входной цепи транзистора.

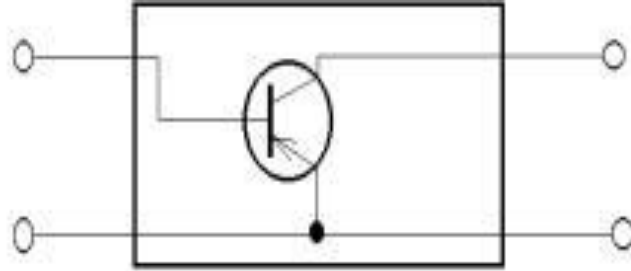
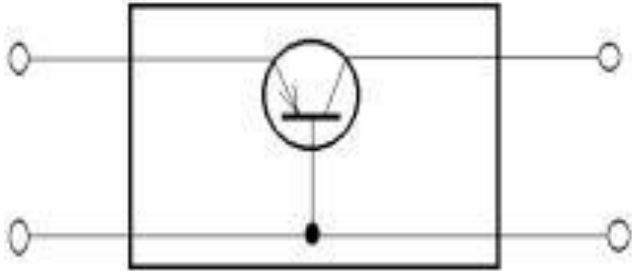
# *h*-параметры БТ как четырехполюсника.



$$\left. \begin{aligned} U_1 &= h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 &= h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{aligned} \right\}$$

# Характеристики БТ как четырехполюсника.

- Поскольку транзистор имеет три электрода и используется как четырехполюсник, то один из его электродов является общим для входной и выходной цепи. При этом значения  $h$ -параметров отличаются в зависимости от схемы включения биполярного транзистора:  $h_b$  для схемы с общей базой или  $h_e$  для схемы с общим эмиттером.



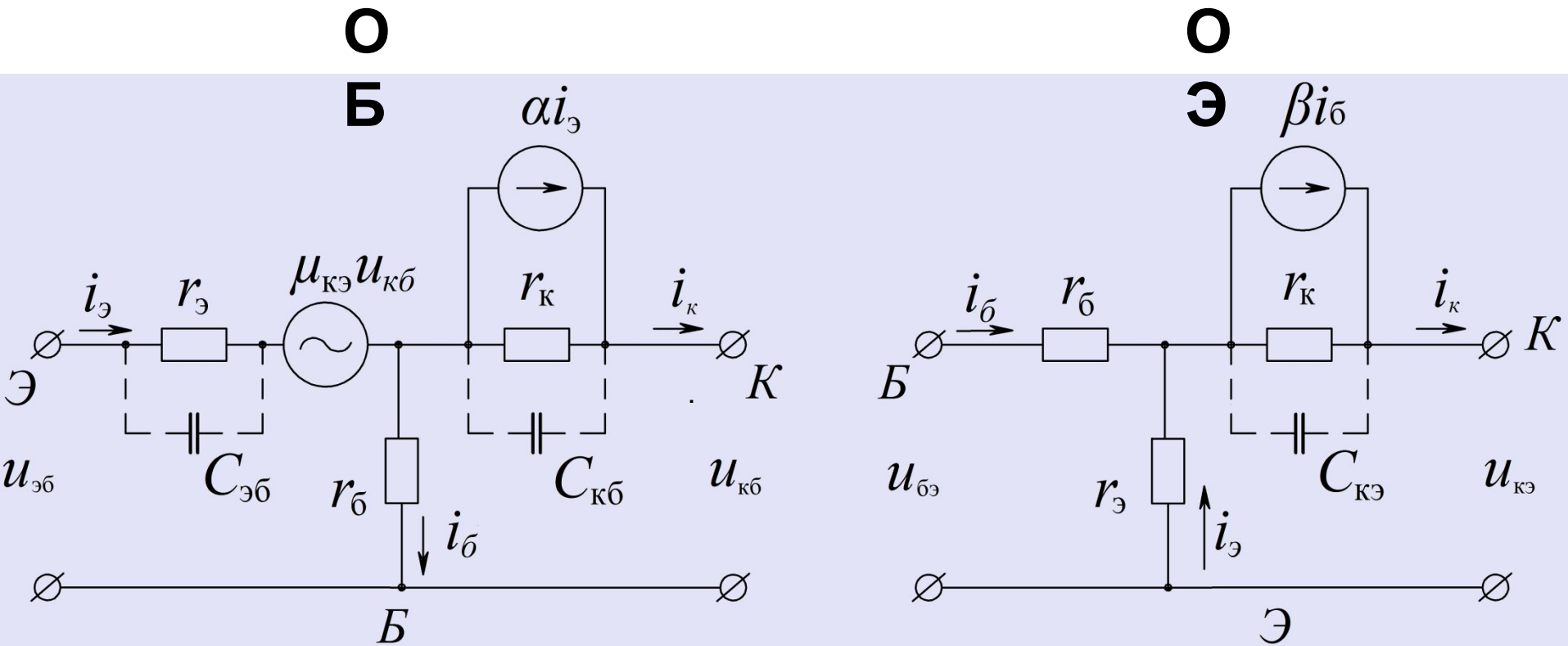
- $h$  - параметры можно определить с помощью статических характеристик методом измерения их на постоянных токе или напряжении. Тогда роль малого переменного тока и напряжения будут играть малые приращения постоянных токов  $\Delta I_b$ ,  $\Delta I_k$ , и напряжений  $\Delta U_k$ ,  $\Delta U_b$ . Для схемы с общим эмиттером.

$$\left. \begin{aligned} h_{11\varepsilon} &= \Delta U_{\bar{o}} / \Delta I_{\bar{o}} \cong r_{\bar{o}}, & \text{npu } U_k &= \text{const} \\ h_{12\varepsilon} &= \Delta U_{\bar{o}} / \Delta U_k \cong \mu_{\bar{o}k}, & \text{npu } I_{\bar{o}} &= \text{const} \\ h_{21\varepsilon} &= \Delta I_k / \Delta I_{\bar{o}} \cong \beta, & \text{npu } U_k &= \text{const} \\ h_{22\varepsilon} &= \Delta I_k / \Delta U_k \cong 1/r_k, & \text{npu } I_{\bar{o}} &= \text{const} \end{aligned} \right\}$$

- В справочниках иногда указываются  $h$ -параметры для схемы с ОБ ( $h_b$ ), которые можно найти путем пересчета, если известны  $h$ -параметры для схемы с ОЭ ( $h_\varepsilon$ ):

$$\left. \begin{aligned} h_{11b} &\approx \frac{h_{11\varepsilon}}{1 + h_{21\varepsilon}} \\ h_{12b} &\approx \frac{h_{11\varepsilon} h_{22\varepsilon} - h_{12\varepsilon} (1 + h_{21\varepsilon})}{1 + h_{21\varepsilon}} \\ h_{21b} &\approx -\frac{h_{21\varepsilon}}{1 + h_{21\varepsilon}} \\ h_{22b} &\approx \frac{h_{22\varepsilon}}{1 + h_{21\varepsilon}} \end{aligned} \right\}$$

# T-образная эквивалентная схема транзистора



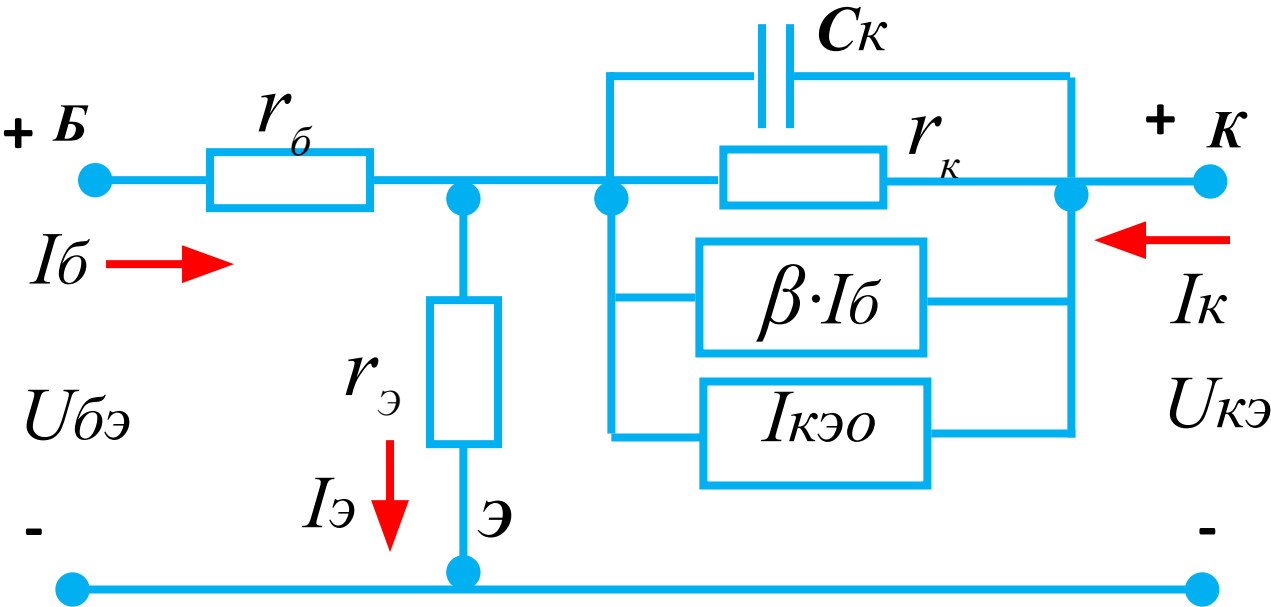
$$i_K = \frac{u_K}{r_K + r_Э} + \alpha \cdot i_Э$$

При ХХ в базе  $i_Э = i_K$

При ХХ на входе ( $i_Б = 0$ )

# Физическая Т-образная эквивалентная схема с ОЭ

Ток базы является управляющим, ток коллектора – управляемым.



$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

$$k = \beta I_{\text{б}} + I_{\text{кэ0}} + \frac{k_{\text{б}}}{r_{\text{к}}}$$

$r_{\text{б}}$  – объемное сопротивление базы

$r_{\text{к}}$  – дифф. сопротивление перехода КБ (обр. вкл.)

$r_{\text{э}}$  – дифф. сопротивление перехода ЭБ (прямое вкл.)

$$r_{\text{э}} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{э}}}$$

$(\varphi_{\text{Б}} = 0.025\text{В}, I = 1\text{мА}) \longrightarrow Q_{\text{э}} \approx 25$

Для эквивалентной схемы по постоянному току необходимо в исходной схеме заменить дифференциальные сопротивления на соответствующие статические и удалить конденсатор.

# Расчёт для схемы с ОЭ

При ХХ на входе  $i_B = 0$      $i_K = \frac{u_K}{r_K + r_{\text{Э}}} + \alpha \cdot i_{\text{Э}}$      $i_{\text{Э}} = i_K$

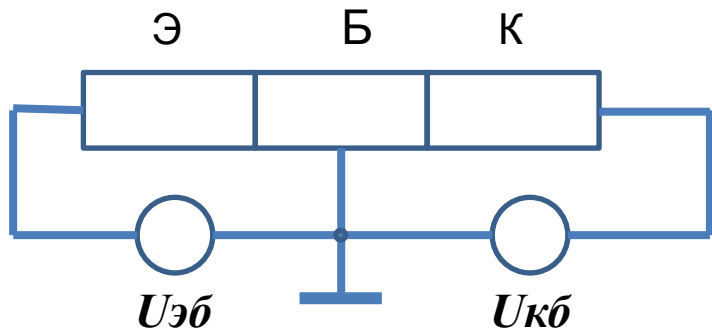
$$i_{\text{Э}} = \frac{u_K}{r_K + r_{\text{Э}}} + \alpha \cdot i_{\text{Э}} \qquad i_{\text{Э}}(1 - \alpha) = \frac{u_K}{r_K + r_{\text{Э}}}$$

Учитывая, что  $r_{\text{Э}} \ll r_K$ ,

$$i_{\text{Э}} = \frac{u_K}{r_K \cdot (1 - \alpha)}$$

$$r_{\text{вых}} = \frac{u_K}{i_K} = \frac{u_K}{\alpha i_{\text{Э}}} = r_K (1 - \alpha) \qquad r_{\text{вых}} = r_K^* = r_K (1 - \alpha)$$

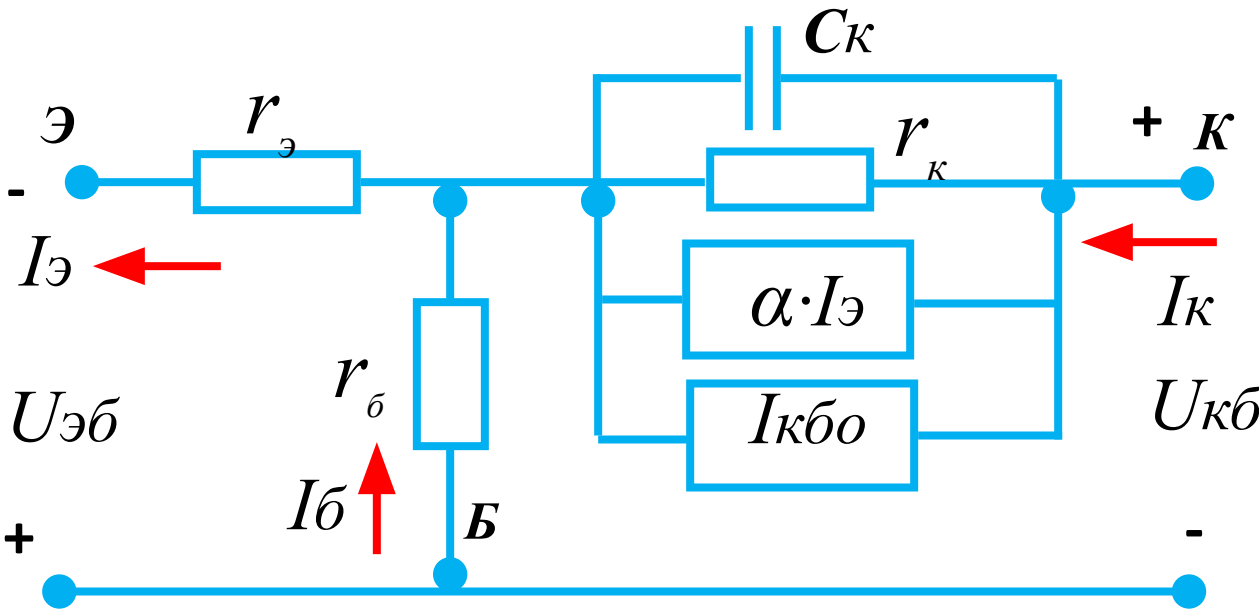
# Физическая Т-образная эквивалентная схема с ОБ



Ток эмиттера является управляющим, ток коллектора – управляемым.

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$$

$$k = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ0}} + \frac{k_{\text{Б}}}{r_{\text{К}}}$$



$r_{\text{б}}$  – объемное сопротивление базы

$r_{\text{к}}$  – дифф. сопротивление перехода КБ (обр. вкл.)

$r_{\text{э}}$  – дифф. сопротивление перехода ЭБ (прямое вкл.)

Для эквивалентной схемы по постоянному току необходимо в исходной схеме заменить дифференциальные сопротивления на соответствующие статические и удалить конденсатор.



# Связь $h$ -параметров биполярного транзистора с дифференциальными параметрами на примере схемы с ОБ

$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{u_2=0} \quad \text{— входное сопротивление при коротком замыкании на выходе.}$$

Полагая в эквивалентной схеме выходное напряжение  $U_{кб}=0$  и считая заданным входной ток эмиттера найдем напряжение на входе:

$$u_{ЭБ} = i_{Э} \cdot (r_{Э} + r_{б}) - \alpha \cdot i_{Э} \cdot \frac{r_{к} \cdot r_{б}}{r_{к} + r_{б}}$$

Учитывая, что  $r_k \gg r_{\delta}$ ,

$$u_{\text{ЭБ}} = i_{\text{Э}} \cdot (r_{\text{Э}} + r_{\delta}) - \alpha \cdot i_{\text{Э}} \cdot r_{\delta}$$

Входное сопротивление:

$$h_{11\text{Б}} = \frac{u_{\text{Э}}}{i_{\text{Э}}} = \frac{i_{\text{Э}} \cdot (r_{\text{Э}} + r_{\delta}) - \alpha \cdot i_{\text{Э}} \cdot r_{\delta}}{i_{\text{Э}}} = r_{\text{Э}} + r_{\delta} - \alpha \cdot r_{\delta} = r_{\text{Э}} + r_{\delta} \cdot (1 - \alpha)$$

Найдем  $i_{\text{Э}}$  с помощью второго уравнения Кирхгофа для коллекторной цепи, полагая заданным входной ток :

$$u_{\text{КБ}} = i_{\text{К}} \cdot (r_{\text{К}} + r_{\delta}) - \alpha \cdot i_{\text{Э}} \cdot r_{\text{К}}$$

Коэффициент обратной связи по напряжению при ХХ на входе ( $i_{\vartheta} = 0$ ):

$$h_{12B} \Big|_{i_{\vartheta}=0} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_{\text{ЭБ}}}{u_{\text{КБ}}} = \frac{i_{\text{К}} \cdot r_{\bar{\sigma}}}{i_{\text{К}} \cdot (r_{\text{К}} + r_{\bar{\sigma}})} = \frac{r_{\bar{\sigma}}}{r_{\text{К}} + r_{\bar{\sigma}}} \cong \frac{r_{\bar{\sigma}}}{r_{\text{К}}}$$

$$h_{21B} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_{\text{К}}}{i_{\vartheta}} \Big|_{u_{\text{КБ}}=0} \quad i_{\text{К}} = \frac{\alpha \cdot i_{\vartheta} \cdot r_{\text{К}}}{(r_{\text{К}} + r_{\bar{\sigma}})}$$

$$h_{21B} = \frac{-\alpha \cdot i_{\vartheta} \cdot r_{\text{К}}}{i_{\vartheta} \cdot (r_{\text{К}} + r_{\bar{\sigma}})} = -\alpha \cdot \frac{r_{\text{К}}}{r_{\text{К}} + r_{\bar{\sigma}}} \cong -\alpha \quad h_{22B} = \frac{i_{\text{К}}}{u_{\text{К}}} \Big|_{i_{\vartheta}=0} = \frac{1}{r_{\text{К}} + r_{\bar{\sigma}}} \cong \frac{1}{r_{\text{К}}}$$

# Сравнение $h$ -параметров для различных схем включения транзистора

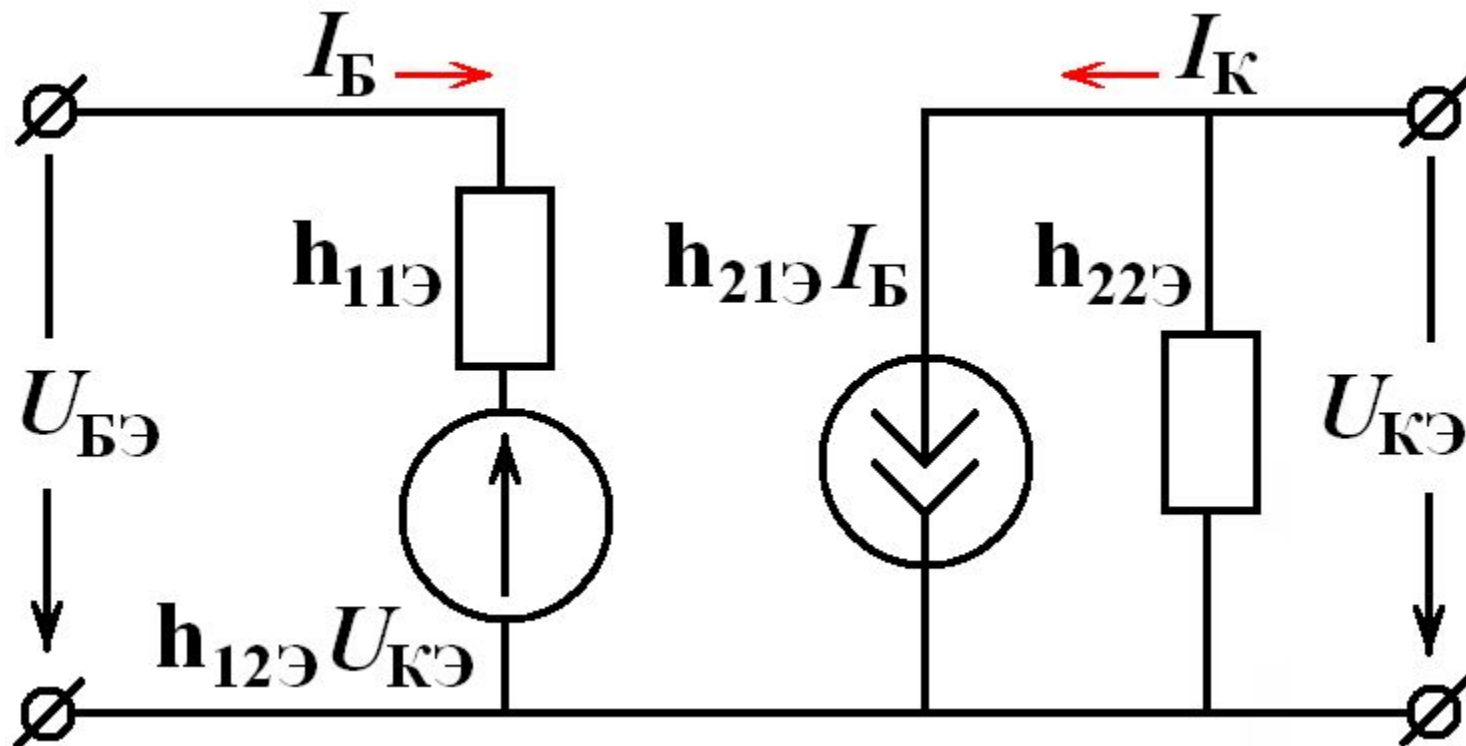
Режим с ОБ	Режим с ОЭ
$h_{11B} = r_{\vartheta} + r_{\bar{\delta}}(1 - \alpha)$	$h_{11\vartheta} = r_{\bar{\delta}} + r_{\vartheta}(1 + \beta)$
$h_{12B} = \frac{r_{\bar{\delta}}}{r_{\kappa} + r_{\bar{\delta}}} \cong \frac{r_{\bar{\delta}}}{r_{\kappa}}$	$h_{12\vartheta} = \frac{r_{\bar{\delta}}}{r_{\kappa}^*}$
$h_{21B} = -\frac{i_{\kappa}}{i_{\vartheta}} \Big _{u_{\kappa}=0} = -\alpha \frac{r_{\kappa}}{r_{\kappa} + r_{\bar{\delta}}} \cong -\alpha$	$h_{21\vartheta} = \beta$
$h_{22B} = \frac{i_{\kappa}}{u_{\kappa}} \Big _{i_{\vartheta}=0} = \frac{1}{r_{\kappa} + r_{\bar{\delta}}} \cong \frac{1}{r_{\kappa}}$	$h_{22\vartheta} \cong \frac{1}{r_{\kappa}^*}$

# Вывод

1. Физические Т-образные эквивалентные схемы транзистора представляют собой электротехнические цепи, состоящие из пассивных элементов и источников тока. К ней применимы все законы электротехники для анализа и синтеза цепей.
2. Наличие в эквивалентных схемах конденсаторов указывает на то, что характеристики транзистора являются *частотно-зависимыми*.
3. Во многих случаях сквозными токами коллектор-база и коллектора эмиттер можно пренебречь.
4. Недостаток эквивалентных схем заключается в том, что сопротивления ( $r$ -параметры) можно получить только теоретическим путем.

# Эквивалентная схема БТ с ОЭ система h-параметров

$$U_{mБЭ} = h_{11Э} I_{mБ} + h_{12Э} U_{mКЭ}$$
$$I_{mК} = h_{21Э} I_{mБ} + h_{22Э} U_{mКЭ}$$



## **h** параметры схемы с общим эмиттером

$$h_{11Э} = U_{БЭ}/I_{Б}, \text{ при } U_{КЭ} = \text{const:}$$

входное сопротивление транзистора переменному току при отсутствии выходного переменного напряжения.

$$h_{12Э} = U_{БЭ}/U_{КЭ}, \text{ при } I_{Б} = \text{const:}$$

коэффициент обратной связи по напряжению – доля выходного переменного напряжения передаваемая на вход транзистора вследствие обратной связи в нем.

$$h_{21Э} = I_{К}/I_{Б}, \text{ при } U_{КЭ} = \text{const:}$$

коэффициент усиления по току – усиление переменного тока транзистором при работе без нагрузки.

$$h_{22Э} = I_{К}/U_{КЭ}, \text{ при } I_{Б} = \text{const:}$$

выходная проводимость переменного тока между коллектором и эмиттером.

$$\text{Выходное сопротивление } R_{\text{ВЫХ}} = 1/h_{22Э}.$$

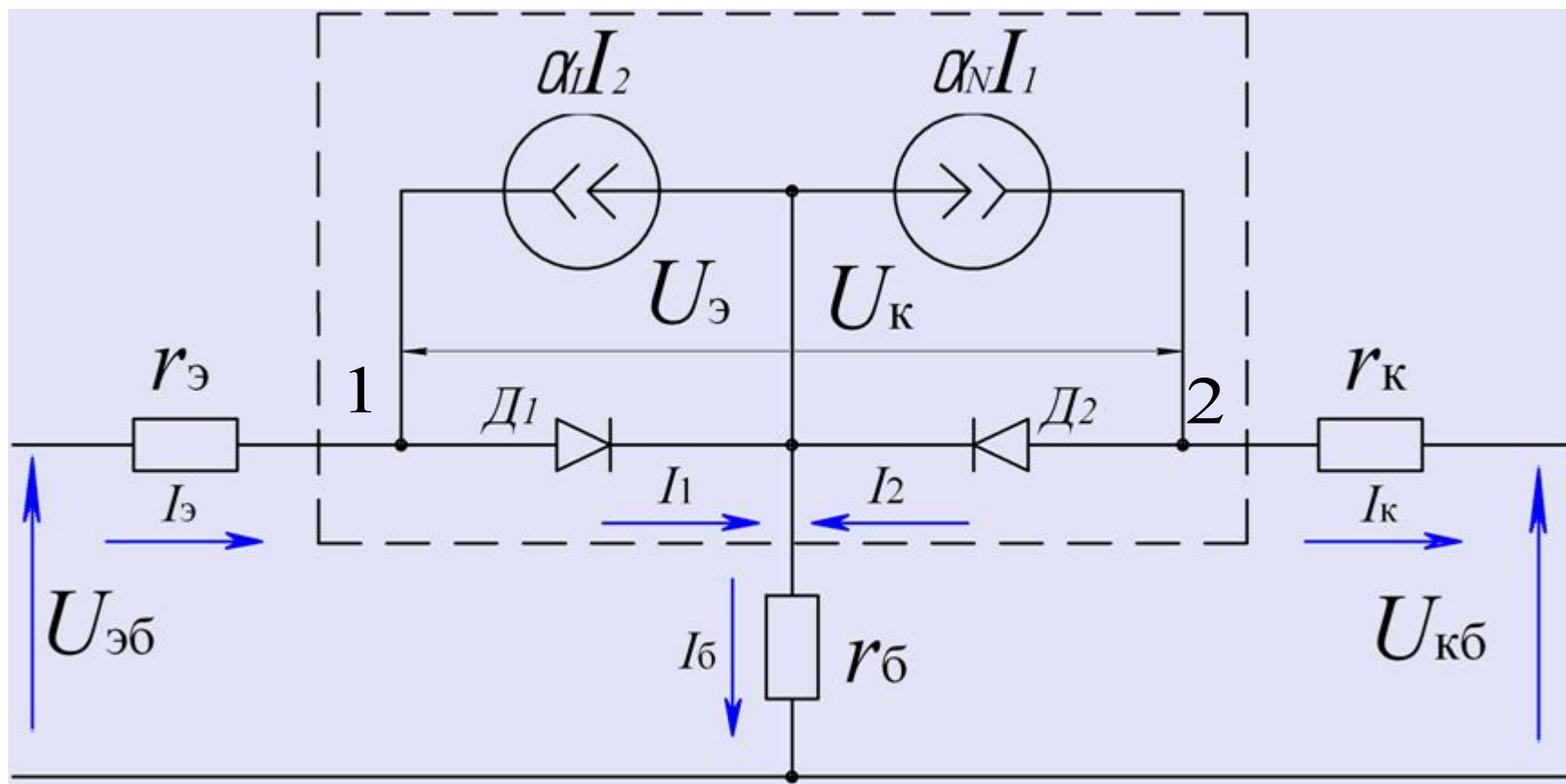
# Формулы Эберса-Молла

Основной моделью биполярного транзистора считается модель, справедливая для любых токов (как малых, так и больших) и предложенная Дж.Дж. Эберсом и Дж.Л. Моллом в 1954 г., и поэтому носящая их имя.

Эта модель построена на интерпретации работы транзистора как прибора на взаимодействующих *pn*-переходах *для произвольного сигнала*.



# Схема замещения Эберса-Молла (пример для *p-n-p* транзистора)



# Расчет модели Эберса-Молла

$$\begin{array}{l} \text{узел1} \\ I_1 = I_{\text{э}} + \alpha_I \cdot I_2 \\ I_{\text{э}} = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 \end{array} \quad (5.16) \quad \begin{array}{l} \text{узел2} \\ I_K + I_2 = \alpha_N \cdot I_1 \\ I_K = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 \end{array} \quad (5.17)$$

$$I_B = I_{\text{э}} - I_K = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 - \alpha_N \cdot I_1 + I_2 = I_1 \cdot (1 - \alpha_N) + I_2 \cdot (1 - \alpha_I)$$

$$\text{При } I_{\text{э}} = 0: I_2 = I'_{K0} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.18)$$

$$\text{При } I_K = 0: I_1 = I'_{\text{э}0} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{э}}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.19)$$

$$I_K = \alpha_N \cdot I'_{\text{э}0} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{э}}}{\phi_T} - 1 \right) - I'_{K0} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.20)$$

# Продолжение расчета

При  $U_K = 0$   $I_2 = 0$

$$I_{\text{Э}} = I_1 = I'_{\text{Э0}} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.21)$$

При  $U_{\text{Э}} = 0$   $I_1 = 0$

$$I_K = -I_2 = -I'_{K0} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.22)$$

$$0 = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 \Rightarrow I_2 = \alpha_N \cdot I_1 \Rightarrow I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha_I \cdot \alpha_N \cdot I_1 = I_1 \cdot (1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)$$

$$I_1 = \frac{I_{\text{Э}}}{(1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)} = I'_{\text{Э0}} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.23)$$

$$I_{\text{Э0}} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) = I'_{\text{Э0}} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{ЭБ}}}{\phi_T} - 1 \right) \cdot (1 - \alpha_I \cdot \alpha_N) \quad (5.24)$$

$$I'_{\text{Э0}} = \frac{I_{\text{Э0}}}{(1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)} \quad (5.25)$$

$$I'_{K0} = \frac{I_{K0}}{(1 - \alpha_I \cdot \alpha_N)} \quad (5.26)$$

# Окончательные формулы

$$I_{\text{Э}} = \frac{I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{\alpha_I \cdot I_{K0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.27)$$

$$I_K = \frac{\alpha_N \cdot I_{\text{Э}0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.28)$$

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = \frac{I_{\text{Э}0} \cdot (1 - \alpha_N)}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left( \exp \frac{U_{\text{Э}}}{\phi_T} - 1 \right) - \frac{I_{K0} \cdot (1 - \alpha_I)}{1 - \alpha_N \cdot \alpha_I} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{\phi_T} - 1 \right) \quad (5.29)$$

Где

$$\alpha_N = \frac{dI_K}{dI_{\text{Э}}} = \left( 1 + \frac{D_{n\text{Э}} \cdot n_{p0\text{Э}} \cdot L_{pБ}}{D_{pБ} \cdot p_{n0Б} \cdot L_{n\text{Э}}} \cdot th \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \cdot \left( ch \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \approx \left( 1 + \frac{D_{n\text{Э}} \cdot N_{dB}}{D_{pБ} \cdot N_{d\text{Э}}} \cdot \frac{W}{L_{n\text{Э}}} \right)^{-1} \quad (5.30)$$

$$\alpha_I = \frac{dI_{\text{Э}}}{dI_K} = \left( 1 + \frac{D_{nK} \cdot n_{p0K} \cdot L_{pБ}}{D_{pБ} \cdot p_{n0Б} \cdot L_{nK}} \cdot th \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \cdot \left( ch \frac{W}{L_{pБ}} \right)^{-1} \approx \left( 1 + \frac{D_{nK} \cdot N_{dB}}{D_p \cdot N_{dK}} \cdot \frac{W}{L_{nK}} \right)^{-1} \quad (5.31)$$

В *npn*-транзисторе:

$$\alpha_N = \left[ \left( 1 + \frac{D_{p\mathcal{E}} \cdot N_{a\mathcal{B}} \cdot L_{n\mathcal{B}}}{D_{n\mathcal{B}} \cdot N_{d\mathcal{E}} \cdot L_{p\mathcal{E}}} \operatorname{th} \frac{W}{L_{n\mathcal{B}}} \right) \cdot \operatorname{ch} \left( \frac{W}{L_{n\mathcal{B}}} \right) \right]^{-1} \approx \left( 1 + \frac{D_{p\mathcal{E}} N_{a\mathcal{B}}}{D_{n\mathcal{B}} N_{d\mathcal{E}}} \frac{W}{L_{p\mathcal{E}}} \right)^{-1}$$

$$\alpha_I = \left[ \left( 1 + \frac{D_{p\mathcal{K}} N_{a\mathcal{B}} L_{n\mathcal{B}}}{D_{n\mathcal{B}} N_{d\mathcal{K}} L_{p\mathcal{K}}} \operatorname{th} \frac{W}{L_{n\mathcal{B}}} \right) \cdot \operatorname{ch} \left( \frac{W}{L_{n\mathcal{B}}} \right) \right]^{-1} \approx \left( 1 + \frac{D_{p\mathcal{K}} N_{a\mathcal{B}}}{D_n N_{d\mathcal{K}}} \frac{W}{L_{p\mathcal{K}}} \right)^{-1}$$

# Статические характеристики биполярных транзисторов

Статический режим работы транзистора – режим работы при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

Статические характеристики связывают постоянные токи электродов с постоянными напряжениями на них- это графически выраженные зависимости напряжения и тока входной цепи и выходной цепи (вольтамперные характеристики ВАХ).

Их вид зависит от способа включения транзистора.

Статический коэффициент передачи тока базы :

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}; \quad I_{\text{Э}} = I_K + I_B;$$
$$I_B \ll I_{\text{Э}}, I_K.$$

статический коэффициент передачи  $I_{\text{Э}}$  или :  
статический коэффициент усиления по току

$$\alpha = \frac{I_K}{I_{\text{Э}}} = \frac{I_K}{I_K + I_B} = \frac{\frac{I_K}{I_B}}{\frac{I_K}{I_B} + 1} = \frac{\beta}{\beta + 1};$$

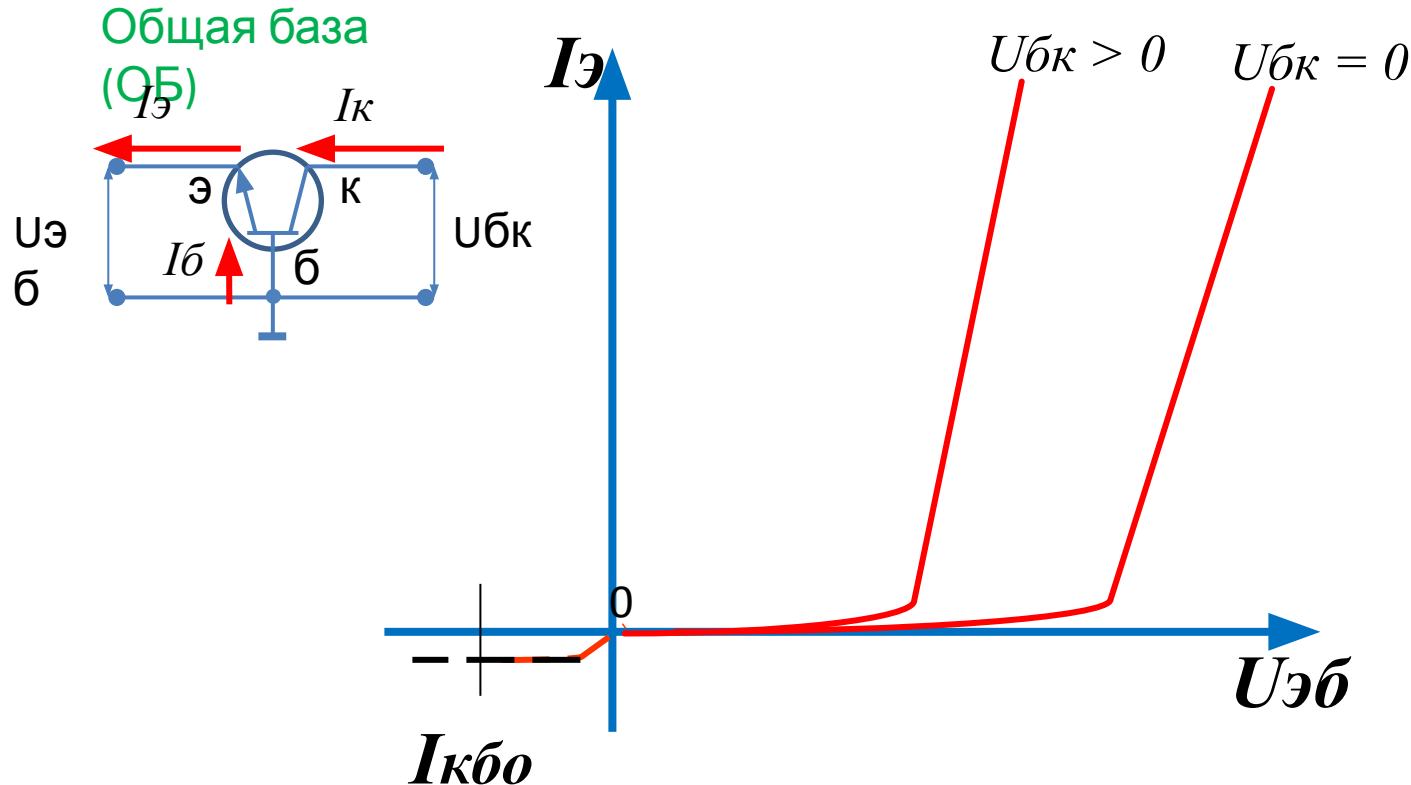
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

# Схема включения с общей базой Входная (эмиттерная) характеристика

$$I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}}, U_{\text{бк}}), (U_{\text{бк}} - \text{задаваемый параметр})$$

Переход ЭБ включен в прямом направлении (*прямая ветвь рп-перехода*).

$U_{\text{бк}}$ - определяет семейство характеристик  $I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}})$  при  $U_{\text{бк}} = \text{const}$ .





## Выходная (коллекторная) характеристика

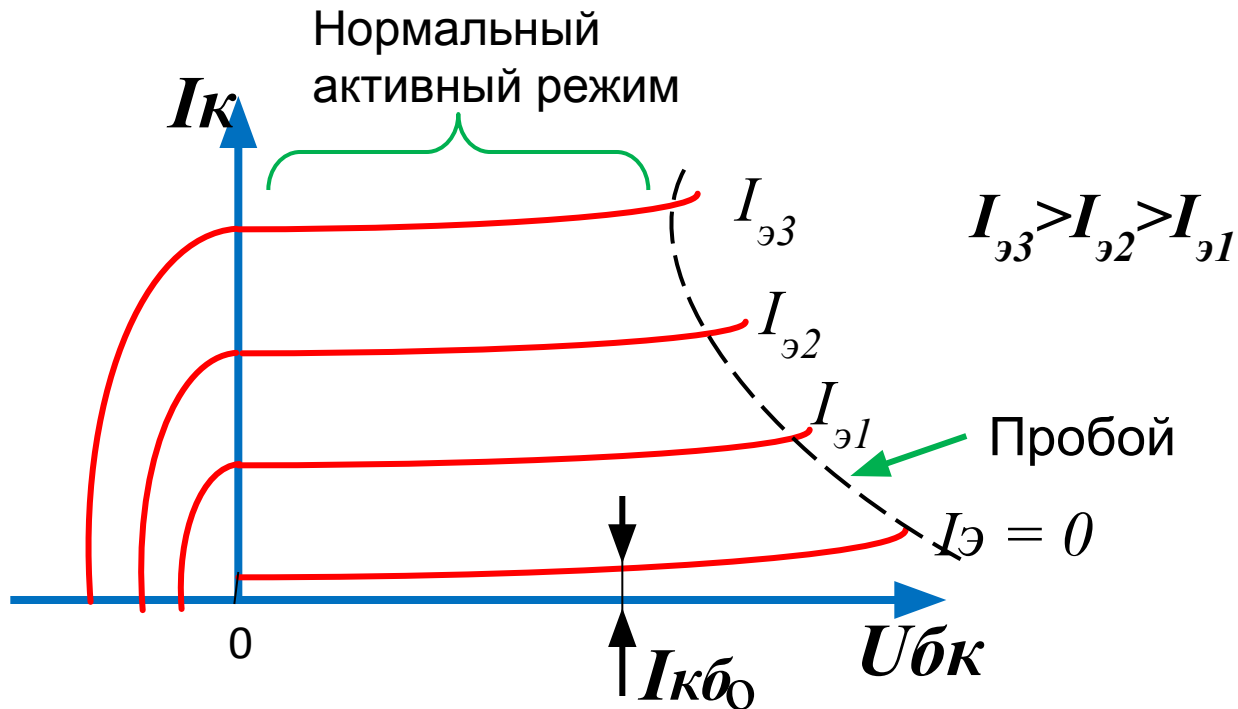
$$I_k = f(U_{бк}, I_{\text{э}}), (I_{\text{э}} - \text{задаваемый параметр})$$

Переход БК включен в обратном направлении (обратная ветвь рп-перехода).

$I_{\text{э}}$  - определяет семейство характеристик  $I_k = f(U_{бк})$  при  $I_{\text{э}} = \text{const}$ .

$$I_k = \alpha \cdot I_{\text{э}}, \alpha < 1$$

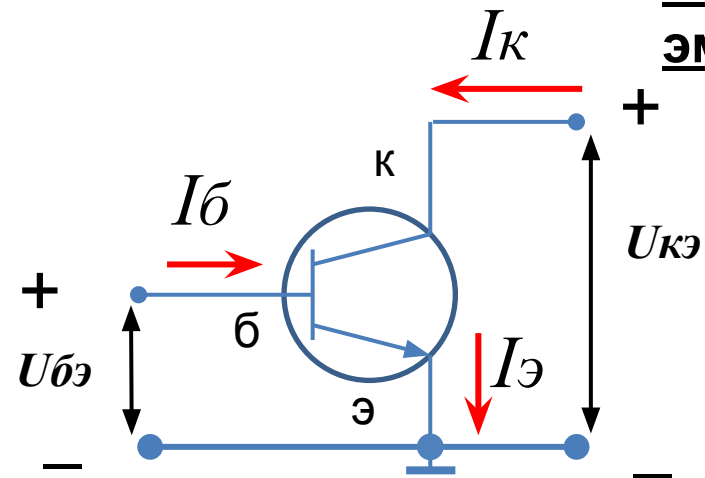
Наряду с этим



## Схема включения с общим

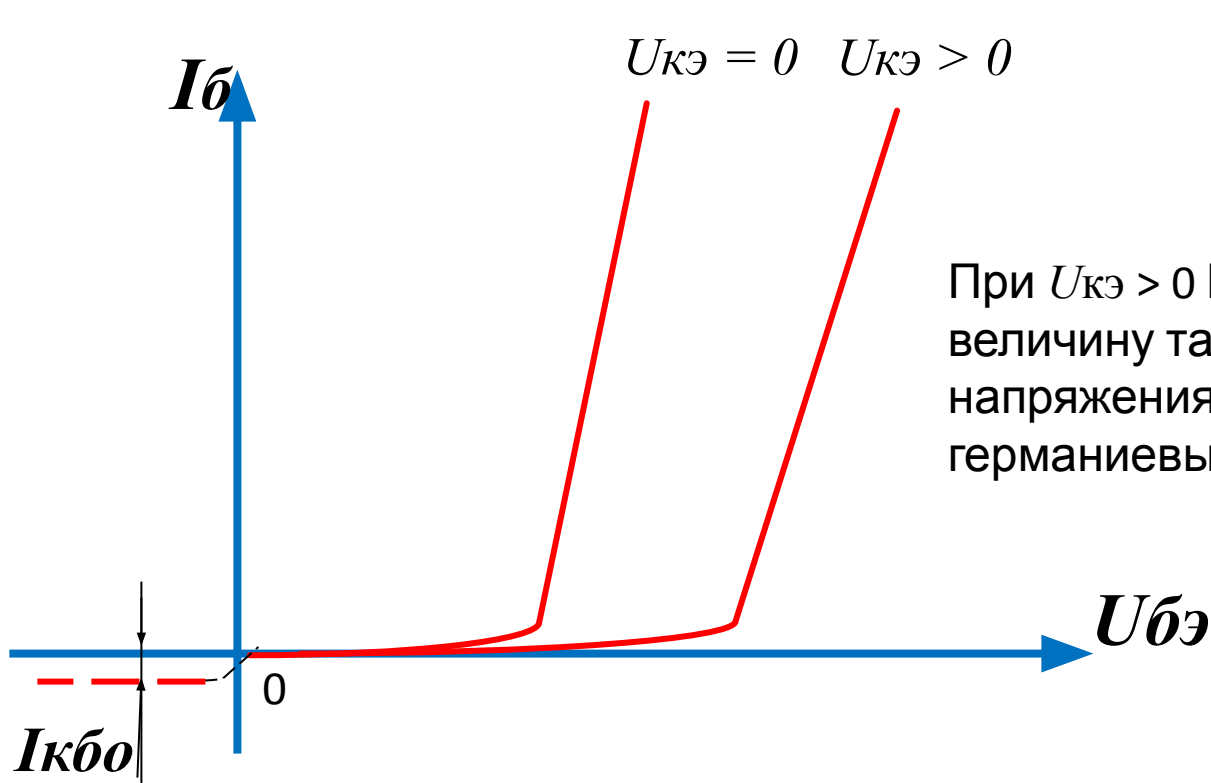
### ЭМИТТЕРОМ

Входная характеристика



$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}, U_{\text{кэ}}), U_{\text{кэ}} \text{ - параметр}$$

Переход БЭ включен в прямом направлении  
(прямая ветвь рп-перехода)



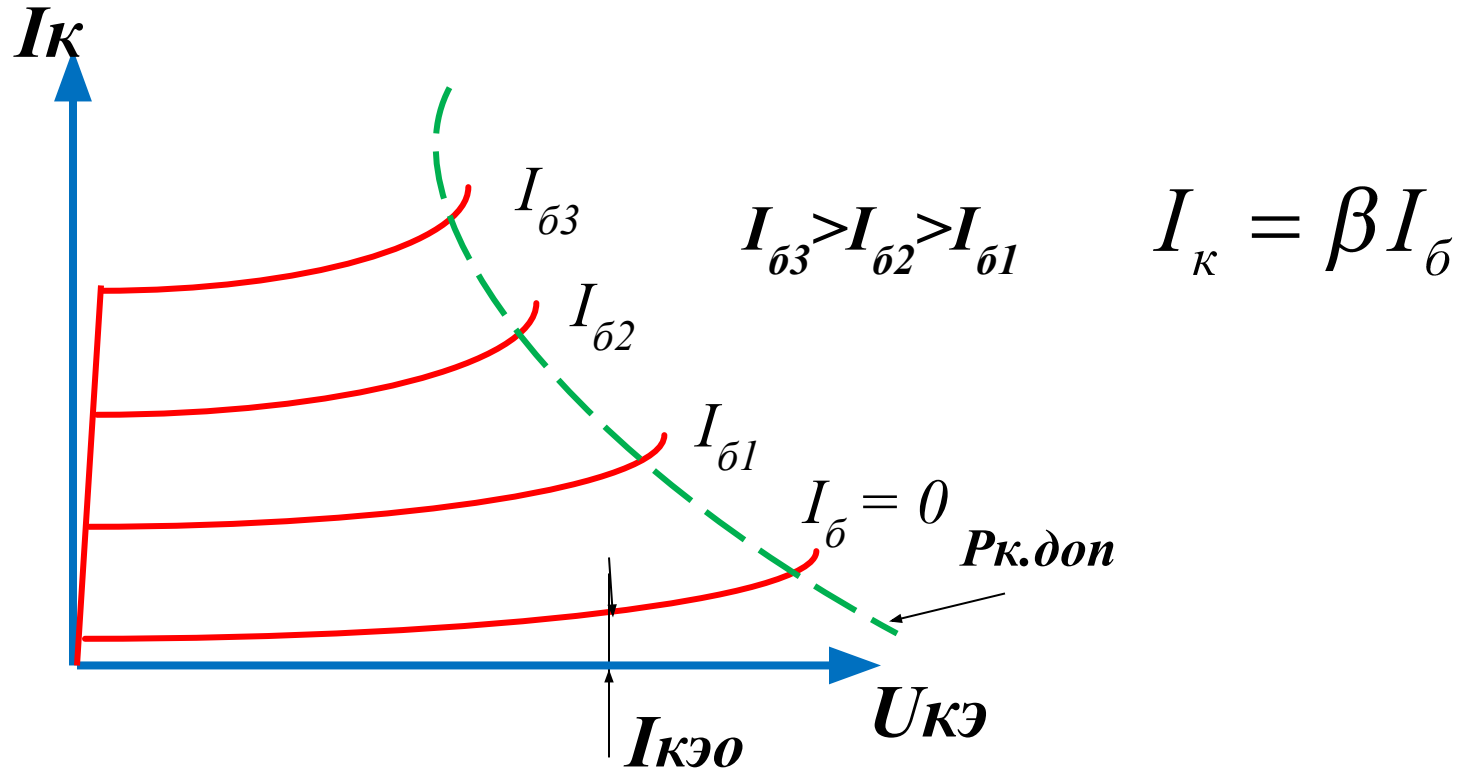
$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

$$I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}}$$

При  $U_{\text{кэ}} > 0$  ВАХ сдвигается вправо на величину так называемого порогового напряжения  $U_{\text{бэ.пор}}$ , различающегося у германиевых и кремниевых транзисторов

## Коллекторная характеристика

$$I_k = f(U_{кэ}, I_{\sigma}), (I_{\sigma} - \text{параметр})$$



Мощность рассеяния  $P_k = U_k I_k < P_k$ .

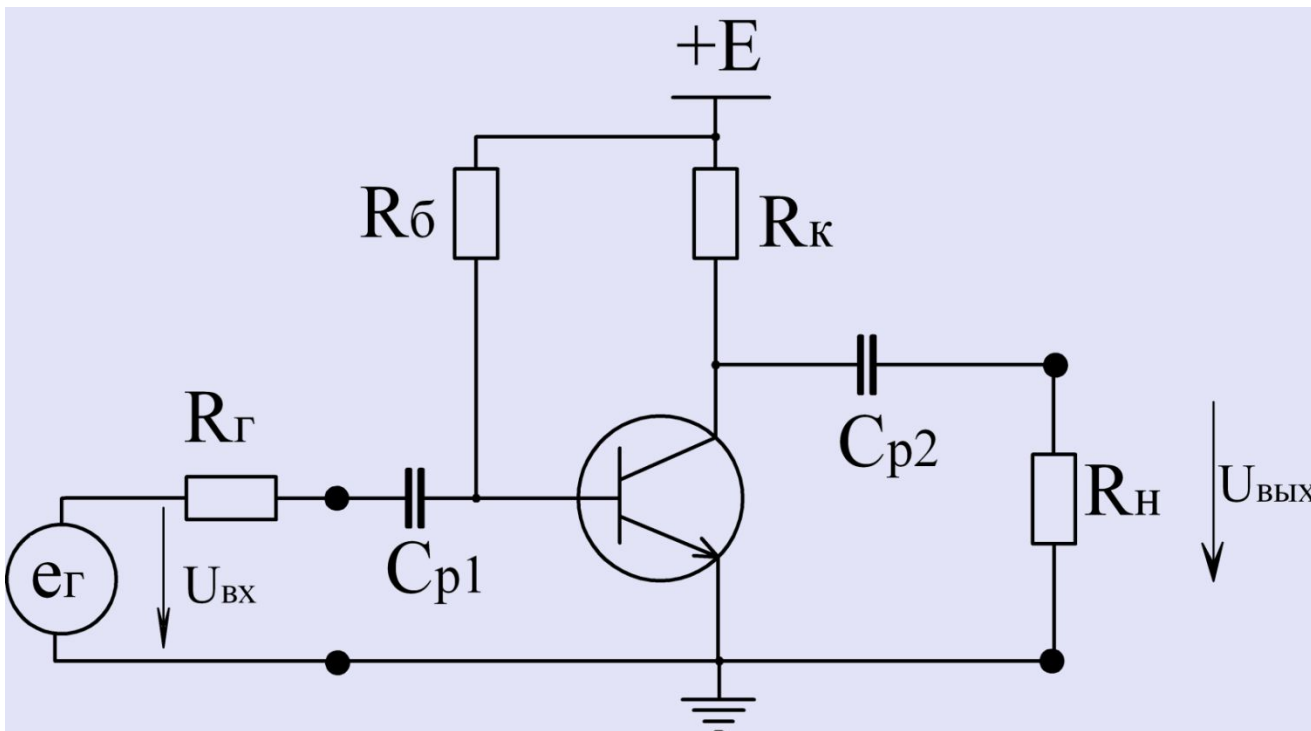
$P_{k.dop}$  – допустимая мощность рассеяния коллекторной цепи.

Эта мощность выделяется в виде тепла.

$I_{кэ0}$  - сквозной ток транзистора в схеме

ОЭ

# Простейший усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ

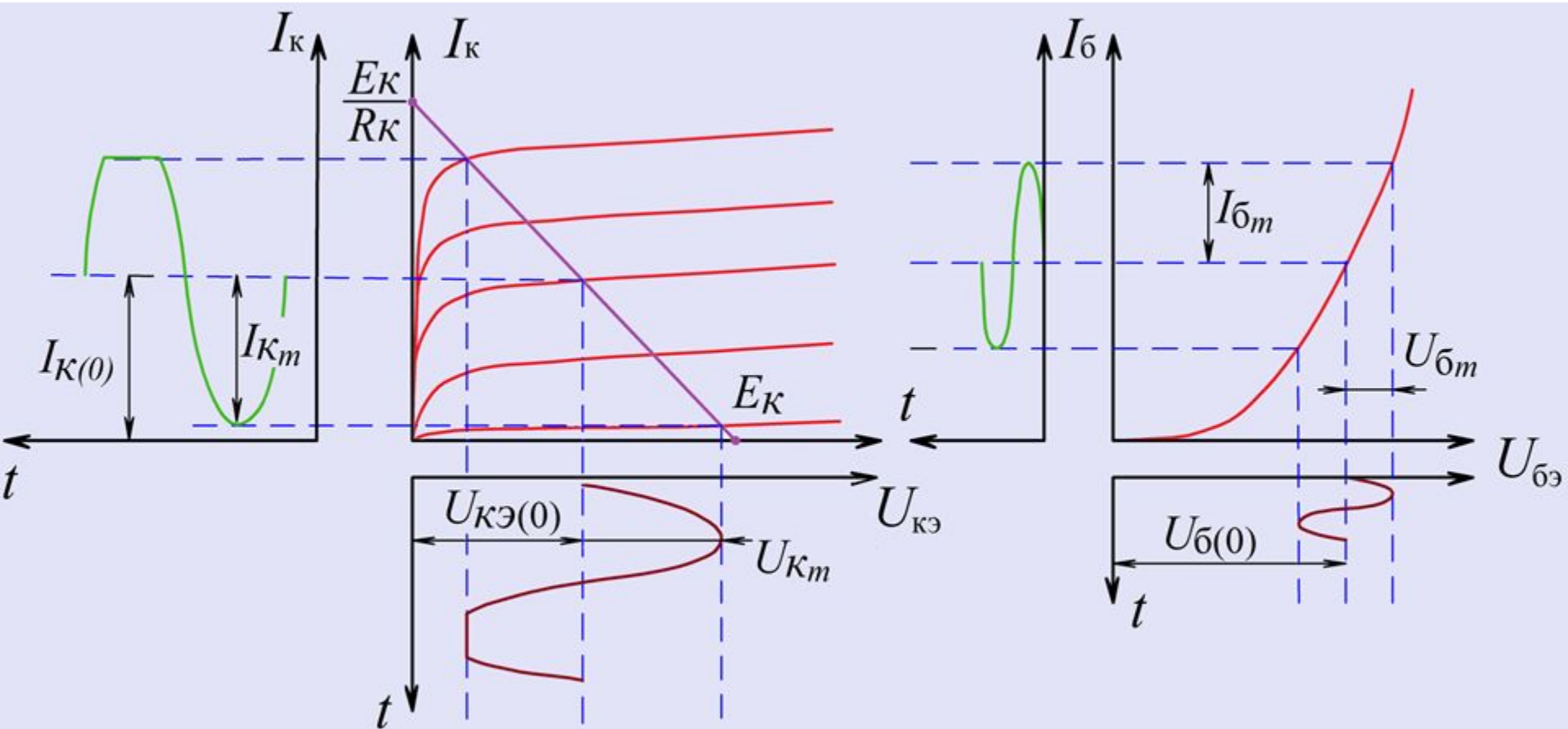


$$u_{\text{вых}} = R_H \cdot i_K$$

$$\Delta u_K = \frac{R_K \cdot r_{\text{вых}}}{R_K + r_{\text{вых}}} \cdot i_K$$

Схема с ОЭ поворачивает фазу на 180 градусов. Фаза выходного напряжения в схеме с ОБ по отношению к входному не меняется.

# Иллюстрация работы усилительного каскада с ОЭ



# Коэффициент усиления по току:

$$\beta = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} \quad \text{ил} \quad h_{21Э} \quad \text{(десятки-сотни).}$$

и

## Входное сопротивление:

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} \quad \text{ил} \quad h_{11Э} \quad \text{(сотни Ом – кОмы)}$$

и

## Выходное сопротивление:

$$R_{ВЫХ} = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВЫХ}} \quad \text{или} \quad \frac{1}{h_{22Э}} \quad \text{(десятки-сотни Ом).}$$

**Коэффициент усиления по напряжению:**

$$K_U = \frac{I_{ВЫХ} \cdot R_K}{I_{ВХ} \cdot R_{ВХ}} = h_{21Э} \cdot \frac{R_K}{h_{11Э}};$$

**Коэффициент усиления по мощности:**

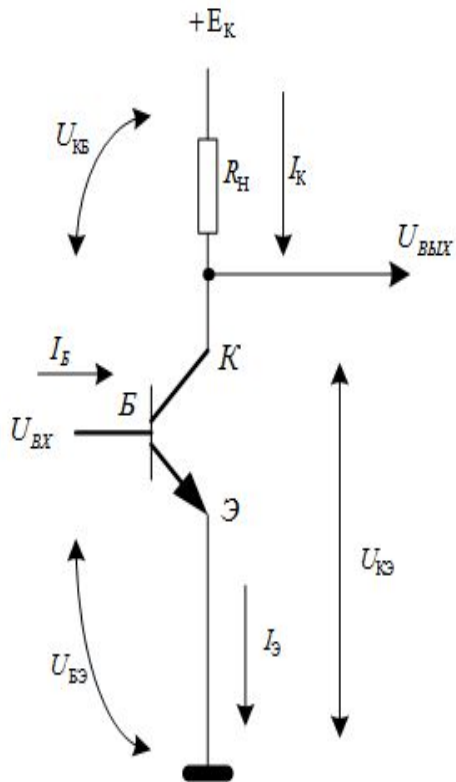
$$K_P = h_{21Э} \cdot K_U = h_{21Э}^2 \cdot \frac{R_K}{h_{11Э}};$$

**Коэффициент полезного действия:**

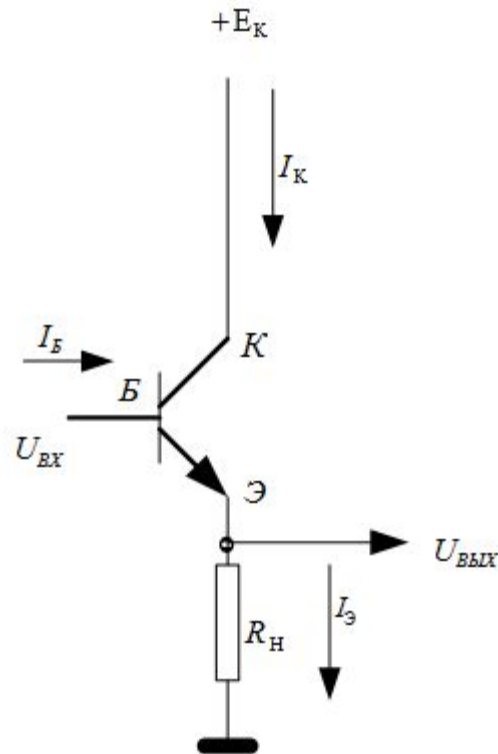
$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_K}; \quad \begin{aligned} P_{ВЫХ} &= U_K \cdot I_K; \\ P_K &= U_{КЭ0} \cdot I_{К0}. \end{aligned}$$

полная потребляемая мощность схемы

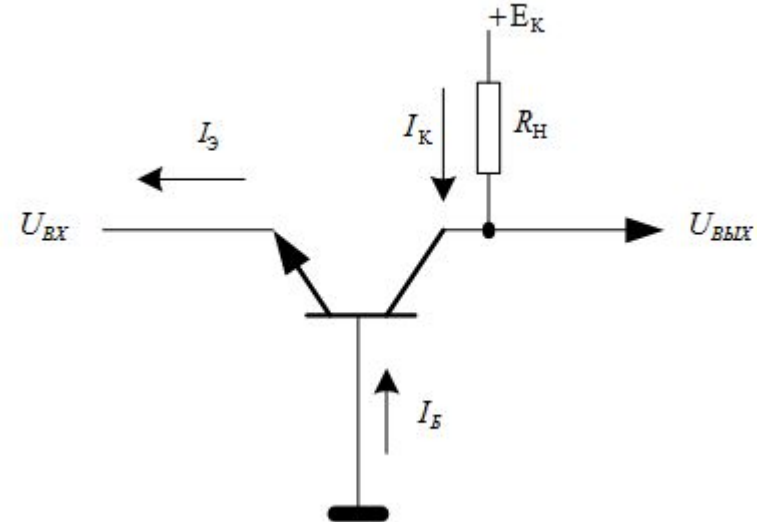
# Схемы включения биполярного транзистора



ОЭ

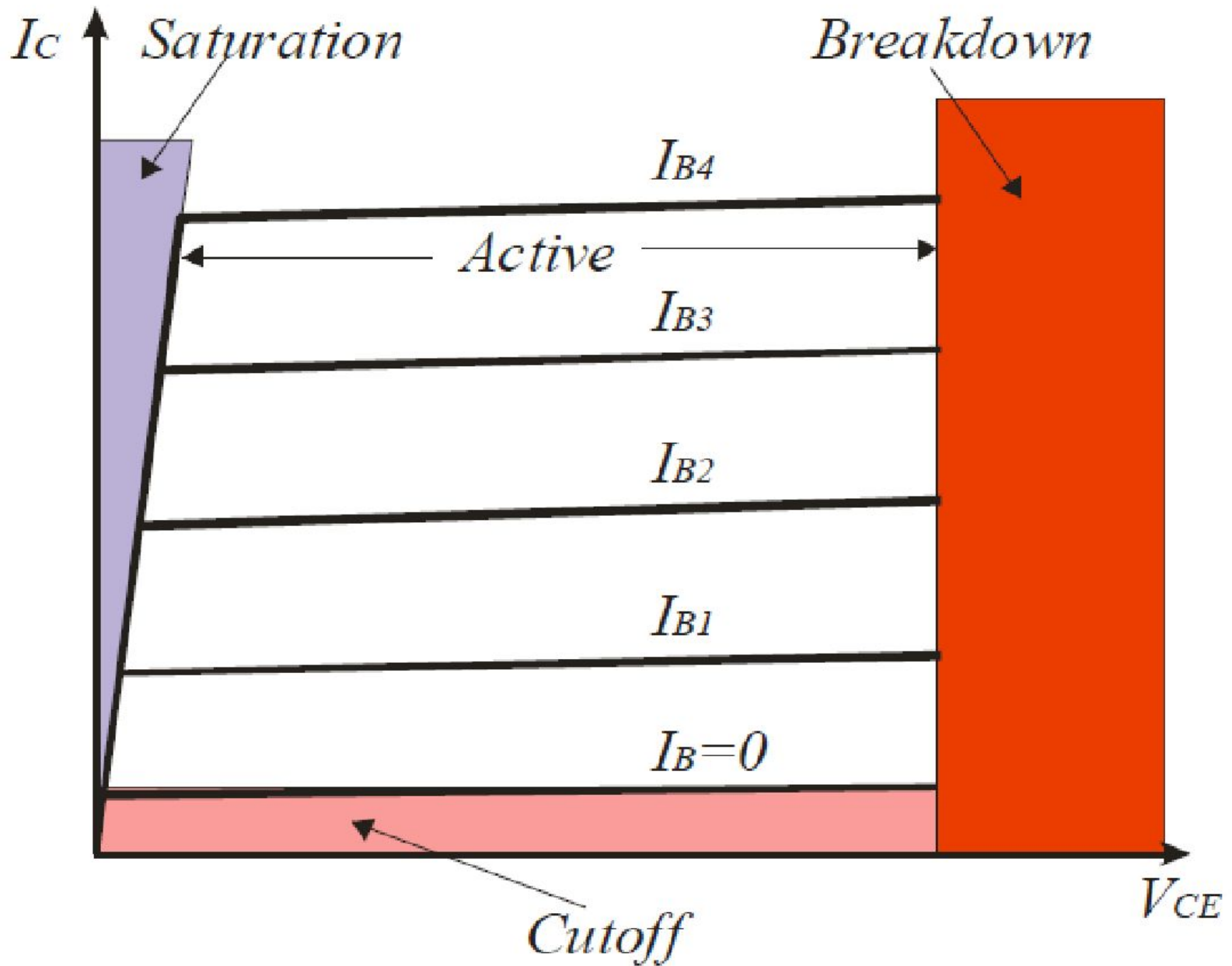


ОК

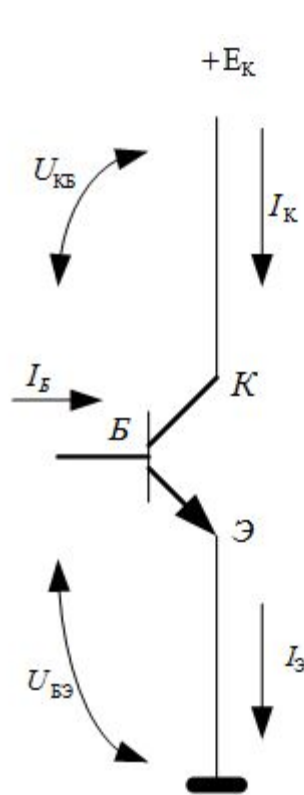


ОБ





## Основные соотношения токов и напряжений в схеме с общим эмиттером (режим покоя)



$$U_{КЭ} = U_{КБ} + U_{БЭ} \quad I_{Э} = I_{К} + I_{Б}$$

$$I_{К} = \beta \cdot I_{Б} \quad I_{Э} = \beta I_{Б} + I_{Б} = (1 + \beta) I_{Б}$$

$$\beta = \frac{I_{К}}{I_{Б}} - \text{Коэффициент передачи (усиления) тока базы}$$

$$\beta \gg 1, \quad I_{Э} \approx \beta I_{Б}$$

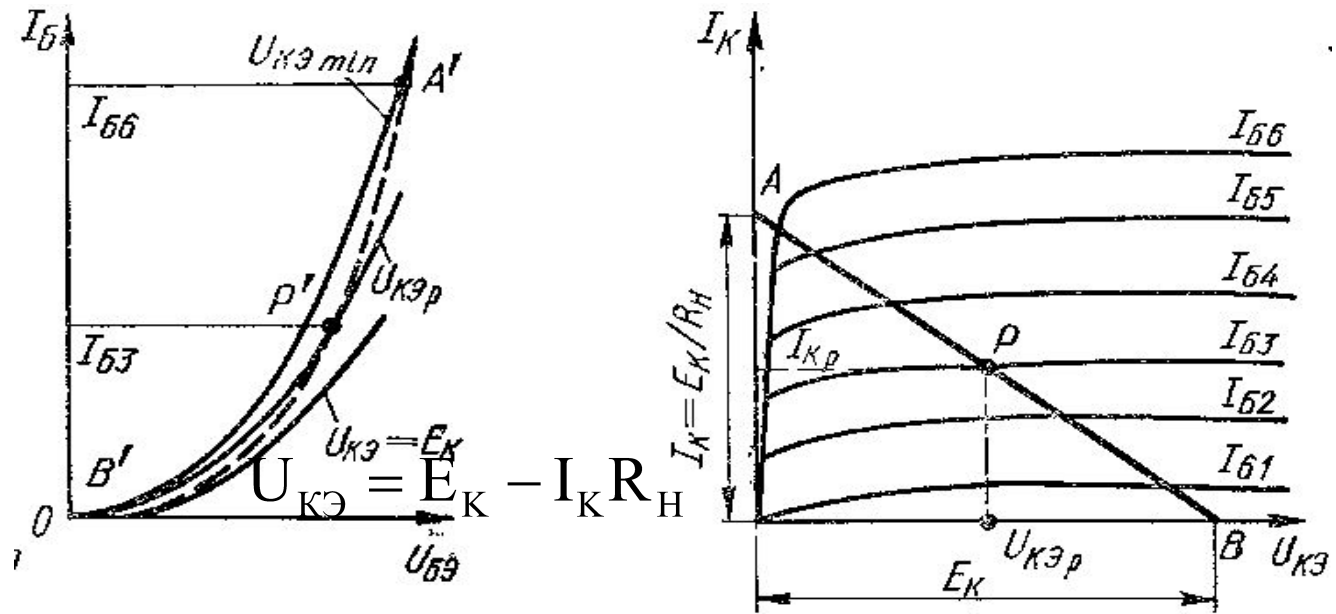
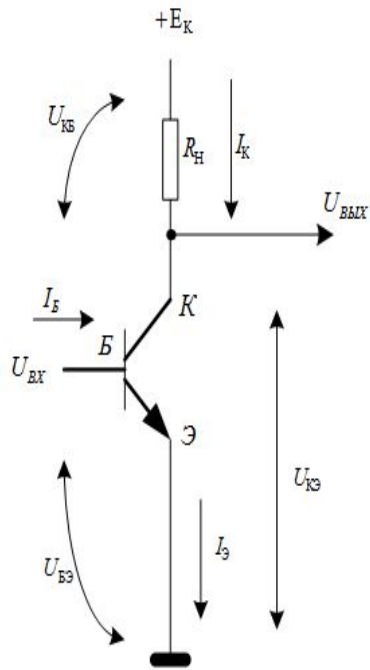
$$I_{К} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{Э} \quad \frac{\beta}{1 + \beta} = \alpha \leq 1 \quad I_{К} = \alpha I_{Э} \quad I_{К} \approx I_{Э}$$

$\alpha$  - Коэффициент передачи (усиления) тока эмиттера

$$U_{КЭ} = E_{К} - I_{К} R_{Н}$$

$$\beta \approx 100, \quad \alpha \approx 0,97 - 0,99$$

# Графо-аналитический метод выбора рабочей точки



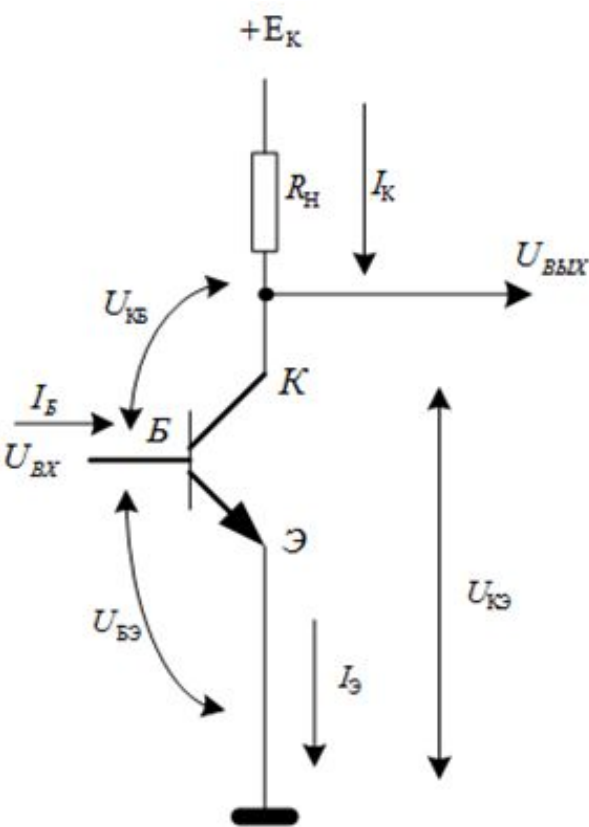
$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_H$$

1.  $I_K = 0$ ,  $U_{КЭ} = E_K$  – режим "отсечки"
2.  $U_{КЭ} = 0$ ,  $I_K = E_K / R_H$  – режим "насыщения"

Ток коллектора задается величиной сопротивления нагрузки (коллектора). Положение рабочей точки определяется током базы, который можно задать подачей смещения на базу .

# Схемы включения биполярных транзисторов.

## Схема с общим эмиттером



$r_{BX, OЭ}$  Входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ(приводится в паспорте)

**Коэффициент усиления по току (высокий)**

$$K_U = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{BX}} = \frac{I_K}{I_B} = \beta \gg 1$$

**Коэффициент усиления по напряжению (высокий)**

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}} = \frac{I_K R_K}{I_B R_{BX}} = \frac{\beta R_K}{r_{BX, OЭ}} \gg 1$$

**Входное сопротивление (высокое)**

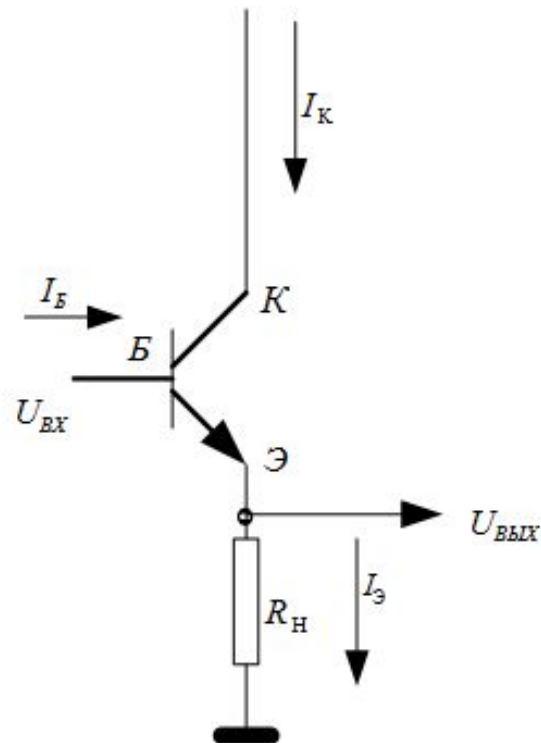
$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{I_B r_{BX, OЭ}}{I_B} = r_{BX, OЭ} \gg 1$$

**Выходное сопротивление (высокое)**

$$R_{ВЫХ} \approx R_K$$

## Схема с общим коллектором

+E<sub>к</sub>



**Коэффициент передачи по току (высокий)**

$$K_I = \frac{I_{\text{Э}}}{I_B} = \beta + 1 \quad I_{\text{Э}} = \beta I_B + I_B = (1 + \beta) I_B$$

**Коэффициент усиления по напряжению (низкий)**

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \approx 1$$

**Входное сопротивление (высокое)**

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_B r_{\text{ВХ,ОЭ}}}{I_B} = r_{\text{ВХ,ОЭ}} \gg 1$$

**Выходное сопротивление (низкое)**

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx R_{\text{Э}}$$

# Схема с общей базой

**Коэффициент передачи по току (низкий)**

$$K_I = \frac{I_K}{I_{\mathcal{E}}} = \alpha < 1$$

**Коэффициент усиления по напряжению (высокий)**

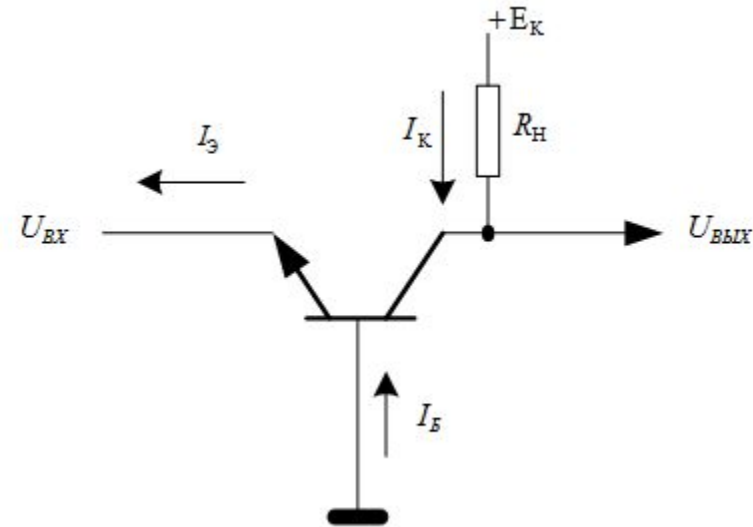
$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} > 1$$

**Входное сопротивление (низкое)**

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{I_{\mathcal{E}} r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{I_B} \approx \frac{I_K r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{I_B} \approx \frac{r_{ВХ, \mathcal{O}\mathcal{E}}}{\beta}$$

**Выходное сопротивление (высокое)**

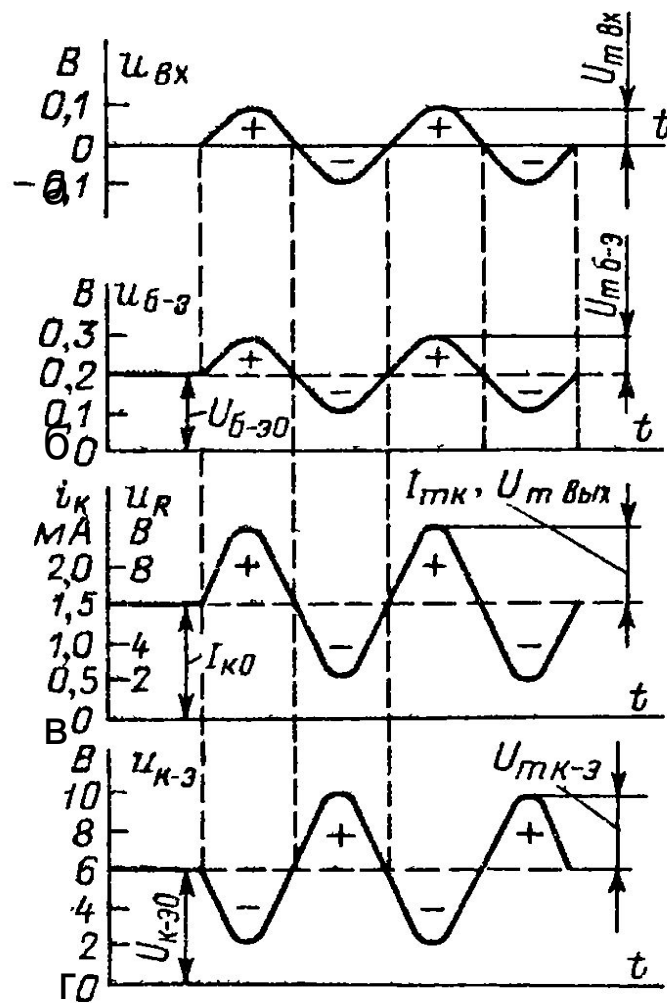
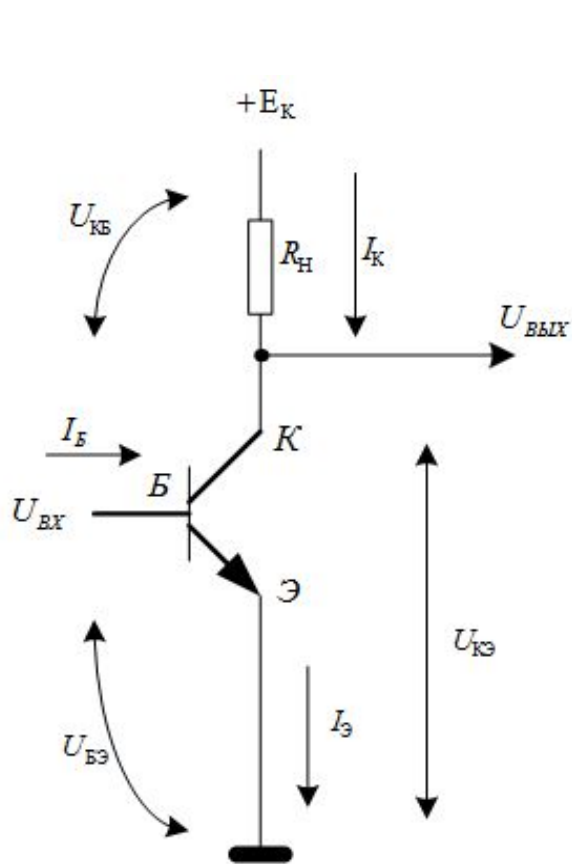
$$R_{ВЫХ} \approx R_K$$



## Сравнительные характеристики схем

Схема	Кэф. усиления по напряжению	Кэф. усиления по току	Входное сопр.	Выходное сопр.
ОЭ	Выс.	Выс.	Выс.	<b>Выс.</b>
ОБ	Выс.	<b>Низк.</b>	<b>Низк.</b>	<b>Выс.</b>
ОК	<b>Низк.</b>	Выс.	Выс.	Низк.

# Принцип усиления напряжения в схеме с ОЭ в динамическом режиме



$$U_{КЭ} = E_{К} - I_{К} R_{Н}$$

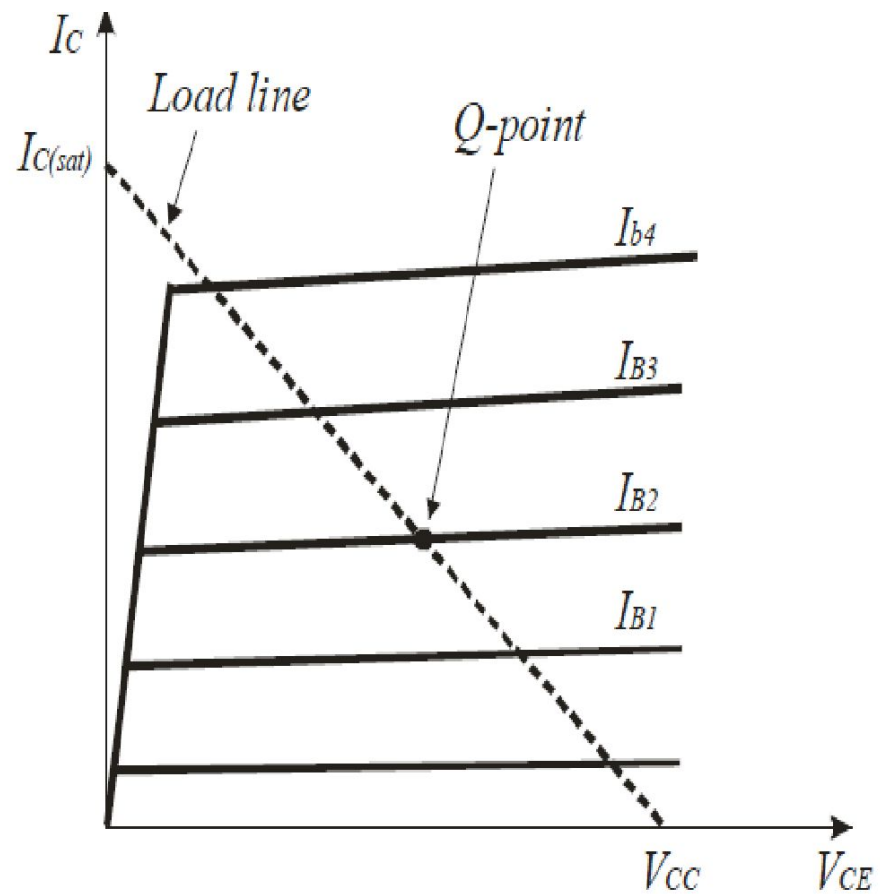
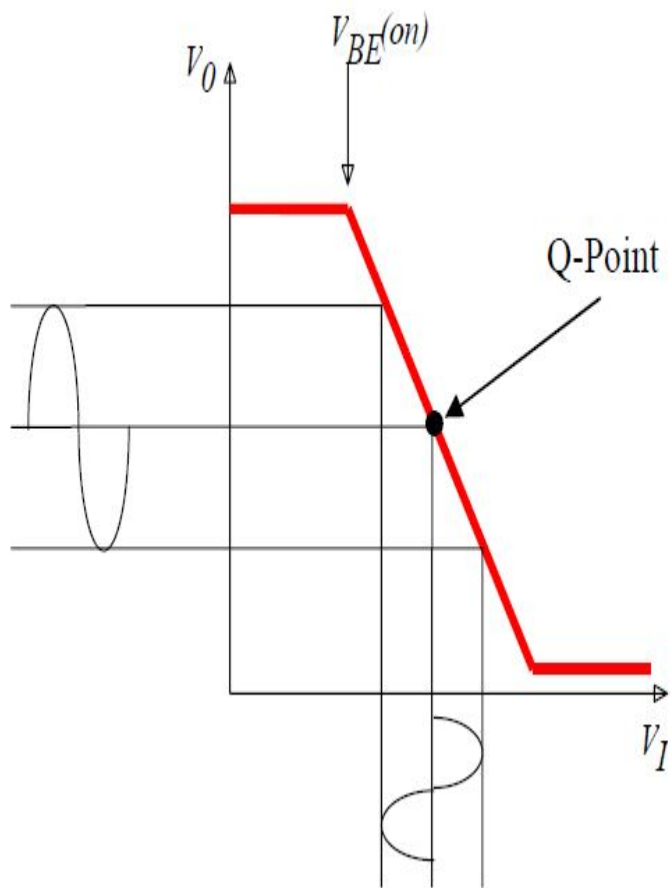
$$I_{К} R_{Н} \rightarrow \uparrow$$

$$U_{КЭ} \rightarrow \downarrow$$

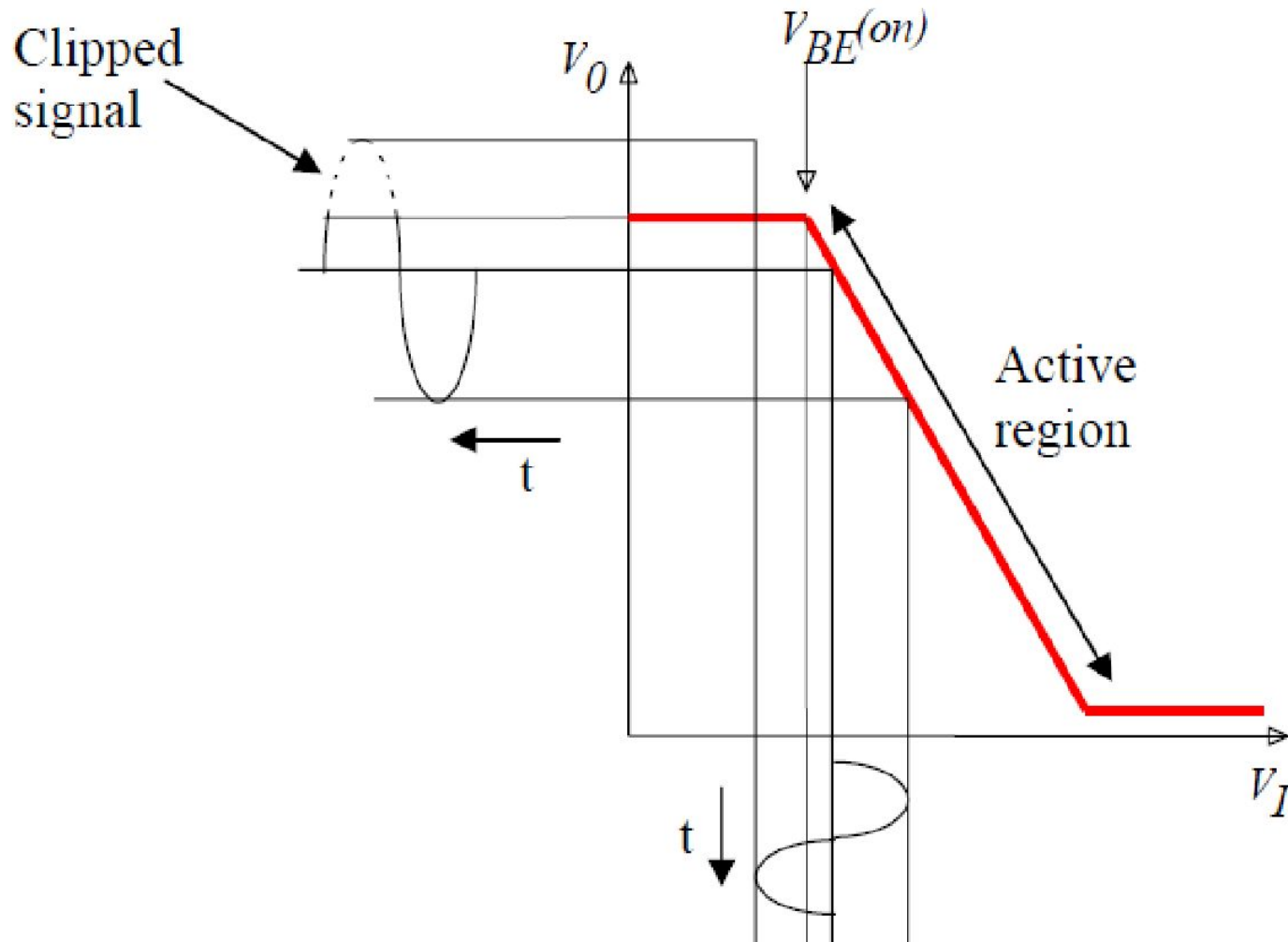
Работа транзистора с нагрузкой называется динамическим режимом  
Каскад с ОЭ инвертирует входной сигнал



# Режим линейного усиления

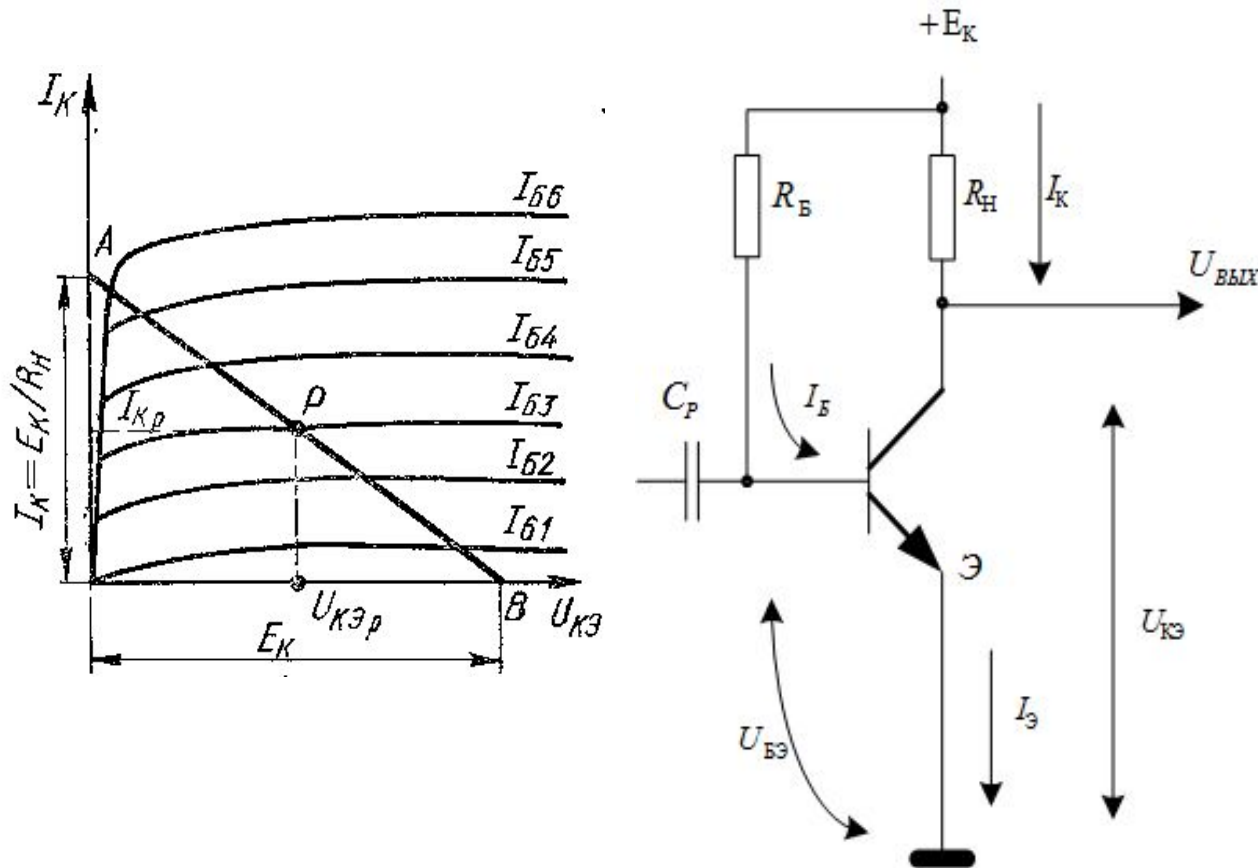


# Нелинейное усиление



## Схема смещения фиксированным током базы

С помощью дополнительного резистора в цепи базы задается ток смещения базы и фиксируется рабочая точка



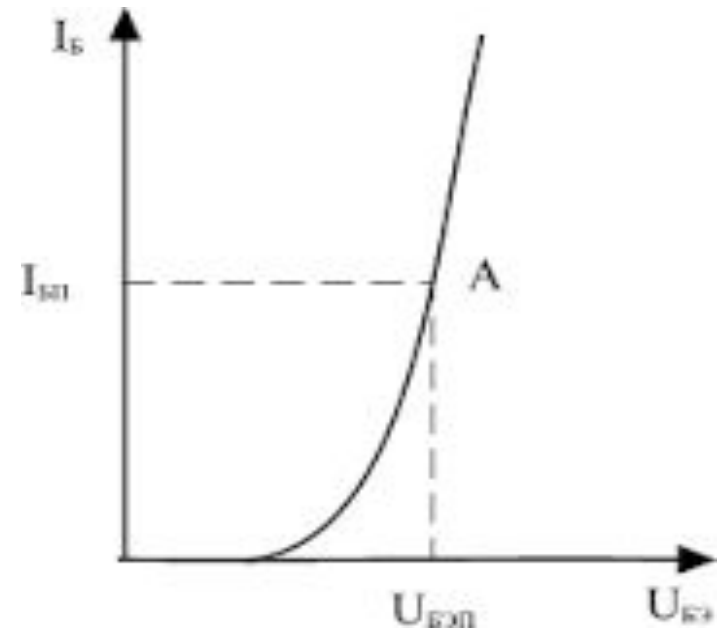
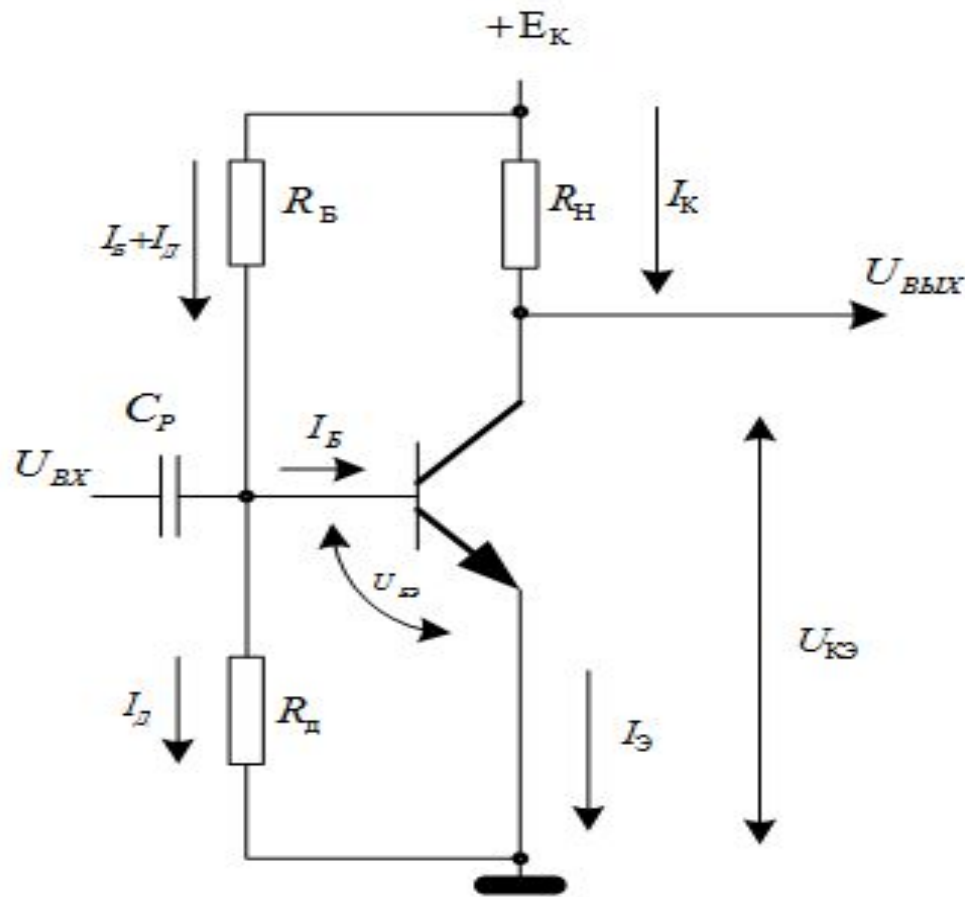
$$R_B = \frac{E_{KЭ} - U}{I_B} =$$

$$= \frac{E_K - 0,7}{I_B}$$

$$I_B \approx \frac{E_K}{R_B}$$

Таким образом, ток базы определяется фиксированными величинами напряжения источника питания и сопротивления резистора  $R_B$

# Схема смещения фиксированным напряжением база-эмиттер



$$I_D = (2 - 5)I_B$$

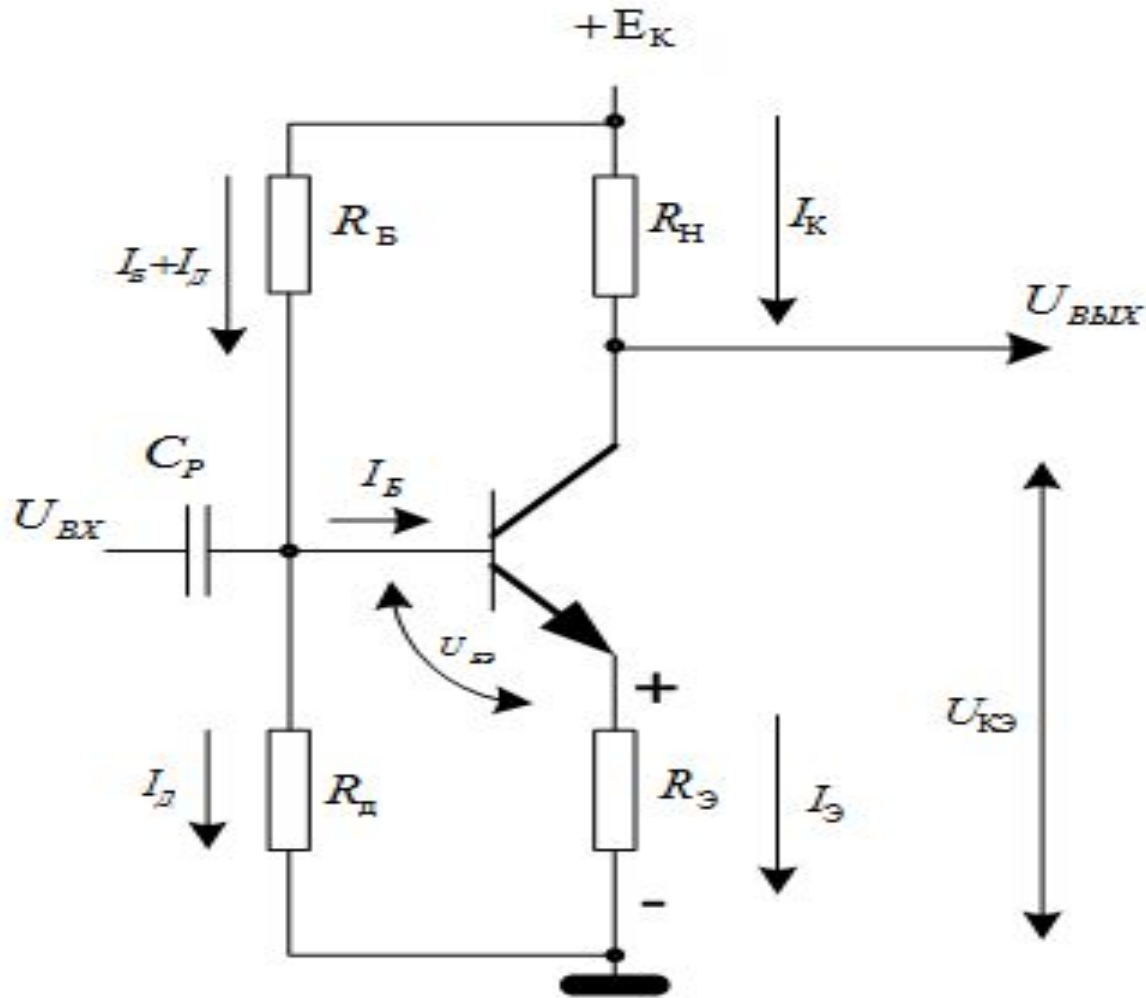
$$R_D = \frac{U_B}{I_D}$$

$$R_B = \frac{E_K - U_B}{I_B + I_D}$$

$$U_B = \frac{R_D}{R_B + R_D} E_K$$

## Стабилизация рабочей точки в схеме с ОЭ

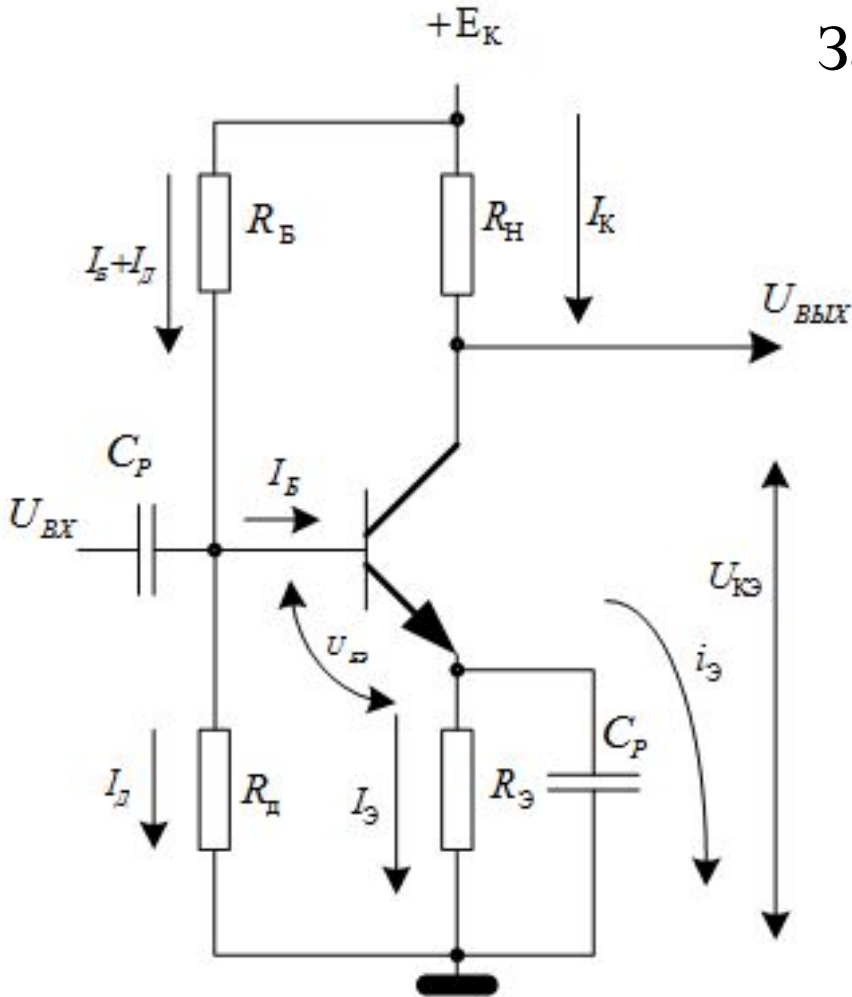
$$I_K \approx I_{\mathcal{E}}$$



$t^0(E_K) \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_{\mathcal{E}} \uparrow \rightarrow +U_{R_{\mathcal{E}}} \uparrow \rightarrow U_{B\mathcal{E}} \downarrow \rightarrow \text{транзистор запирается} \rightarrow I_{\mathcal{E}} \downarrow$

# Стабилизация рабочей точки в схеме с ОЭ

Задаются токи покоя  $I_K$   $I$



$$I_D = (2 - 5)I_B \quad I_K \approx I_E$$

$$R_B = \frac{E_K - (U_{BE} + I_E R_E)}{I_B + I_D}$$

$$R_D = \frac{U_{BE} + I_E R_E}{I_D}$$

$$R_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{(0,12 \dots 0,2)E_K}{I_E}$$

$$C_E \geq \frac{1}{2\pi f_H R_{BX_{OЭ}}}$$

$$R_K = \frac{E_K - U_{КЭ}}{I_K}$$

# Параметры каскада

## Входное сопротивление

$$R_{BXB} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{I_B r_{BX, O\Theta} + I_{\Theta} R_{\Theta}}{I_B} = \frac{I_B r_{BX, O\Theta} + (I_B + I_K) R_{\Theta}}{I_B} =$$

$$U_{BЫIX} = \frac{I_B [r_{BX, O\Theta} + (\beta + 1) R_{\Theta}]}{I_B} \approx r_{BX, O\Theta} + \beta R_{\Theta}$$

$$R_{K} \approx \beta R_{\Theta}, r_{\Theta} \gg r_{BX, O\Theta}$$

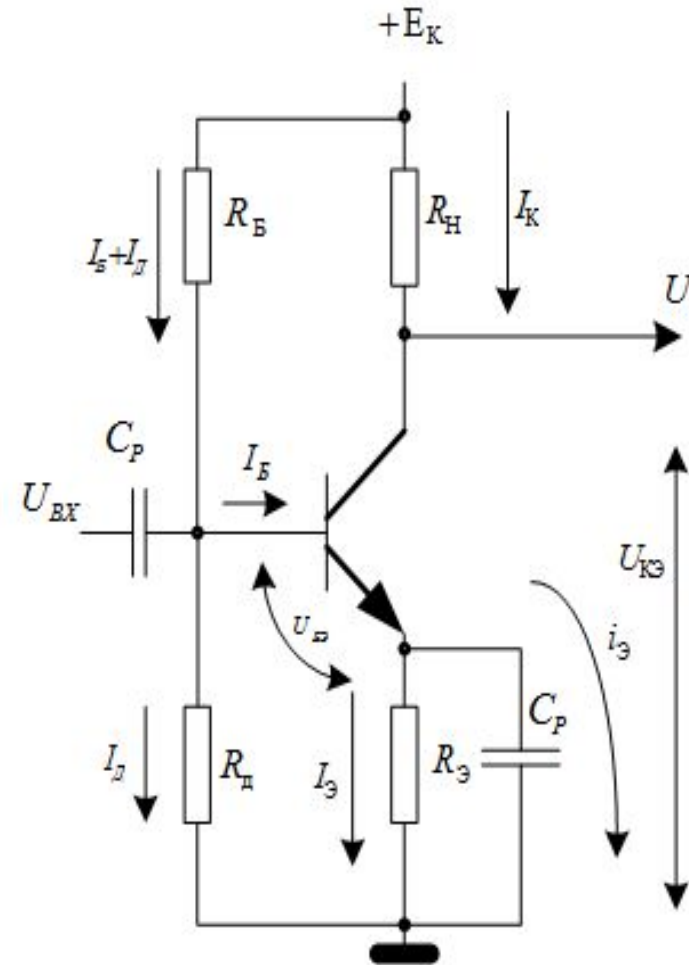
$$R_{BX} = \frac{R_B R_D}{R_B + R_D} \beta R_{\Theta},$$

## Коэффициент усиления

$$K_U = \frac{U_{BЫIX}}{U_{BX}} = \frac{I_K R_K}{I_B R_{BX}} = \frac{\beta R_K}{r_{BX, O\Theta} + (\beta + 1) R_{\Theta}} \approx \frac{R_K}{R_{\Theta}}$$

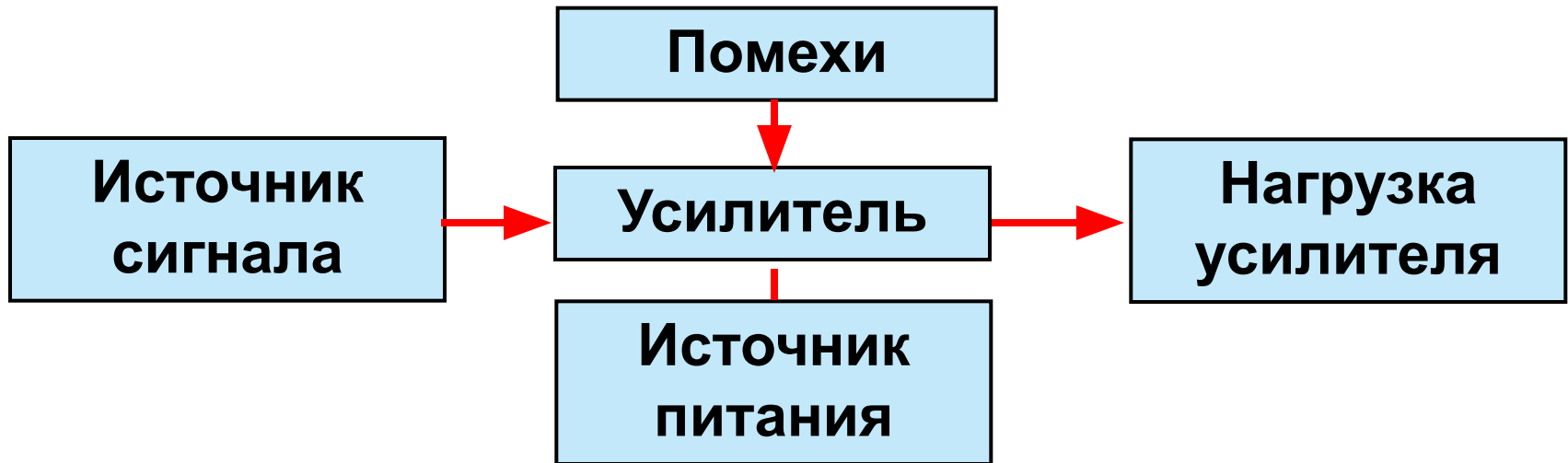
## Выходное сопротивление

$$R_{BЫIX} \approx R_K$$



# Транзисторный усилитель

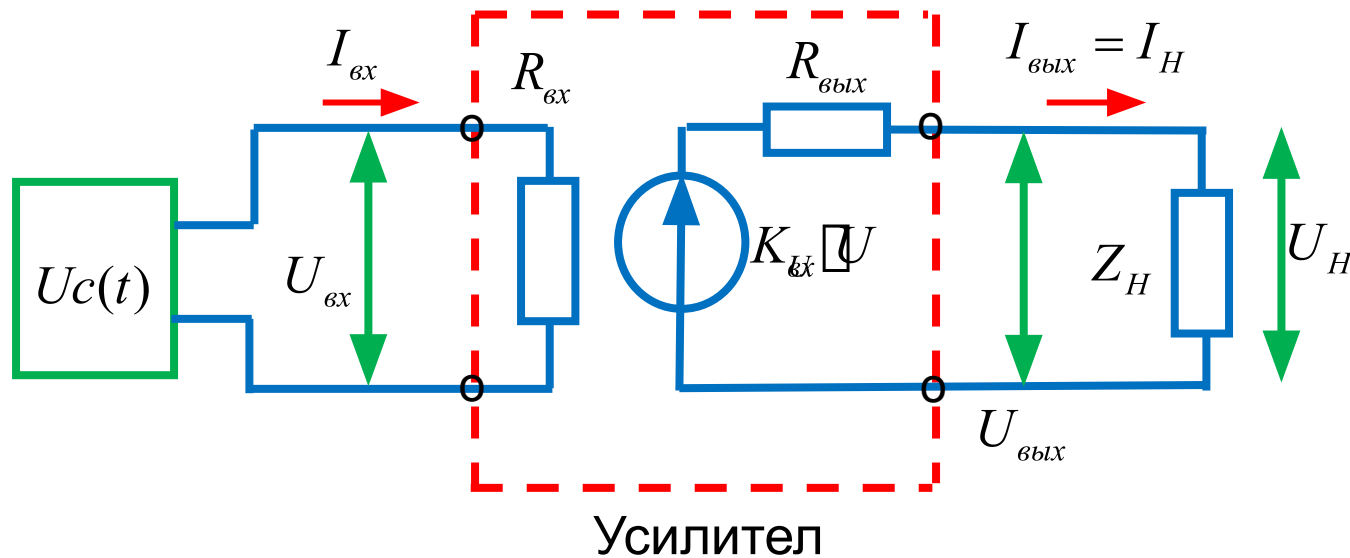
## Общая структурная схема усилителя



- **Источник сигнала** – например, микрофон,
- **Нагрузка усилителя** – например, динамики
- **Источник питания** – батарея, аккумулятор
- **Помехи** – воздействие температуры, ЭМ-наводки



# Общая структурная схема усилителя



**Требования к усилителю:** процесс усиления должен быть непрерывным, линейным, однозначным.

## Параметры усилителя

Коэффициенты усиления:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad \text{- по напряжению}$$

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad \text{- по току}$$

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = K_U \cdot K_I \quad \text{- по мощности}$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$$

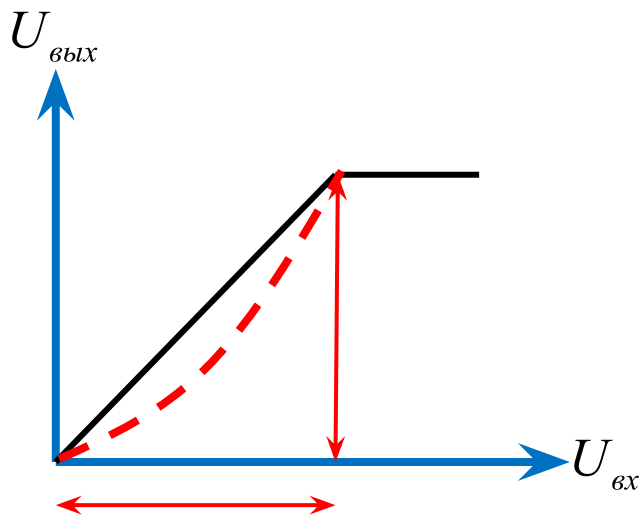
$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}}$$

Частотный коэфф.

$$K(j\omega) = |K(j\omega)| e^{i\varphi}$$

$$K[\text{дБ}] = 20 \lg \left( \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right)$$

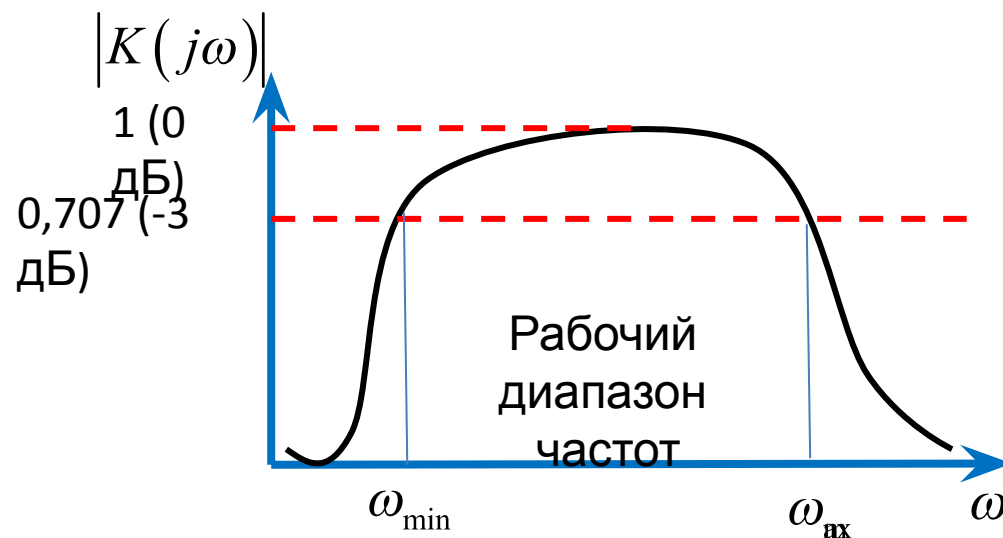
## Амплитудная характеристика



Линейная  
(рабочая)  
область усилителя

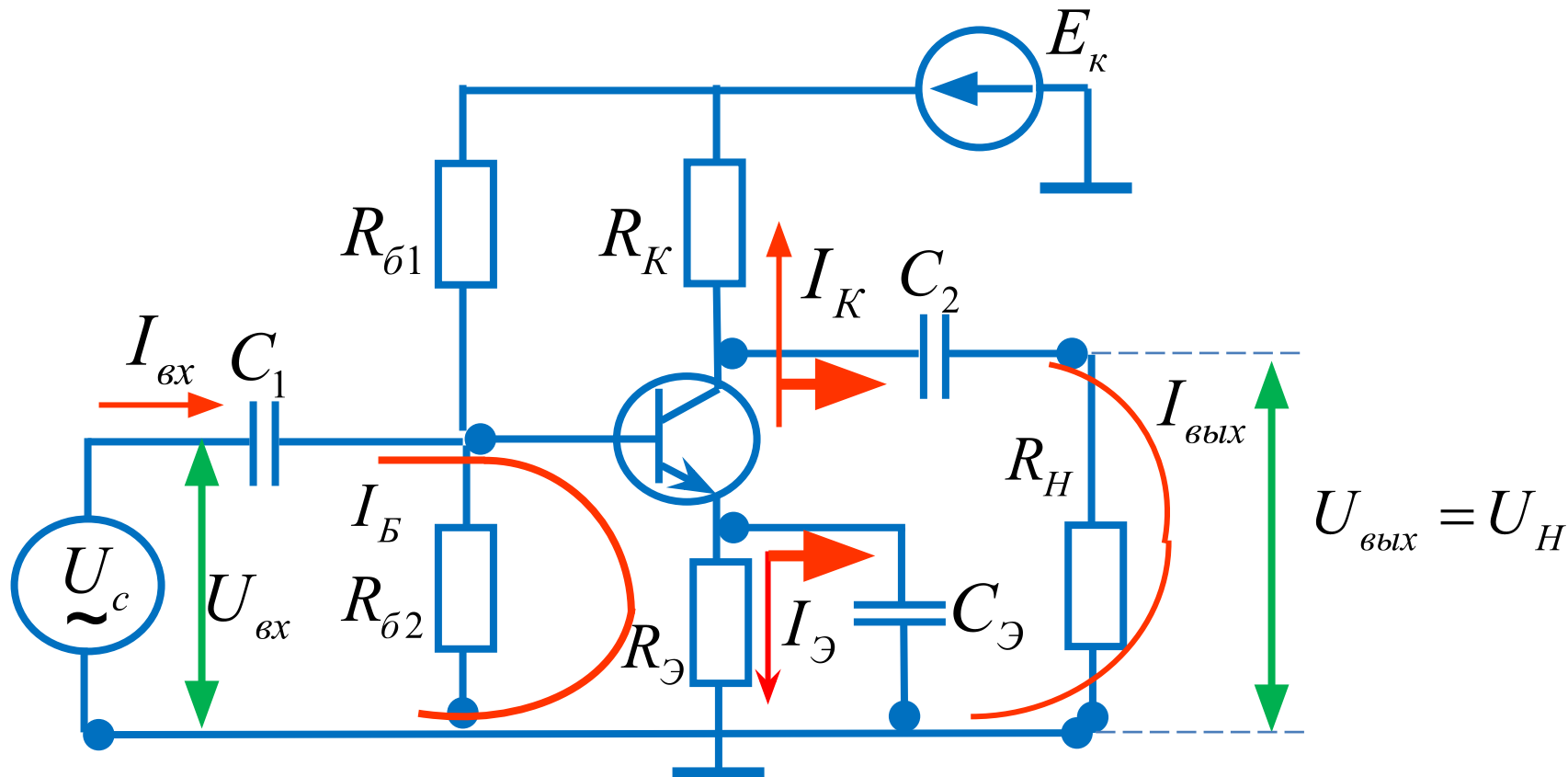
Характерные параметры  
усилителей  
Максимальные частоты до 100  
ГГц  
Выходная мощность до 100 Вт  
К.п.д. 80-95%

## Частотный коэффициент усиления



Рабочий  
диапазон  
частот

## Принципиальная схема усилителя с ОЭ



Расчет усилителя производится в 2  
этапа

1. Расчет по постоянному току (напряжениям)- статический режим.
2. Расчет по переменным токам и напряжениям- динамический режим.

# 1. Расчет по постоянному току (напряжениям)- статический режим.

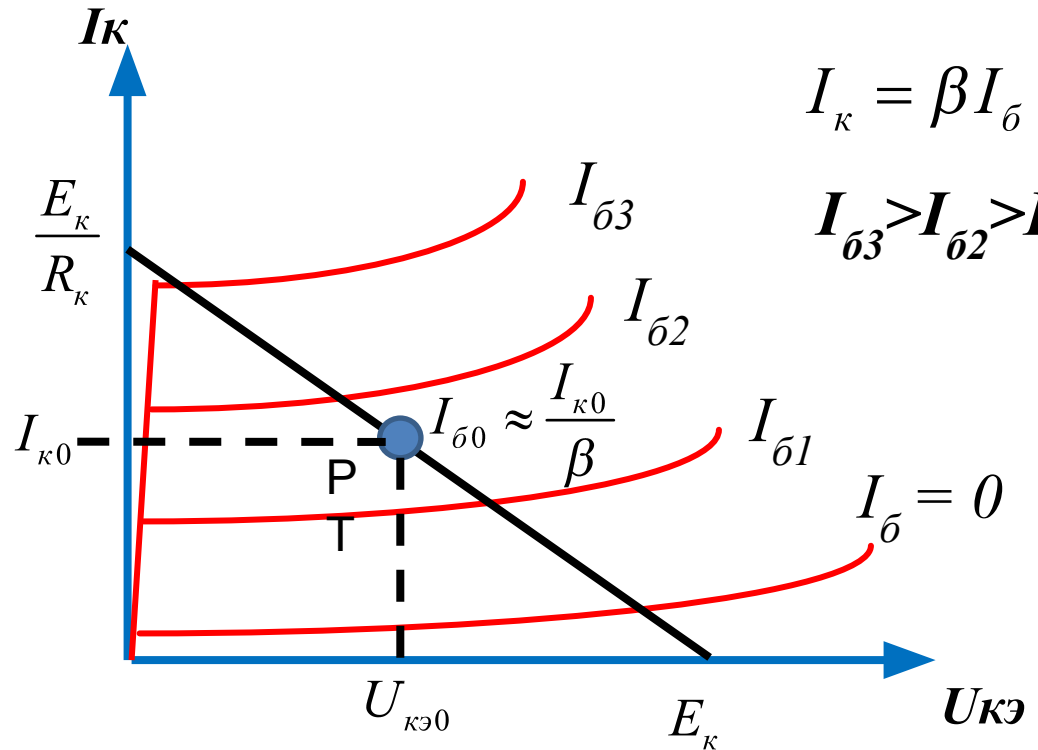
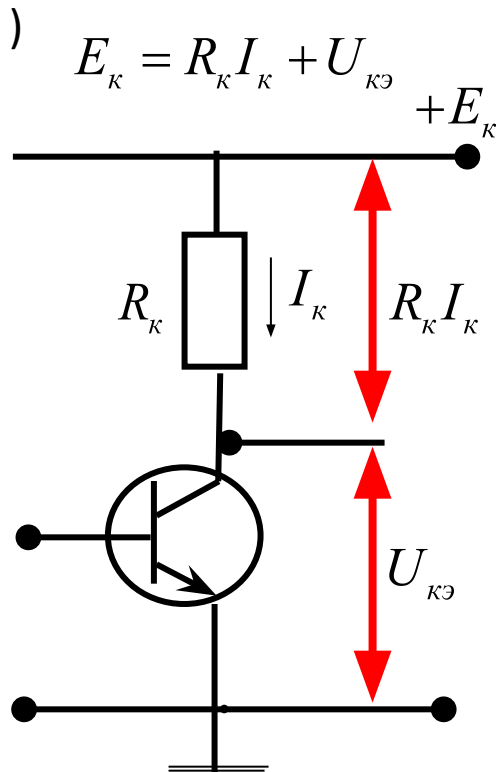
Цель- определить рабочую точку для постоянных токов и напряжений.

В схеме усилителя все конденсаторы заменяются на разрыв цепи.

Для цепи постоянного тока рабочая точка находится из входных и выходных характеристики транзистора (базовая и коллекторная ВАХ).

**Коллекторная характеристика**  $I_k = f(U_{кэ}, I_б)$ , ( $I_б$ - параметр)

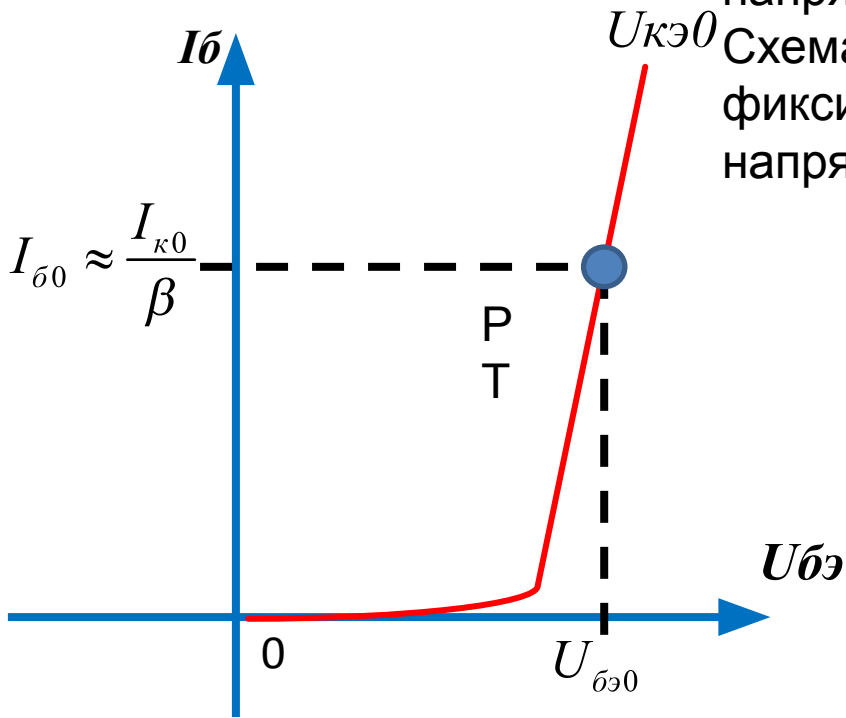
А



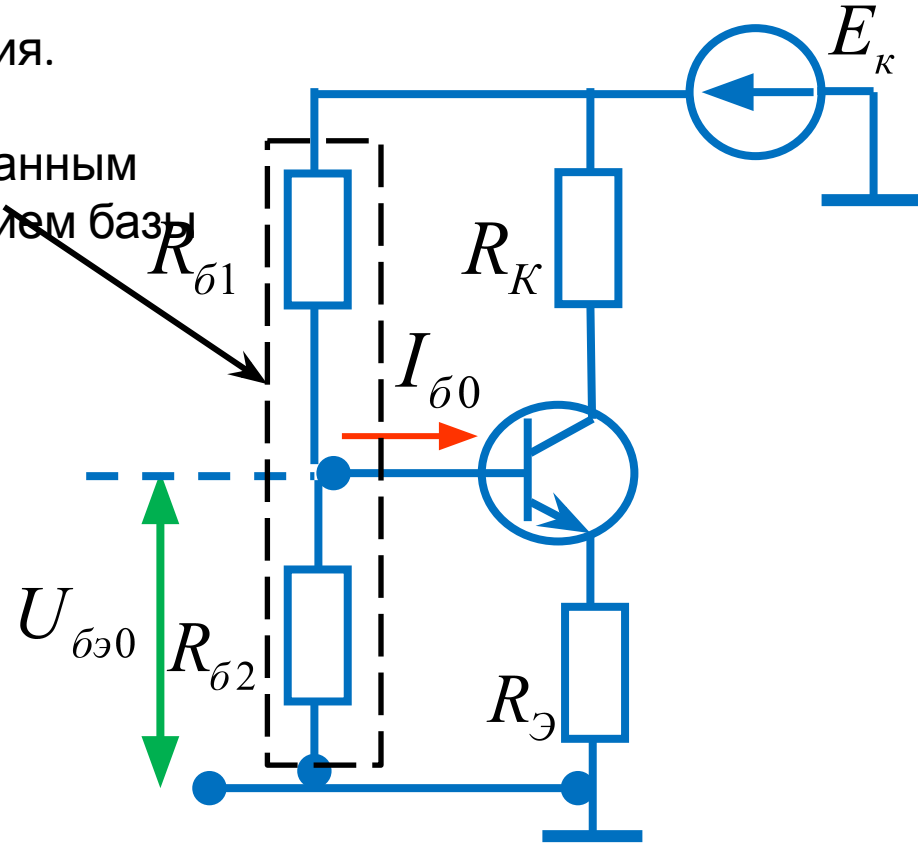
Определили РТ для выходной характеристики, переход к определению РТ для входных характеристик

Б Входная характеристика  
 ) характеристика

$$I_{\bar{b}} = f(U_{\bar{b}\bar{э}}, U_{\bar{к}\bar{э}}), U_{\bar{к}\bar{э}} - \text{параметр}$$



Делитель напряжения.  
 Схема с фиксированным напряжением базы



$$U_{\bar{б}\bar{э}0} = \frac{E_{\bar{к}} R_{\bar{б}2}}{R_{\bar{б}1} + R_{\bar{б}2}}$$

Все рабочие точки в статическом режиме определены.

Переход к определению параметров динамического режима.

## 2. Расчет по переменным токам и напряжениям- динамический режим.

Цель- определить коэффициенты усиления (тока, напряжения, мощности) для переменных (усиливаемых) токов и напряжений.

В схеме усилителя все конденсаторы заменяются на короткое замыкание участка цепи.

Для цепи переменного тока характеристики усилителя находятся из  $h$ -параметров после **входного** преобразования схемы усилителя.

Входная цепь транзистора

$$R_{\sigma} = R_{\sigma 1} // R_{\sigma 2}$$

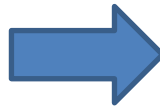
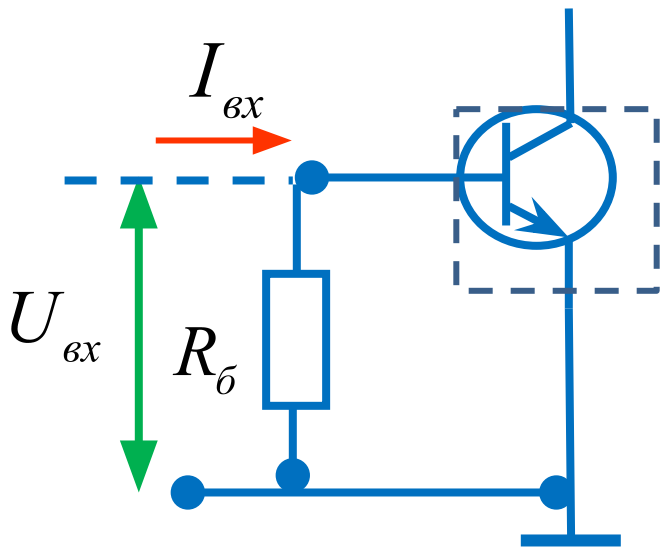
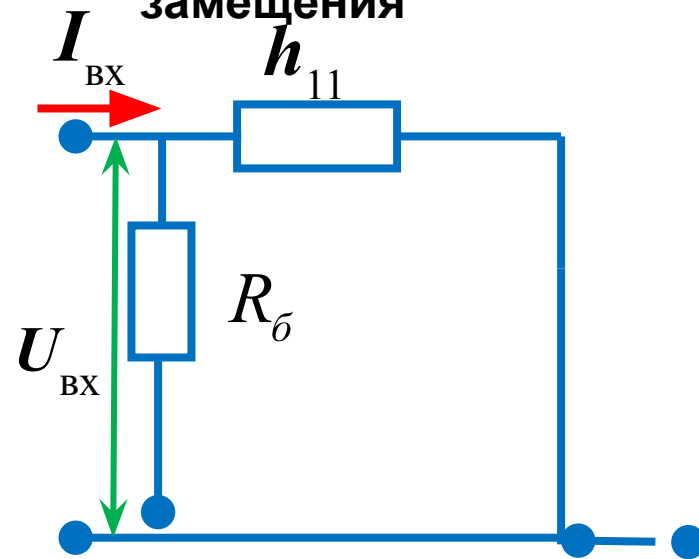


Схема замещения



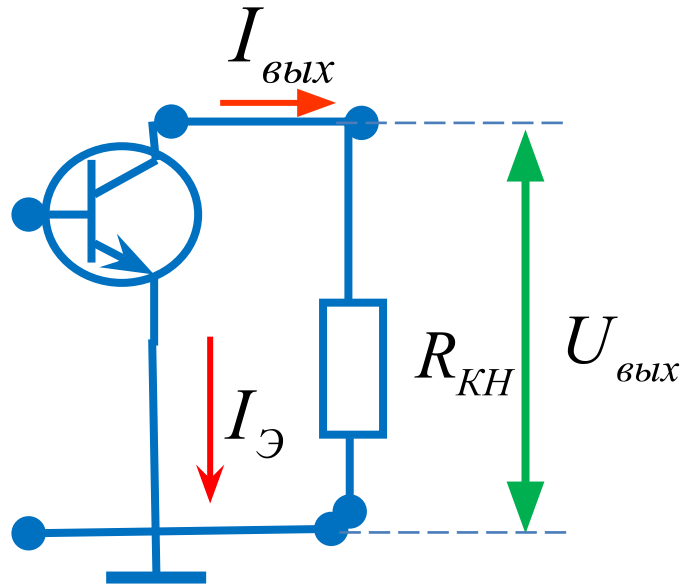
$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_{\sigma}} + \frac{U_{\text{вх}}}{h_{11}} = I_{\text{вх}} \quad R_{\text{вх}} = \frac{h_{11} R_{\sigma}}{h_{11} + R_{\sigma}}$$

$$R_{\sigma} \gg h_{11}$$

$$R_{\text{вх}} \approx h_{11}$$

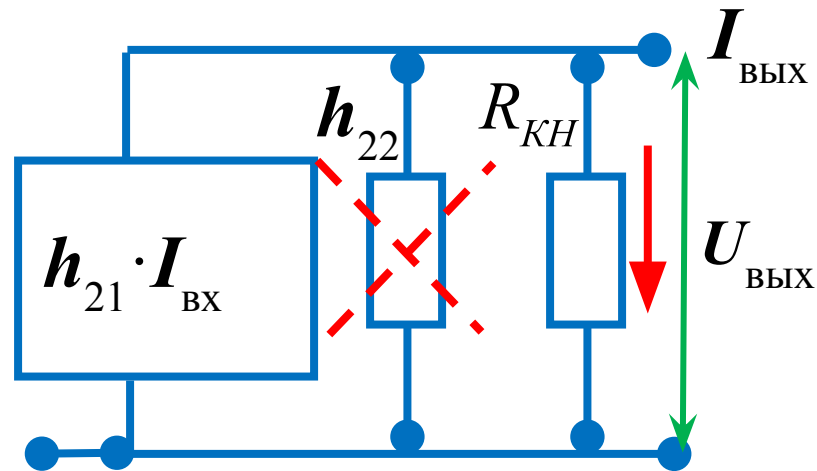
**Выходная цепь транзистора**

$$R_{KH} = R_K // R_H$$



**Схема замещения**

$$\frac{1}{h_{22}} \gg R_{KH}$$



$$R_{\text{вых}} = R_{KH}$$

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{h_{21} I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \approx \beta$$

$$U_{\text{вых}} = R_{KH} h_{21} I_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} I_{\text{вх}} = h_{11} I_{\text{вх}}$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{KH} h_{21} I_{\text{вх}}}{h_{11} I_{\text{вх}}} \approx \frac{R_{KH} h_{21}}{h_{11}} = \frac{R_{KH} \beta}{h_{11}}$$

$$K_P = K_I K_U = \frac{R_{KH} \beta^2}{h_{11}}$$

# Оценим значения параметров усилителя

## Параметры схемы:

$R_H = \infty$  (нагрузка отключена холостой ход),

$R_K = 1000 \text{ Ом}$

## Параметры

транзистора:

$h_{21} = \beta = 100$ .

$$R_{M_{\text{вх}}} \approx h_{11} = 100$$

$$R_{M_{\text{вх}}} \approx R_K = 1000$$

$$K_I = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{h_{21} I_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \approx \beta = 100$$

$$K_U = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_K \beta}{h_{11}} = 1000$$

$$K_P = K_I K_U = \frac{R_{KH} \beta^2}{h_{11}} = 10^5$$



# Методы стабилизации положения РТ транзисторных усилителей

Под действием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов положение РТ может измениться настолько, что транзистор окажется в нерабочей области.

## **Дестабилизирующие факторы:**

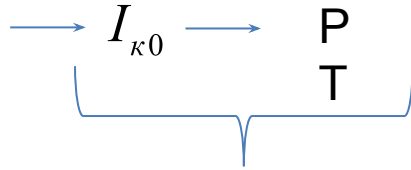
- основное влияние – изменение температуры (разогрев транзистора)

- дрейф параметров элементов схемы,
- дрейф напряжения источников питания

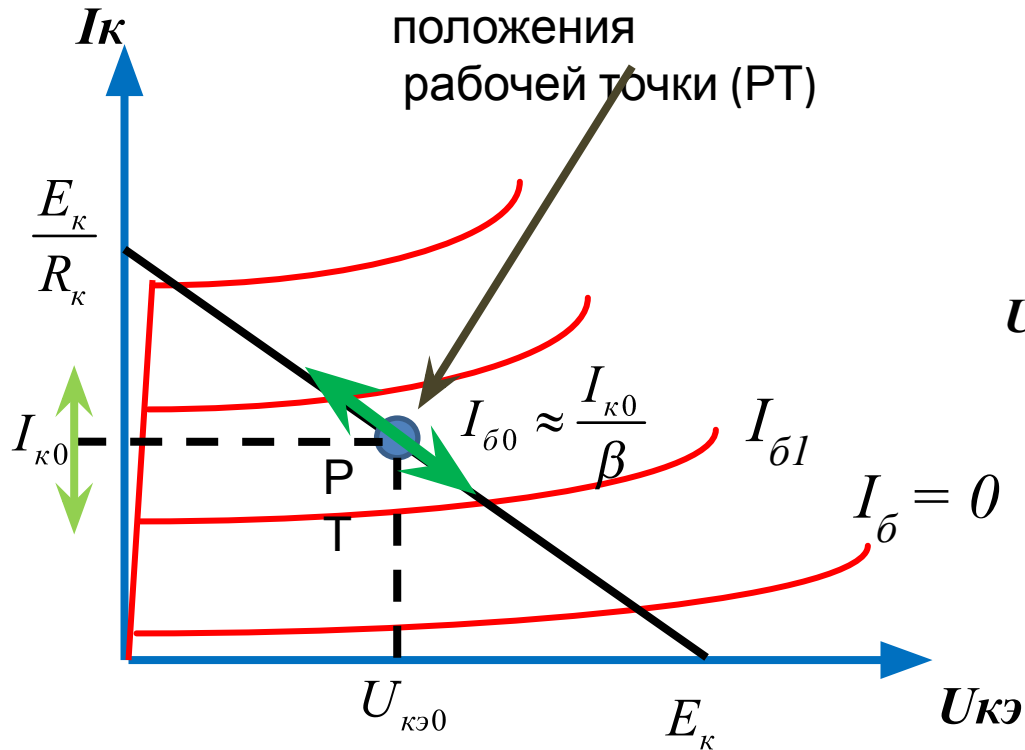
В частности, с повышением температуры транзистора его параметры изменяются таким образом, что приводят к увеличению тока коллектора и эмиттера. Для уменьшения этого влияния применяют специальные методы.

# Дрейф рабочей точки на примере транзисторного усилителя включенного по схеме с ОЭ

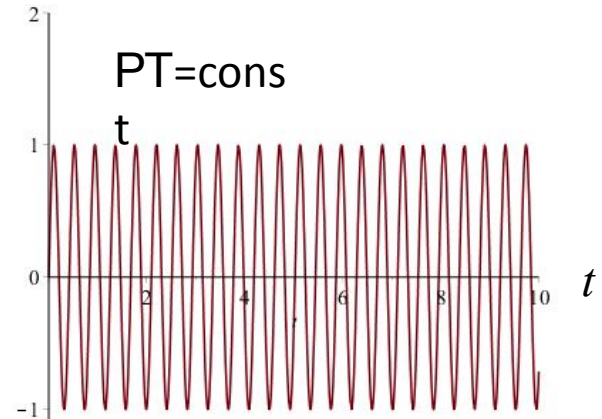
Изменение тока эмиттера  $I_{Э0}$



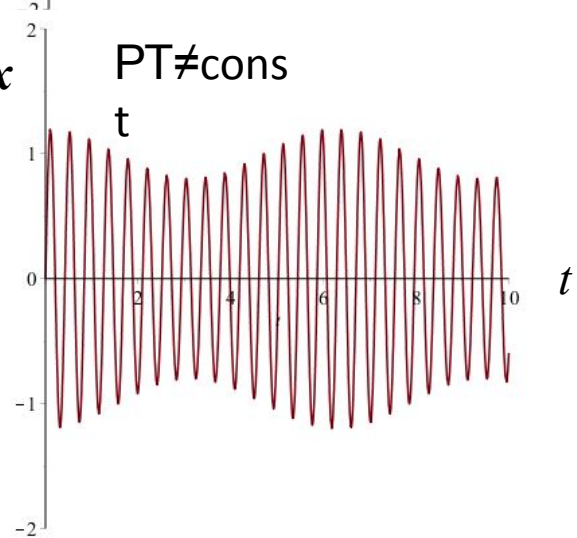
Изменение положения рабочей точки (РТ)



$U_{вых}$



$U_{вых}$



Используется несколько схем стабилизации:

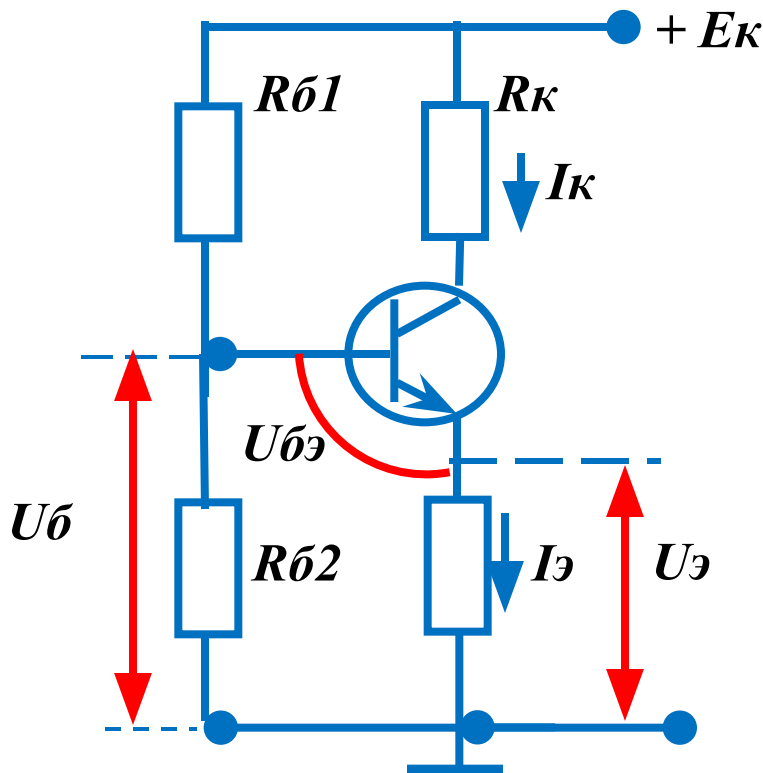
- эмиттерная стабилизация (обратная связь по току),
- коллекторная стабилизация (обратная связь по напряжению),
- термокомпенсация.

### Схема с эмиттерной стабилизацией

$$I_k \approx I_\varepsilon$$

$$U_\varepsilon = R_\varepsilon \cdot I_k$$

$$U_{бэ} = U_б - U_\varepsilon$$



С повышением температуры  $T$  ток  $I_k$  увеличивается, увеличивается напряжение  $U_\varepsilon$

Напряжение остается  $U_б$  неизменным.

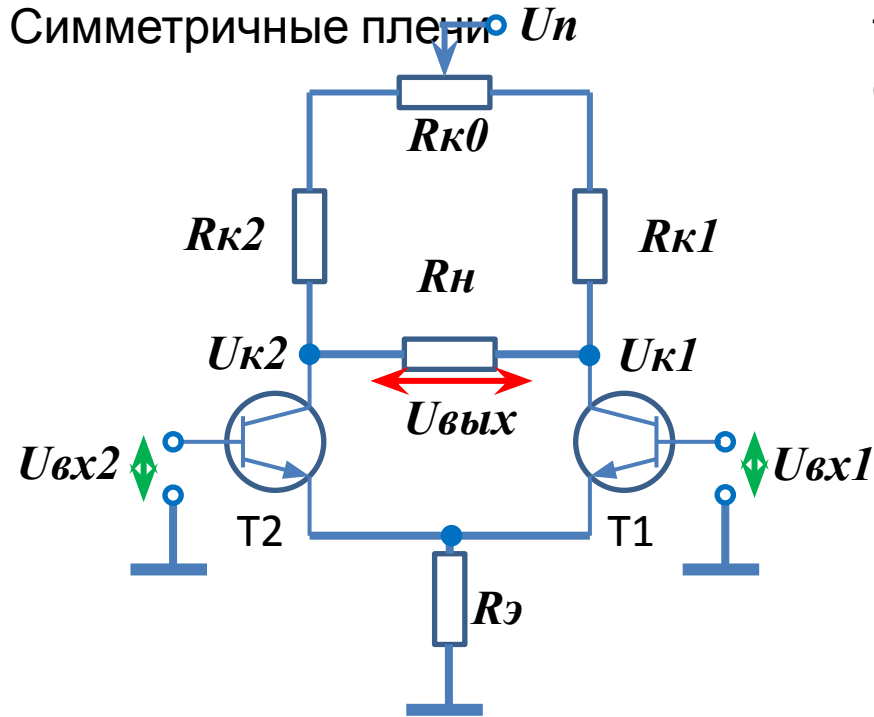
В результате напряжение  $U_{бэ} = U_б - U_\varepsilon$  уменьшается, что приводит к закрыванию транзистора и уменьшению тока коллектора  $I_k$ .

Отрицательная обратная связь по току

# Дифференциальный усилитель (ДУ)

Мостовая схема включения транзисторов с ОЭ. Симметричные плечи

В основе ДУ лежит идеальная симметрия обоих плеч моста, т. е. идентичность параметров транзисторов  $T1, T2$  и равенство сопротивлений  $R_{k1}, R_{k2}$ .



1.  $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$

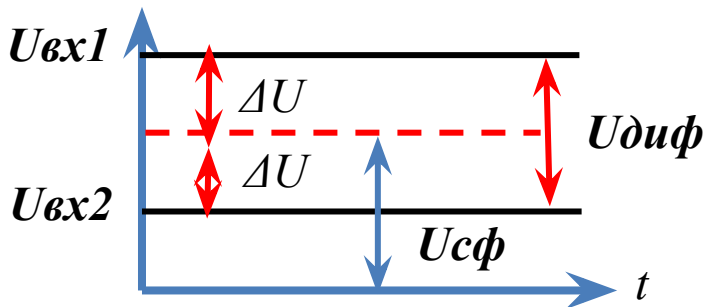
$U_{вых} = 0$  при одновременном и одинаковом изменении токов в обоих плечах. В идеальном ДУ дрейф выходного напряжения отсутствует, однако возможен дрейф РТ в каждом  $T1, T2$ .

2.  $U_{вх1} = U_{вх2} = U_{сф}$  – синфазные напряжения

$I_{к1} = I_{к2}, U_{к1} = U_{к2}, U_{вых} = 0$

3.  $U_{вх1} = -U_{вх2} = U_{диф}$  – противофазные (дифференциальные) напряжения

$I_{к1} = -I_{к2}, U_{к1} = -U_{к2}, U_{вых} = U_{к1} - U_{к2}$

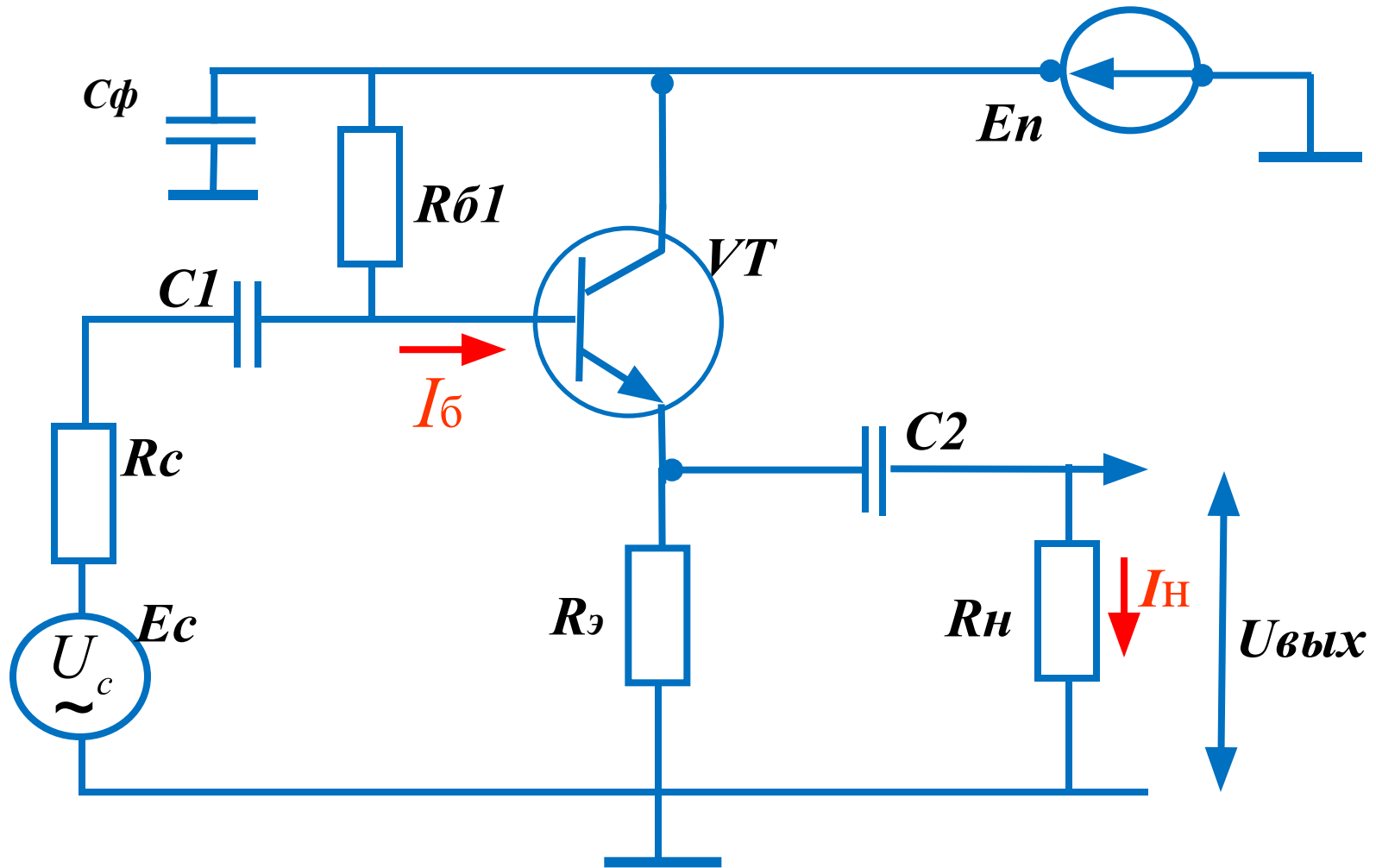


$R_{вх} \approx 2h_{11}$

$R_{вых} \approx 2(R_{к1} + R_{к2})$

$K_U = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_k$

Схема включения транзистора с ОК. Эмиттерный повторитель  
Принципиальная схема



## Параметры схемы с ОК

$$R_{ЭН} = R_{Э} // R_H$$

Входное

сопротивление

$$R_{вх} = R_{б} + (\beta + 1)(R_{Э} // R_{ЭН}) \approx h_{11} + (\beta + 1)R_{ЭН}$$

$$h_{11} \ll R_{Э}, \quad R_{Э} \ll R_H$$

$$R_{вх} \approx (\beta + 1)R_{Э}$$

Выходное

сопротивление

$$R_{вых} = R_{ЭН} \approx R_{Э}$$

Усиление по току

$$K_I = \frac{I_{Э}}{I_{Б}} = (\beta + 1)$$

Усиление по напряжению

$$U_{вх} = R_{вх} I_{б}$$

$$U_{вых} = R_{вых} I_{Э}$$

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_{ЭН}(\beta + 1)}{h_{11} + (\beta + 1)R_{ЭН}} < 1$$

Усиление по мощности

$$K_P = K_I K_U = (\beta + 1) \approx \beta$$

# Характеристики ОК

ОК имеет следующие особенности:

- высокое входное сопротивление
- малое выходное сопротивление
- коэффициент усиления по напряжению равен единице.

В схеме с ОК транзистор является повторителем входного напряжения по амплитуде и по фазе - **Эмиттерный повторитель**

Эмиттерный повторитель используется для согласования выходного сопротивления источника сигнала с нагрузкой.

# Домашнее задание до 27 сентября

## **СТАРОЕ**

- 1) Хабловски И., Скулимовски В. Электроника в вопросах и ответах (**ГЛАВЫ 1-4**)
- 2) Е. Айсберг. Транзистор? Это очень просто!..4-е издание (**Всю книгу!**)
- 3) Р. Сворень. Электроника. Шаг за шагом. (**Первые 10 глав включительно до 206 стр**)
- 4) Зорин А.Ю. УГО на электрических схемах (**ВСЕ 16 ГЛАВ!**)
- 5) **Не забывайте вступать в группу**  
[https://vk.com/tusur\\_rkf2017](https://vk.com/tusur_rkf2017)



# Домашнее задание до 27 сентября

## ***ТЕКУЩЕЕ***

- 1) Конспект типа «вопрос-ответ» по контрольным вопросам темы «Резисторы» (смотри последний слайд)
- 2) Краткий конспект по «Алгоритму изучения новых ЭРЭ» (см. слайд №6) по темам:
  - Конденсаторы [**МРБ 0573, 0832, 0861, 1079, 1203**]
  - Катушки индуктивности [**WIKI: Катушка индуктивности; МРБ 0031; coil32.ru**]
- 3) Индивидуальные задания желающим по подготовке кратких сообщений для \* и \*\* с презентациями (см. Табл. 5, лекция №4). (10-15 слайдов на 8-10 минут).  
Структура презентации – в соответствии с «Алгоритмом изучения новых ЭРЭ» с необходимым графическим материалом и указанием списка использованной литературы.
  - \*Терморезисторы (термисторы) [Мэклин Э.Д., 1983]
  - Варисторы
  - \*Фоторезисторы (боллометры) [Боцанов Э.О., 1978]
  - Магниторезисторы
  - \*Тензорезисторы [Клокова Н.П., 1990]
  - \*\*Мемристоры

# Индивидуальное задание на ноябрь-декабрь

*Обзорные рефераты на темы*

- ❖ «САПР для СиСПЭС» (включая СВЧ-схемотехнику и этап проектирования печатного узла) (к 1 ноября)
- ❖ «Современные методы инженерного творчества» (к 4 декабря)
- ❖ «Современные отрасли человеческой деятельности, требующие специалистов со знанием СиСЭС» (к 11 декабря)
- ❖ «Отечественные предприятия – разработчики и производители современной ЭКБ» (к 4 декабря)

# Домашнее задание до 7 и 11 октября

## НОВОЕ

- 1) Установить MicroCAP; подключить библиотеки отеч. ЭРЭ
- 2) Всем из 235-3 принести ноутбуки. Занятия в 405 ауд; 2+1(перенос лекции)=3 пары!!!  
Остальным группам 235-1 и 2 готовиться к тому же по своему расписанию.
- 3) Изучить пункт «Демонстрация основных возможностей MicroCAP 7» (стр. 14–36)  
[Озеркин Д.В. **Общая электротехника и электроника. Часть 2 – Общая электроника. – Компьютерный лаб. практикум. – Томск, 2012. – 160 с.**]
- 4) Изучить Приложения 1–6 (стр. 144 – 160) [Озеркин Д.В. **Общая электротехника и электроника. Часть 2 – Общая электроника. – Компьютерный лаб. практикум. – Томск, 2012. – 160 с.**]
- 5) При чтении методички Озеркина Д.В. в качестве вспомогательной использовать книгу [Разевиг В.Д. **Схемотехническое моделирование с помощью MicroCAP 7**]
- 6) Раздел «Транзисторы» по [МРБ 1190 А.И.Аксенов, А.В.Нефедов. **Элементы схем БРА. Диоды. Транзисторы 1992**]
- 7) Разделы 2.2 и 2.3 по [Опадчий, Глудкин...]
- 8) Изучить Главу 1. [Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах Ровдо А.А.]
- 9) Изучить Главу 9, изучить разделы учебника, соответствующие ТЗ на курсовой проект [Перепёлкин Д.А. - **Схемотехника усилительных устройств (Специальность) - 2014**]
- 0) Изучить параграф 4.4 «Схемотехника усилительных устройств» [Нефедов В.И. **Основы радиоэлектроники и связи 2009**]