

схемотехника

Лекция № 4.

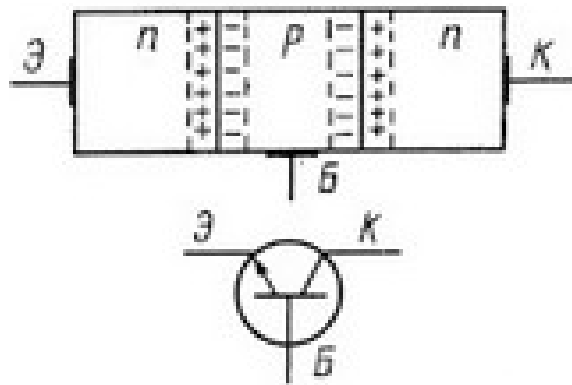
**БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.
ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.**

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор – прибор, содержащий два или более электронно-дырочных перехода, имеющий не менее трех выводов и пригодный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов.

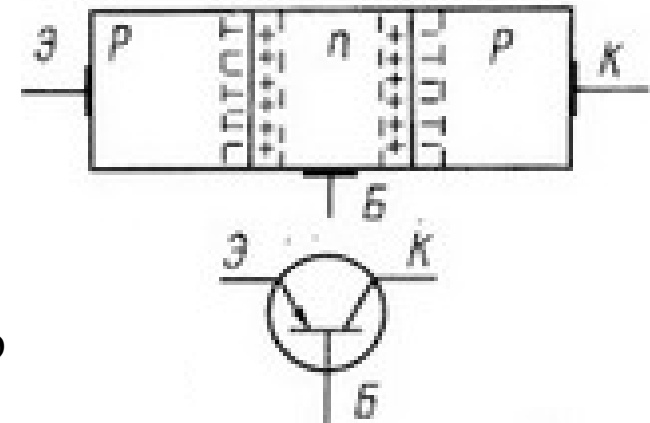
Типы БТ

n-p-n



Э (E – emitter) – эмиттер
Б (B – base) – база
К (C – collector) – коллектор

p-n-p



Полупроводниковые материалы: Si, Ge, Se, GaAs, SiC.

Существенным **свойством полупроводника** является возможность в широких пределах изменять свою проводимость под действием температуры, облучения и введения примесей.

Основные режимы работы транзистора

- **Активный режим** — *основной* или *нормальный* — эмиттер смещен в прямом направлении, коллектор — в обратном. Транзистор наилучшим образом проявляет свои усилительные свойства.
- **Инверсный режим** — наоборот. Транзистор также может использоваться для усиления.
- **Режим отсечки** — к обоим переходам подведены обратные напряжения. Используется в ключевых схемах.
- **Режим насыщения (режим двойной инжекции)** — оба перехода транзистора находятся под прямым смещением. Используется в электронных ключах.

Принцип действия биполярного транзистора

p-n-переходы:

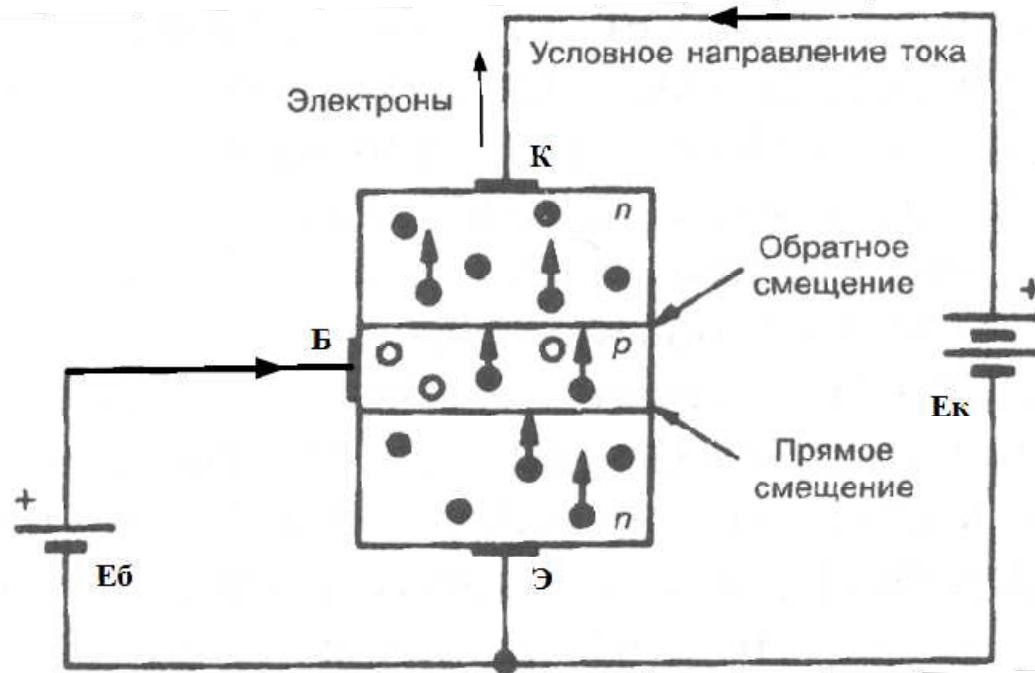
Эмиттер – источник НЗ.

Коллектор – область сбора НЗ.

База – средняя область между Э и К.

❖ *эмиттерный* – между эмиттером и базой; прямое смещение.

❖ *коллекторный* – между коллектором и базой; обратное смещение.



Закон Кирхгофа для токов:

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

**Коэффициент усиления
тока базы:**

$$h_{21} = I_{\text{К}} / I_{\text{Б}}.$$

Усилительные свойства транзистора

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

Мощность, расходуемая на управление транзистором (входная мощность):

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

Пусть коллекторная нагрузка $R_K = 1 \text{ кОм}$

$$i_K \approx i_3$$

$$P_{\text{н}} = i_K^2 R_K = 25 \text{ мВт}$$

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

K – коэффициент усиления по мощности

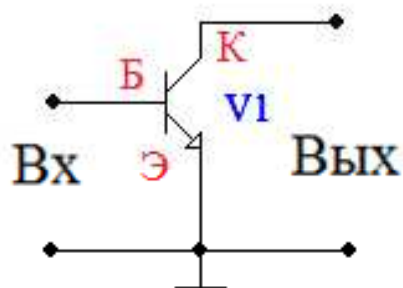
Способы включения биполярных транзисторов

Выбор схемы включения зависит от конкретных требований к данной схеме.

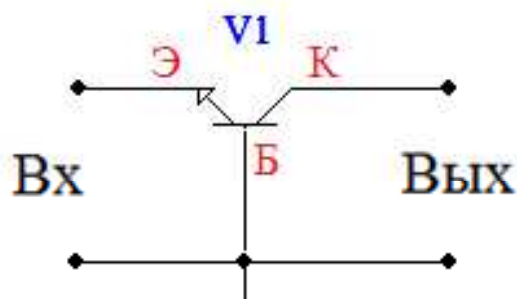
Один из электродов транзистора является общей точкой входа и выхода каскада.

Различают три схемы включения транзистора.

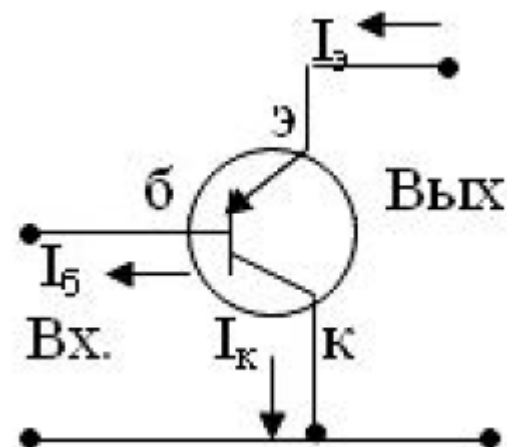
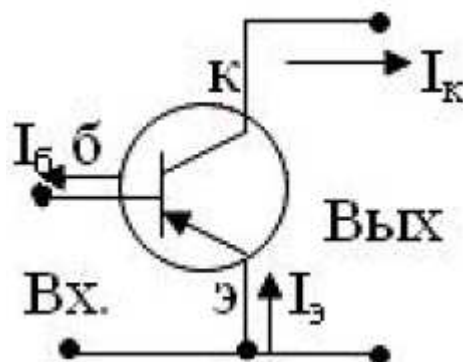
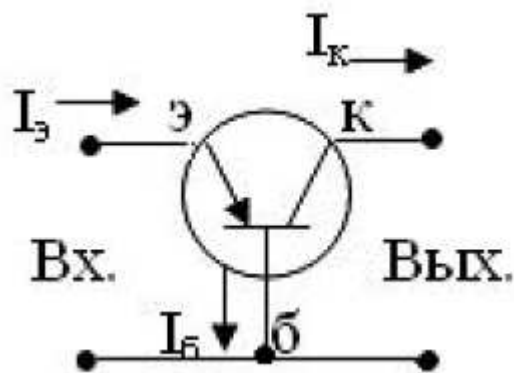
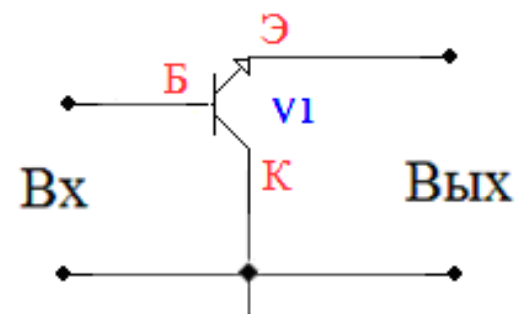
➤ Схема БТ с ОЭ



➤ Схема БТ с ОБ



➤ Схема БТ с ОК



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

Основные параметры схем включения транзистора:

- Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}}$$

- Входное сопротивление:

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

- Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$$

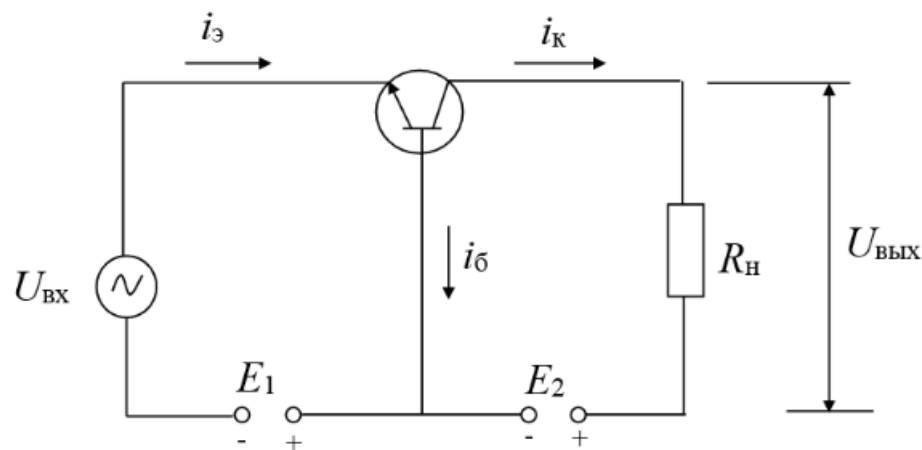
- Выходное сопротивление:

- Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{вх}}}$$

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

Схема с общей базой (ОБ)

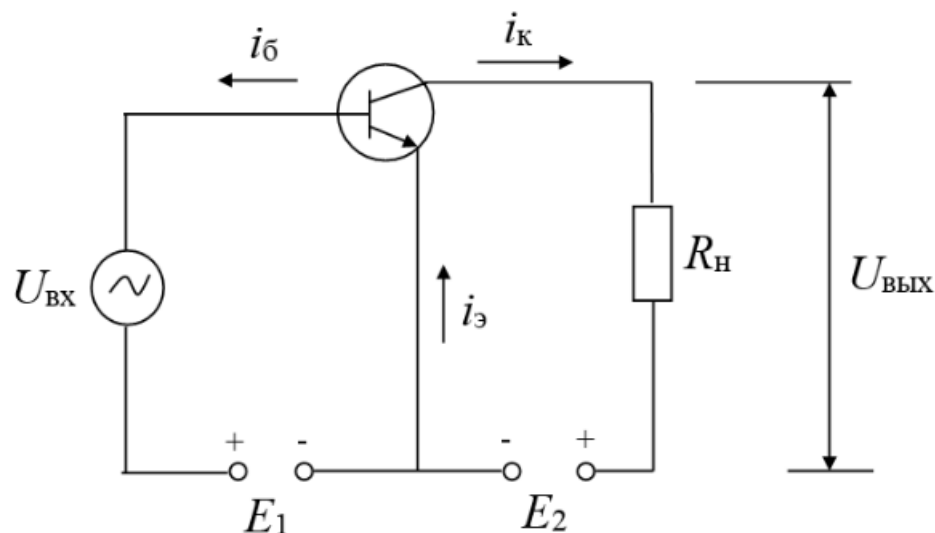


Достоинством схемы с общей базой являются лучшие частотные и температурные свойства по сравнению со схемой с общим эмиттером.

К недостаткам относятся низкое входное сопротивление и малый коэффициент усиления мощности.

Параметр	Значение
K_i	< 1 (порядка α)
K_u	$10 - 100$
K_p	$10 - 100$
$R_{ВХ}$	$10 \text{ Ом} - 100 \text{ Ом}$
$R_{ВЫХ}$	$100 \text{ кОм} - 1 \text{ МОм}$
Фазовый сдвиг между $U_{ВЫХ}$ и $U_{ВХ}$	Отсутствует

Схема с общим эмиттером (ОЭ)



Достоинства схемы включения транзистора с общим эмиттером:

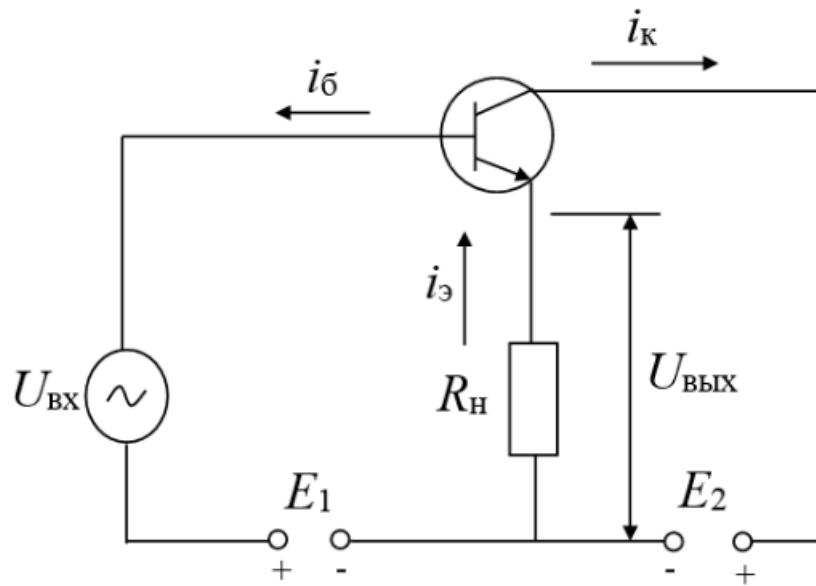
- Удобство питания от одного источника (на коллектор и базу подается напряжение одного знака).
- Высокие значения K_u , K_i , K_p .

Недостатки схемы:

- Режим работы транзистора сильно зависит от температуры.
- Худшие частотные свойства.

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

Схема с общим коллектором (ОК)



Достоинства схемы :

- высокое входное сопротивление
- малое выходное сопротивление.
- наилучшие частотные свойства.

Недостатки схемы:

отсутствие усиления напряжения.

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

Параметры схем включения биполярного транзистора

Тип включения	K_i	K_u	K_p	R_{BX}	$R_{B\backslash X}$	Сдвиг фаз, °
ОЭ	10-100	10-100	100-10000	100 Ом - 1 кОм	100 кОм	180
ОБ	< 1	10-100	10-100	1-10 Ом	100 Ом - 1 кОм	0
ОК	10-100	< 1	10-100	10 кОм	1-10 Ом	0

Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов

Статические характеристики – это зависимости между токами и напряжениями в транзисторе, снятые при постоянном токе в отсутствие нагрузки. Они взаимно связывают четыре величины $i_{ВХ}$, $i_{ВЫХ}$, $U_{ВХ}$, $U_{ВЫХ}$ – входные и выходные токи и напряжения. Для описания режима работы транзистора необходимо иметь два семейства характеристик:

- ❖ входные характеристики $i_{ВХ} = f(U_{ВХ})$ при $U_{ВЫХ} = \text{const}$;
- ❖ выходные характеристики $i_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ})$ при $i_{ВХ} = \text{const}$.

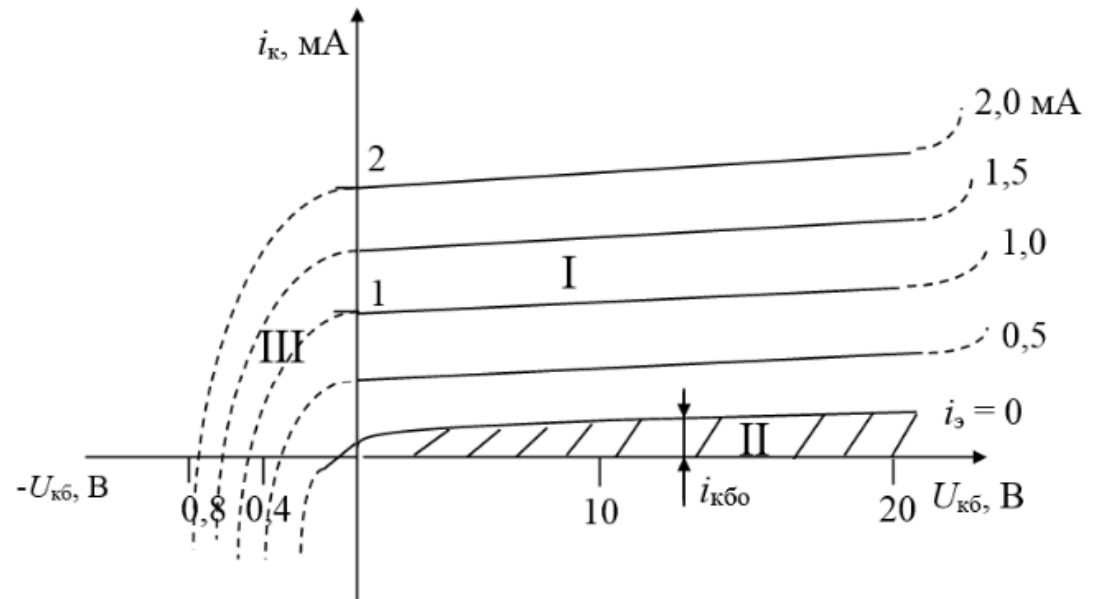
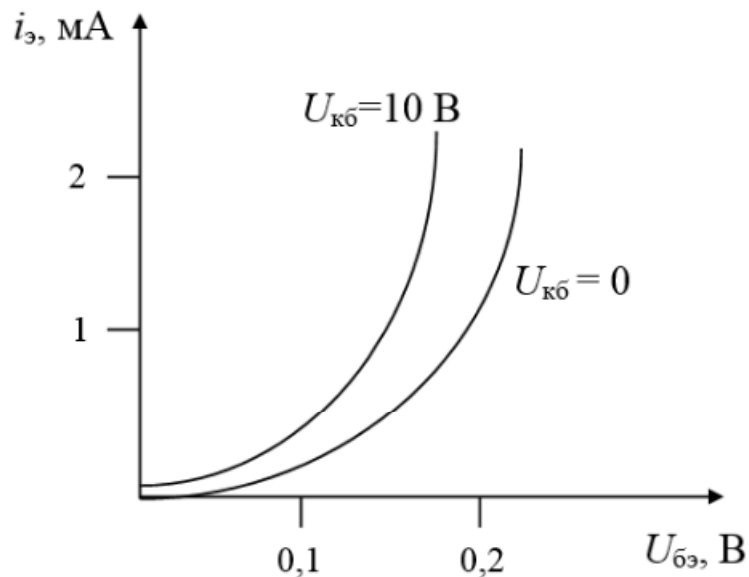
Для каждой схемы включения транзистора существует свое семейство характеристик. Они приводятся в справочниках. В общем случае они подобны вольт-амперным характеристикам полупроводниковых диодов.

Вольт-амперные характеристики для схемы с общей базой

характеристики транзистора при включении его по схеме с ОБ

Входные

Выходные



На выходных ВАХ биполярного транзистора можно выделить области, соответствующие различным режимам его работы:

I – активная область работы транзистора,

II – область отсечки (оба перехода закрыты, $i_{э} < 0$),

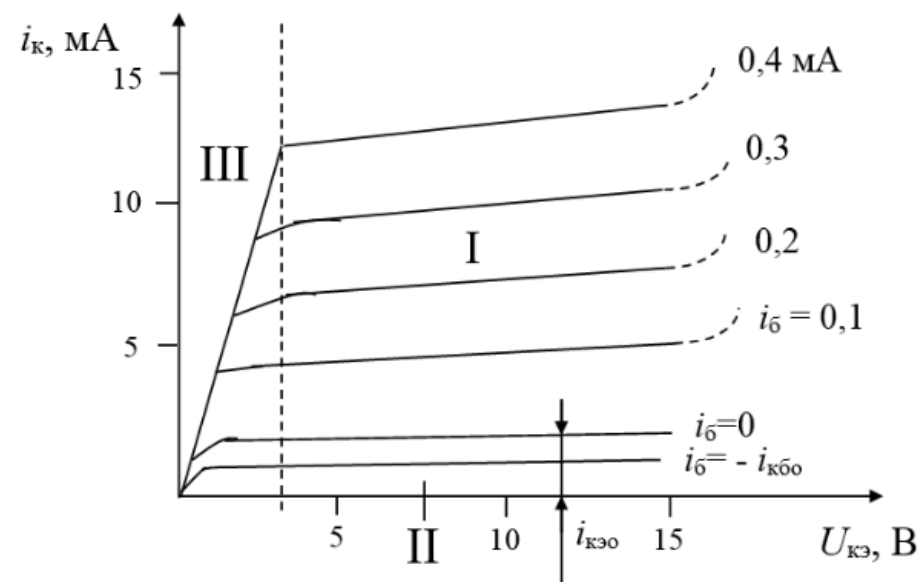
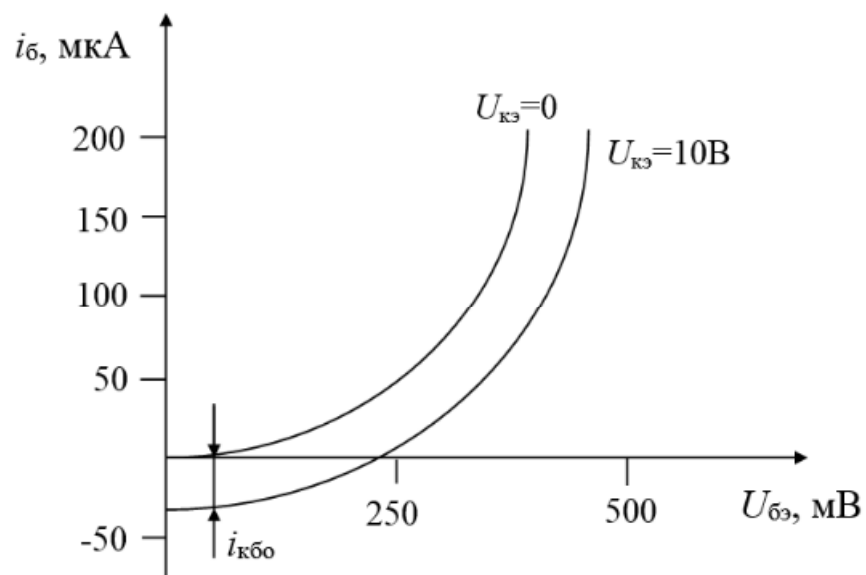
III – область насыщения (оба перехода открыты).

Вольт-амперные характеристики для схемы с общим эмиттером

характеристики транзистора при включении его по схеме с ОЭ

Входные

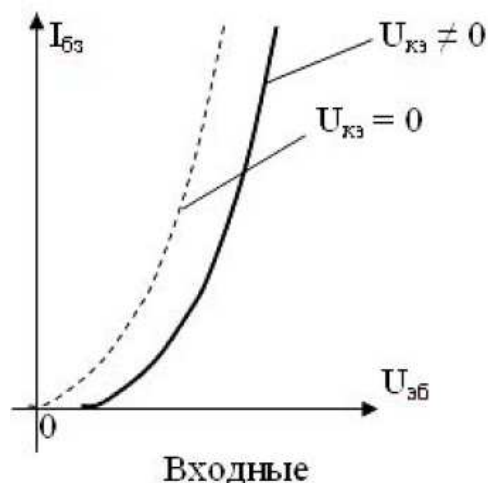
Выходные



На выходных ВАХ биполярного транзистора можно выделить области, соответствующие различным режимам его работы:

- I – активная область работы транзистора (усиление),
- II – область отсечки,
- III – область насыщения.

рабочий режим и точка покоя



Расчет усилителя должен начинаться с постоянного тока.

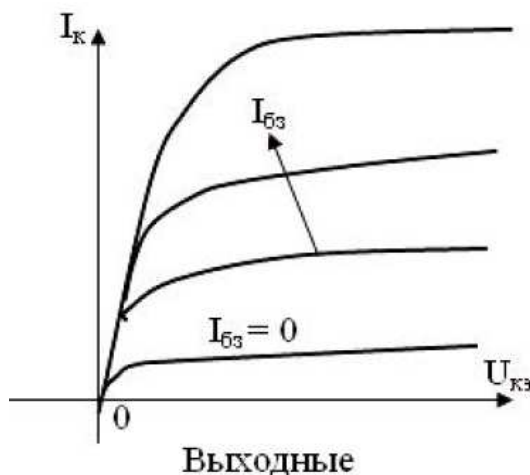
По постоянному току $X_C \rightarrow \infty$, т.е. C – обрыв цепи;

$X_L \rightarrow 0$. т.е. L – короткозамкнутый

провод.

Состояние, в котором находится УЭ, при отсутствии на его входе усиливаемого сигнала, называется *состоянием покоя*.

Постоянные токи и напряжения в состоянии покоя определяют на входной и выходной статических характеристиках *точку покоя*.

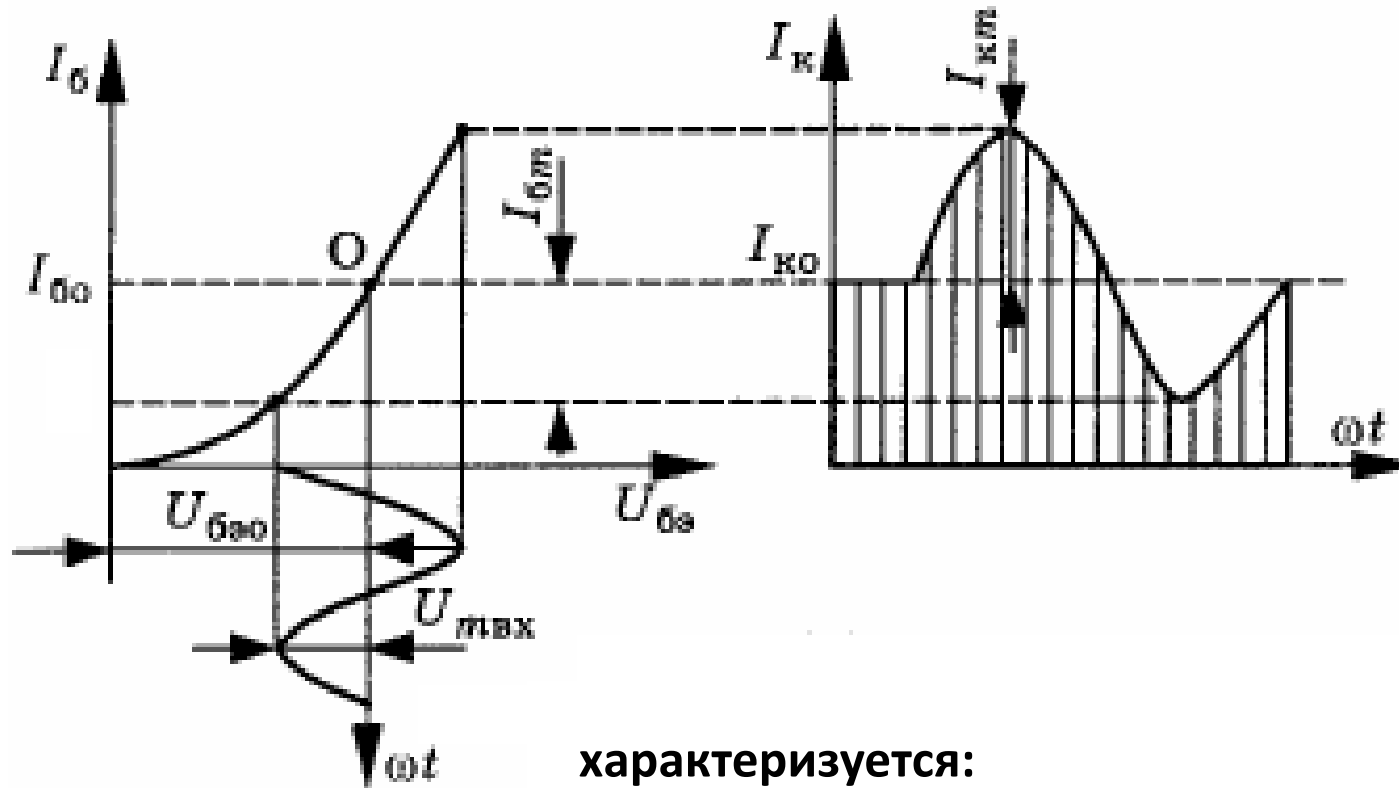


При выборе положения точки учитываются:

1. Линейность усиления и уровень усиления.
2. Потребляемая мощность.
3. Условия эксплуатации УЭ.
4. Способ включения УЭ.
5. Работа в активном режиме.

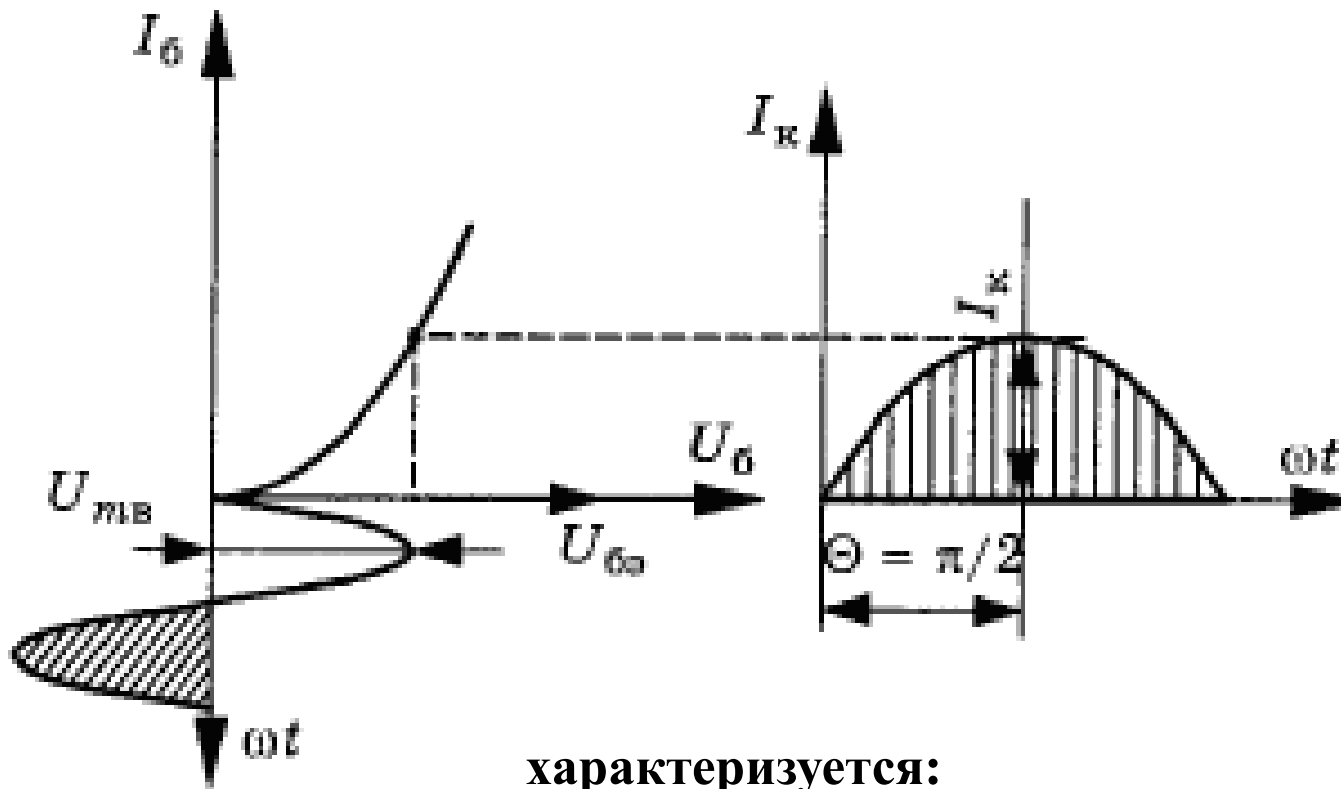
ПОНЯТИЕ О КЛАССАХ УСИЛЕНИЯ

Класс усиления А



- ❖ минимальными нелинейными искажениями сигнала ($K_r \leq 1\%$).
- ❖ небольшим КПД усилительного каскада (всегда меньше 40 %), т.е. наименее экономичный режим.

Класс усиления B

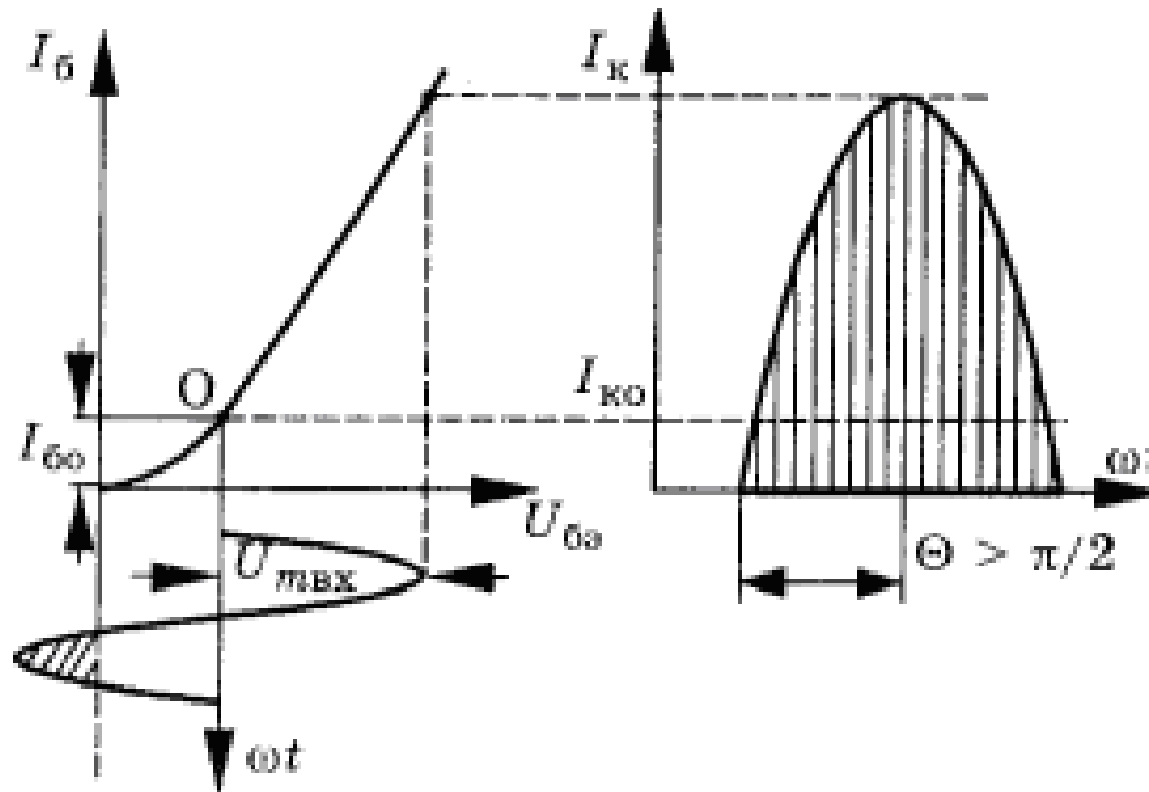


характеризуется:

- ❑ высокий КПД (до 70%) и малая мощность тепловых потерь, рассеиваемых в транзисторе.
- ❑ большой уровень нелинейных искажений сигнала ($K_r \leq 10\%$).
- ❑ угол отсечки $\theta = 90^\circ$.

Угол отсечки - это угол, соответствующий моменту прекращения тока.

Класс усиления АВ



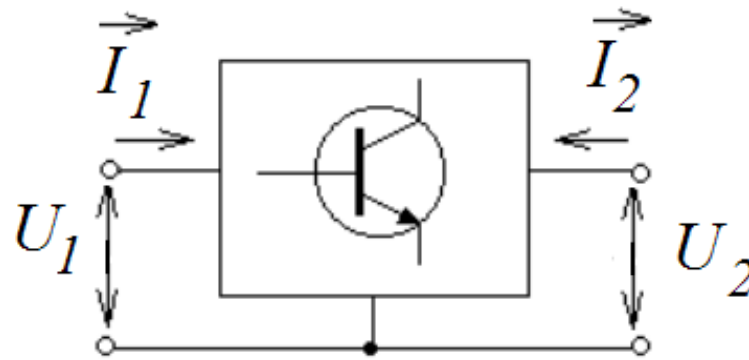
Незначительное понижение КПД усилительного каскада в классе **АВ** компенсируется существенным уменьшением нелинейных искажений при усилении одного из полупериодов входного сигнала.

угол отсечки $\theta = 120...130^\circ$.

Эквивалентные схемы усилительных элементов

Схемы замещения — математические модели, характеризующие некоторые его свойства с заданной точностью и в определённых пределах.

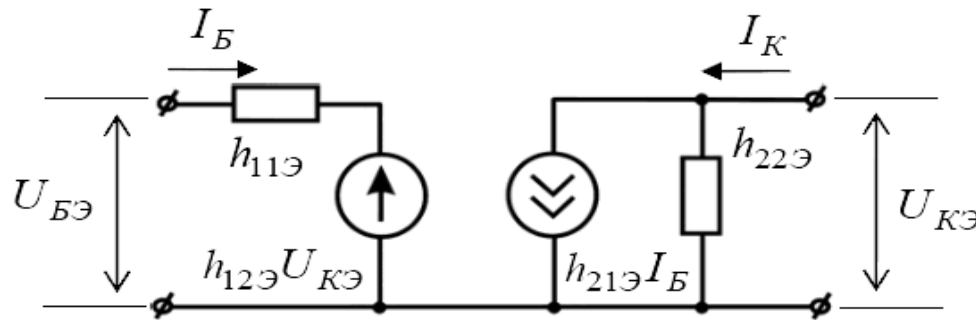
В общем случае транзистор представляет собой активный (способный преобразовывать энергию источника сигнала) нелинейный четырехполюсник.



Его можно описать семействами характеристик – нелинейными функциями двух переменных:

$$\begin{cases} I_2 = f(I_1, U_2) \\ U_1 = f(I_1, U_2) \end{cases}$$

Схема замещения четырехполюсника по постоянному току в h -параметрах



система линейных уравнений

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

входное сопротивление транзистора по постоянному току:

$$h_{11Э} = U_{БЭ0} / I_{Б0}.$$

дифференциальный коэффициент обратной связи по напряжению в схеме включения ОЭ: $h_{12Э} = dU_{БЭ} / dU_{КЭ} \mid \text{при } I_Б \sim = 0.$

коэффициент передачи (усиления) тока: $h_{21Э} = dI_К / dI_Б \mid \text{при } U_{КЭ} \sim = 0.$

дифференциальная выходная проводимость транзистора:

$$h_{22Э} = dI_К / dU_{КЭ} \mid \text{при } I_Б \sim = 0$$

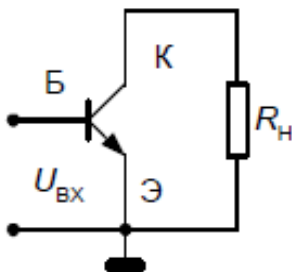
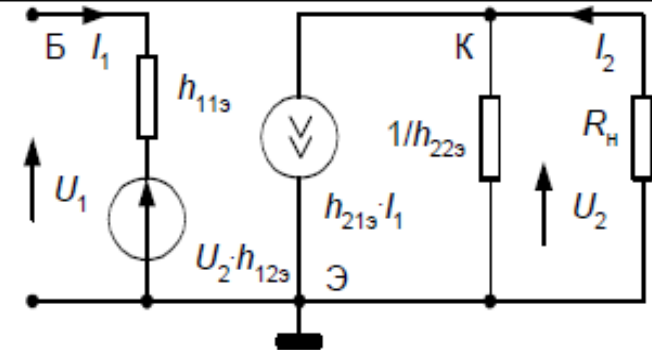
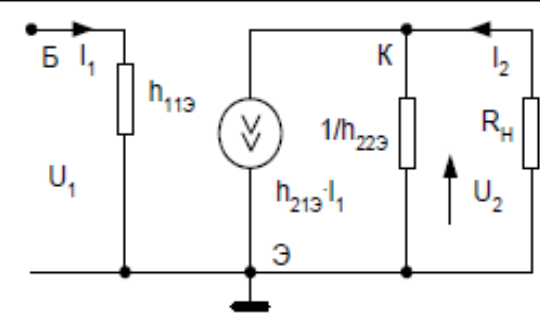
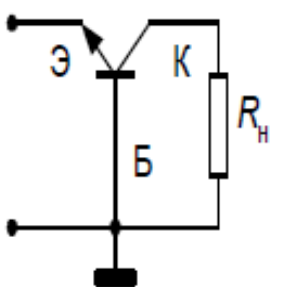
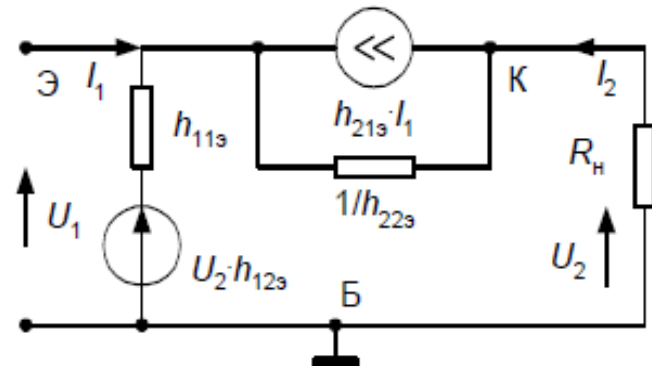
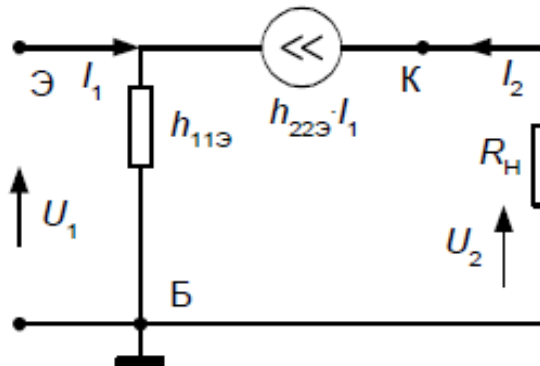
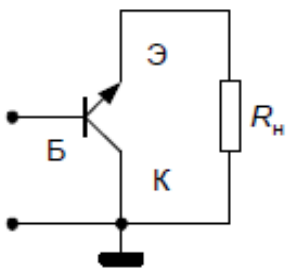
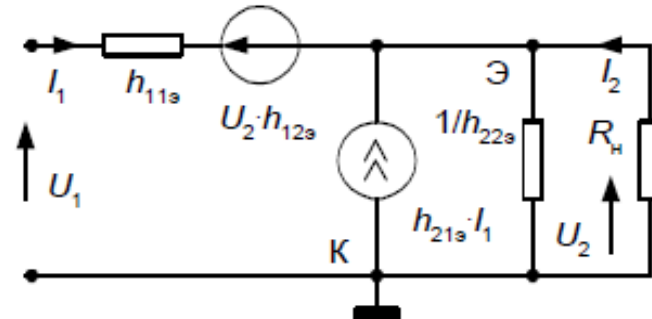
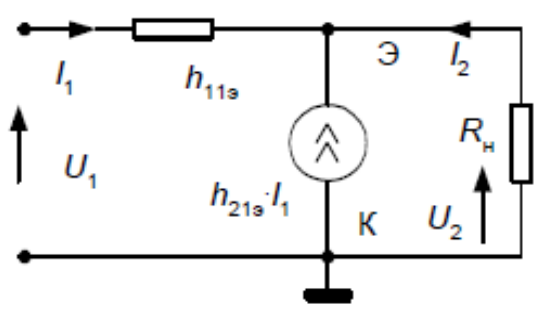
ТИПОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ h -ПАРАМЕТРОВ

h_{11}	h_{12}	h_{21}	h_{22}
$10^3 \dots 10^4 \text{ Ом}$	$2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-3}$	$20 \dots 200$	$10^{-5} \dots 10^{-6} \text{ См}$

Переход от h -параметров схемы с общим эмиттером к h -параметрам схемы с общей базой или общим коллектором

h -параметры схемы с общим эмиттером	h -параметры схемы с общей базой	h -параметры схемы с общим коллектором
$h_{11э}$	$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{1 - h_{22э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{11к} = h_{11э}$
$h_{12э}$	$h_{12б} = \frac{\Delta h_э - h_{12э}}{1 + h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{12к} = 1 - h_{12э}$
$h_{21э}$	$h_{21б} = \frac{-(h_{21э} + \Delta h_э)}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{21к} = -(1 + h_{21э})$
$h_{22э}$	$h_{22б} = \frac{h_{22э}}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э}$	$h_{22к} = h_{22э}$
$\Delta h_э = h_{11э} \cdot h_{22э} - h_{12э} \cdot h_{21э}$		

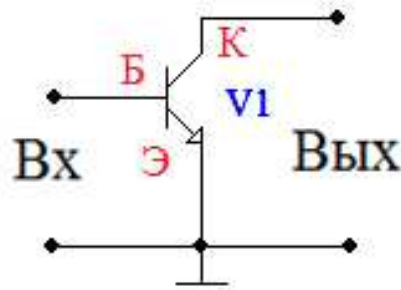
ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Схема включения транзистора	Эквивалентная электрическая схема (h -модель)	Упрощенная эквивалентная электрическая схема
		
		
		

Формулы расчета основных параметров для каскада усилителя по эквивалентной схеме

Параметры	Общий эмиттер	Общая база	Общий коллектор
K_U	$-\frac{h_{21э} \cdot R_{\text{н}}}{h_{11э} + \Delta h_э \cdot R_{\text{н}}}$	$\frac{(h_{21э} + \Delta h_э) \cdot R_{\text{н}}}{h_{11э} + \Delta h_э \cdot R_{\text{н}}}$	$\frac{(1 + h_{21э}) \cdot R_{\text{н}}}{h_{11э} + (1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э) \cdot R_{\text{н}}}$
	$-\frac{h_{21э} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{г.экв}} + h_{11э}}$	$\frac{h_{21э} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{г.экв}} + h_{11э}}$	$\frac{h_{21э} \cdot R_{\text{н}}}{h_{11э} + h_{21э} \cdot R_{\text{н}}}$
K_I	$\frac{h_{21э}}{1 + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$	$\frac{h_{21э} + \Delta h_э}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$	$-\frac{1 + h_{21э}}{1 + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$
	$\frac{h_{21э}}{1 + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$	$\frac{h_{21э}}{h_{21э} + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$	$-\frac{1 + h_{21э}}{1 + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$
$R_{\text{вх}}$	$\frac{h_{11э} + \Delta h_э \cdot R_{\text{н}}}{1 + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$	$\frac{h_{11э} + \Delta h_э \cdot R_{\text{н}}}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$	$\frac{h_{11э} + (1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э) \cdot R_{\text{н}}}{\Delta h_э + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$
	$h_{11э}$	$\frac{h_{11э}}{h_{21э}} \left(\frac{h_{11э} + R_{\text{г}}}{h_{21э}} \right)$	$h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot R_{\text{н}}$
$R_{\text{вых}}$	$\frac{h_{11э} + R_{\text{г}}}{\Delta h_э + h_{22э} \cdot R_{\text{г}}}$	$\frac{h_{11э} + (1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э) \cdot R_{\text{г}}}{\Delta h_э + h_{22э} \cdot R_{\text{г}}}$	$\frac{h_{11э} + R_{\text{г}}}{1 - h_{12э} + h_{21э} + \Delta h_э + h_{22э} \cdot R_{\text{н}}}$
	$\frac{1}{h_{22э}}$	$\frac{h_{11э} + h_{21э} \cdot R_{\text{г}}}{h_{22э} \cdot R_{\text{г}}}$	$\frac{h_{11э} + R_{\text{г}}}{h_{21э}}$
Примечания: 1. Нижние значения в таблице являются приближенными. 2. $\Delta h_э = h_{11э} \cdot h_{22э} - h_{12э} \cdot h_{21э}$. 3. $R_{\text{г}}$ – сопротивление источника входного сигнала (сопротивление генератора).			

Эквивалентная схема биполярного транзистора по переменному сигналу на примере схемы с общим эмиттером

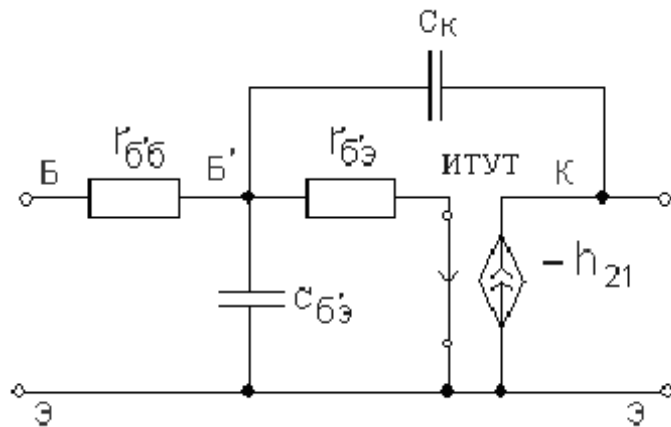


В ОВЧ необходимо учитывать барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов и диффузионную емкость.

Параметры модели вычисляются аналитически в области точки покоя:

$$S = dI_K / dU_{БЭ} = I_K / \varphi_T.$$

φ_T – тепловой потенциал, ($\varphi_T = 25$ мВ для $T = 27^\circ\text{C}$).



C_K – емкость коллекторного перехода. Является элементом внутренней ОС;

$C_{б'э}$ – емкость прямосмещенного перехода БЭ;

$r_{б'б} = \tau_{OC} / C_{KB}$ [Ом] – распределенное (объемное) сопротивление базовой области (омическое сопротивление базы);

τ_{OC} – постоянная времени цепи обратной связи [пс].

$r_{б'э}$ – активное сопротивление эмиттера:

ИТУТ с h_{21} – управляемый генератор тока.

Выходной ток: $I_K = S \cdot U_{БЭ}$.

Входное напряжение транзистора: $U_{б'к} = (1 + SR_N) U_{б'э}$.

$$r_{б'э} = (1 + h_{21}) \cdot \frac{\varphi(t)}{I_{K0}}$$

частотные свойства эквивалентной схемы биполярного транзистора с общим эмиттером

Суммарная ёмкость входной цепи: $C = C_{БЭ} + C_{Б'К} \cdot (1 + S \cdot R_H)$.

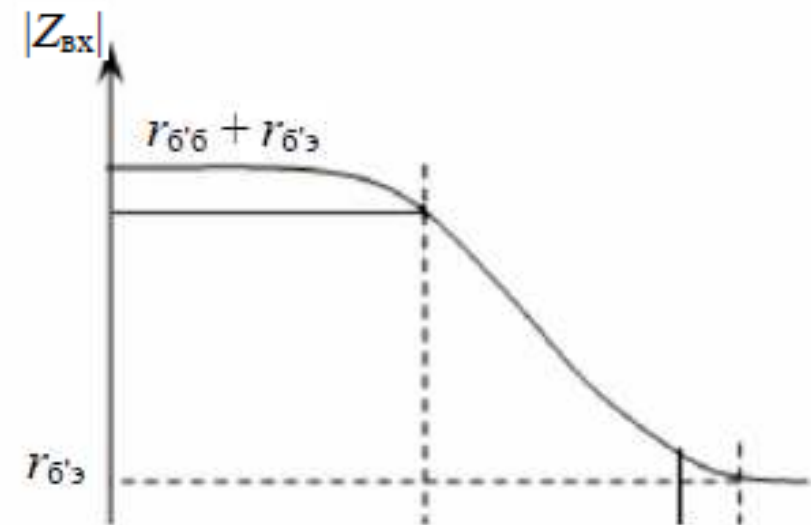
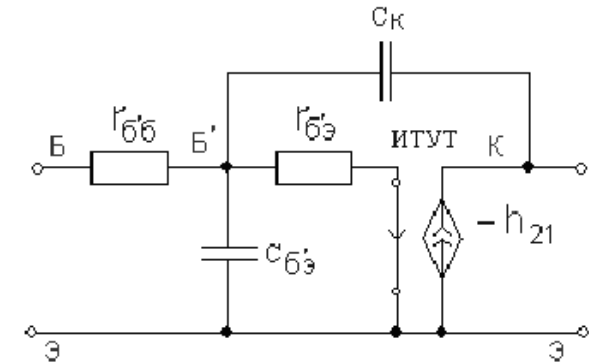
Входное сопротивление: $Z_{ВХ} = r_{б'б} \frac{r_{Б'Э}}{1 + j\omega C_0 r_{Б'Э}}$.

Сквозной коэффициент усиления:

$$K_{СКВ} = k_1 \cdot K_U = \frac{r_{Б'Э}}{1 + j\omega C_0 r_{Б'Э}} \cdot S R_H$$

Граничная частота рабочего диапазона:

$$f_{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot r_{Б'Э}}$$



График, отражающий
частотную зависимость модуля
входного сопротивления транзистора

Классификация биполярных транзисторов

1. По структуре различают $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторы.

2. По диапазону используемых рабочих частот различают:

- низкочастотные транзисторы $f_{гр} \leq 3 \text{ МГц}$;
- среднечастотные транзисторы $3 \text{ МГц} \leq f_{гр} \leq 30 \text{ МГц}$;
- высокочастотные транзисторы $30 \text{ МГц} \leq f_{гр} \leq 300 \text{ МГц}$;
- СВЧ-транзисторы $f_{гр} \geq 300 \text{ МГц}$.

3. По мощности выделяют:

- транзисторы малой мощности $P_{max} \leq 0.3 \text{ Вт}$;
- транзисторы средней мощности $0.3 \text{ Вт} \leq P_{max} \leq 1.5 \text{ Вт}$;
- транзисторы большой мощности $P_{max} \geq 1.5 \text{ Вт}$.

4. По технологии изготовления классификация аналогична классификации полупроводниковых диодов.

маркировка биполярных транзисторов

включает в себя 5 позиций:

1) материал:

Г, 1 – германий; К, 2 – кремний; А, 3 – арсенид галлия;

2) букву Т, означающую, что это биполярный транзистор;

3) диапазон основных параметров (мощность, частота) – число от 1 до 9:

1 – транзисторы низкочастотные малой мощности;

2 – транзисторы среднечастотные малой мощности;

3 – транзисторы высокочастотные малой мощности;

4 – транзисторы низкочастотные средней мощности;

5 – транзисторы среднечастотные средней мощности;

6 – транзисторы высокочастотные средней мощности;

7 – транзисторы низкочастотные большой мощности;

8 – транзисторы среднечастотные большой мощности;

9 – транзисторы высокочастотные большой мощности;

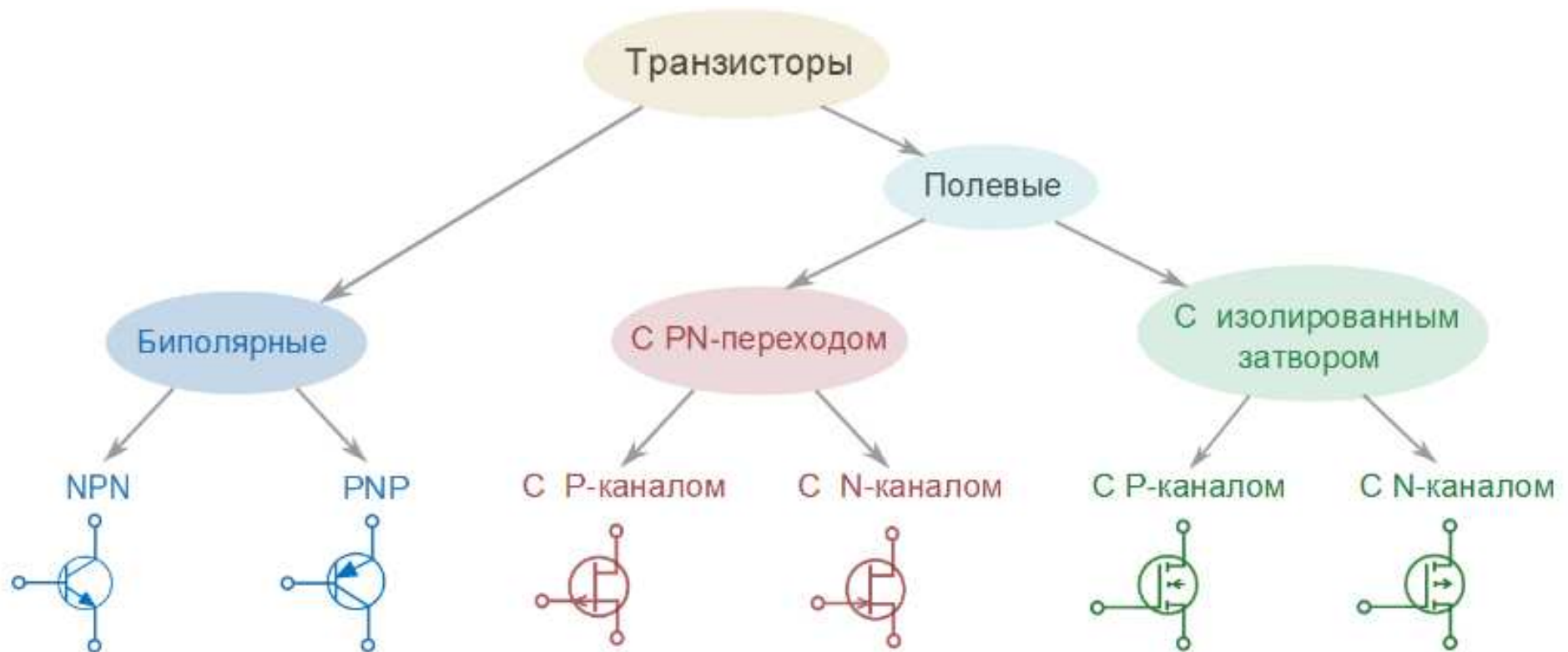
4) порядковый номер разработки (1-99);

5) букву, определяющую классификацию по основным параметрам (β , f_{tr}).

Пример: ГТЗ13А – германиевый транзистор, маломощный, высокочастотный, номер разработки 13, группа А.

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Классификация основных типов транзисторов и обозначение в схеме



Принцип действия полевых транзисторов основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), т.е. это униполярные приборы.

Полевой транзистор управляется напряжением на входе, $i_{\text{вх}} \approx 0$.

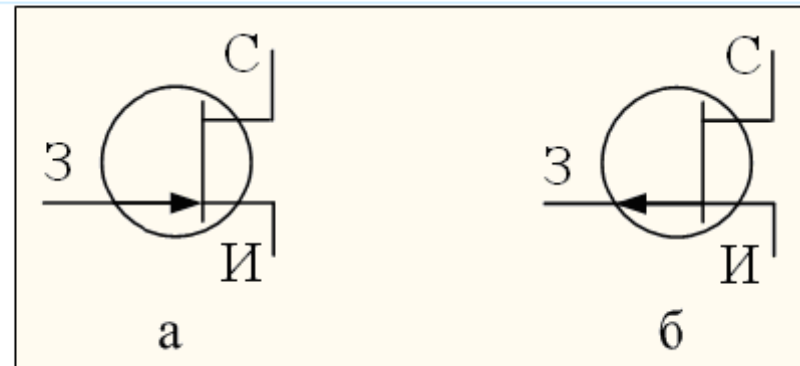
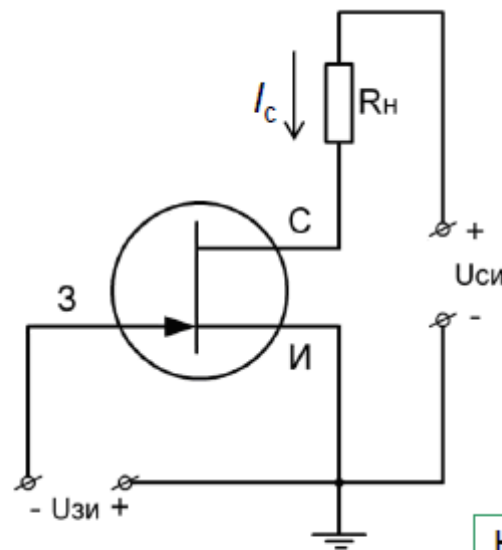
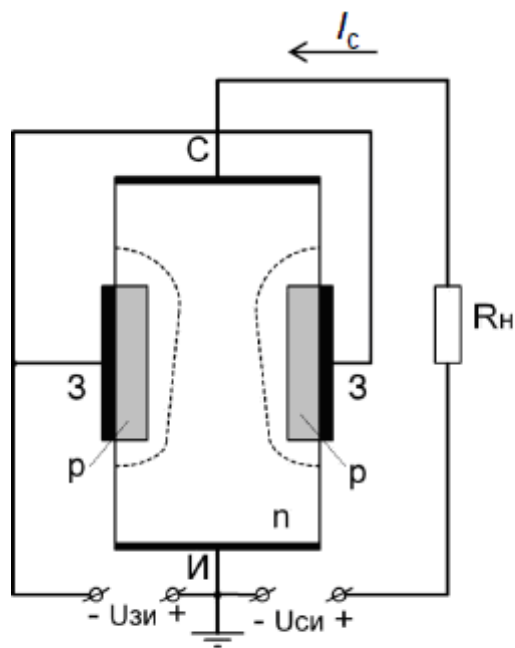
Полевые транзисторы с управляющим p – n –переходом (JFET)

Канал протекания тока представляет собой слой проводника, заключенный между двумя p – n –переходами.

И – исток – *source* (**S**) – электрод, от которого движутся носители заряда.

С – сток – *drain* (**D**) – электрод, к которому движутся носители заряда.

З – затвор – *gate* (**G**) – электрод, управляющий сечением канала, а \Rightarrow сопротивлением канала.



УГО полевого транзистора с управляющим p – n –переходом:

а) n -канал; б) p -канал.

Стрелкой показано положительное направление тока через переход.

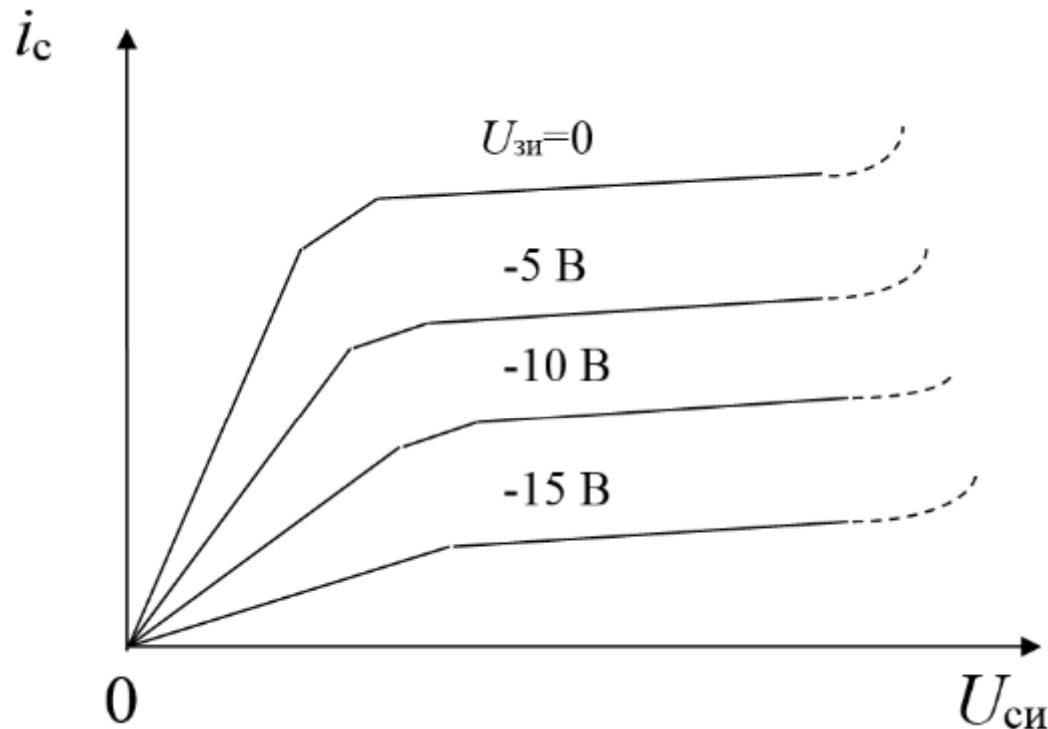
Если на затвор подать напряжение $U_{зи}$ с полярностью, противоположной указанной на рисунке, то оба перехода получат прямое смещение и входное сопротивление транзистора будет мало. Такой режим для данного транзистора – **НЕРАБОЧИЙ !!!**

На затвор необходимо подавать обратное напряжение для переходов. Это напряжение – управляющее для транзистора.

статические характеристики полевых транзисторов

□ Выходные (стоковые) характеристики

$$i_c = f(U_{си}) = U_{зи} = const.$$



С ростом напряжения $U_{си}$ ток I_C сначала увеличивается согласно закону Ома, а затем достигает насыщения. Это объясняется равновесием двух противоположных процессов: с одной стороны ток растет по закону Ома, с другой уменьшается за счет уменьшения толщины канала.

При увеличении модуля напряжения $U_{зи}$ ток стока падает (уменьшается толщина канала). При большом напряжении $U_{си}$ возникает пробой перехода.

Параметры ВАХ:

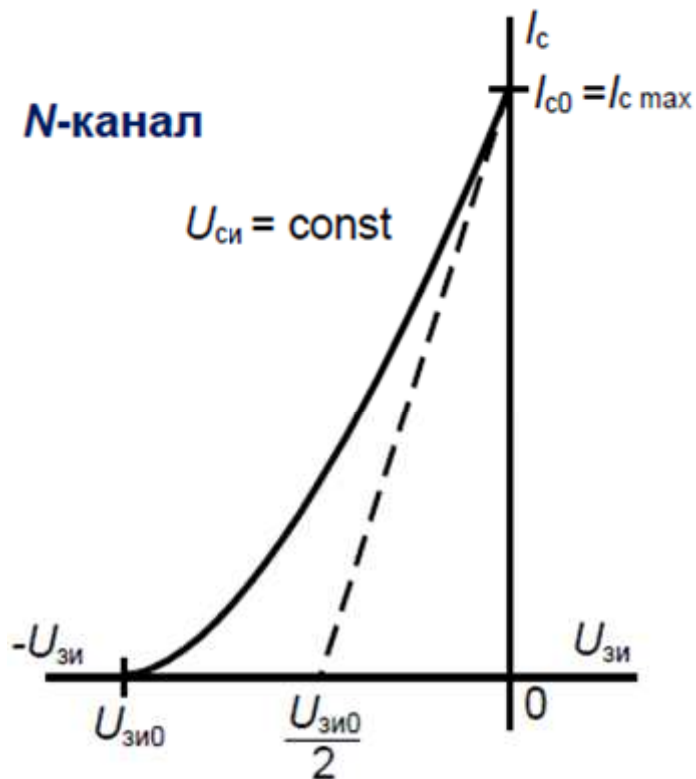
$U_{си, \text{нас}}$ — напряжение насыщения;

$I_{C, \text{нач}}$ — начальный ток стока.

статические характеристики полевых транзисторов

□ Управляющие (стокзатворные) характеристики (сквозная ВАХ)

$$i_c = f(U_{зи}) | U_{си} = const.$$



Стокзатворные ВАХ иллюстрируют управляющее действие затвора.

Параметры ВАХ:

$U_{зи, 0 (отс)}$ – напряжением отсечки: $U_{зи} = U_{зи0} \left(1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{c0}}} \right).$

$I_{C, \text{нач (max)}}$ – начальный ток стока: $I_c = I_{c0} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи0}} \right)^2$

S – крутизна стокзатворной ВАХ – отражает влияние

$U_{зи}$ на выходной ток I_C транзистора:

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си}=const} = \frac{2I_{c0}}{U_{зи0}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи0}} \right) \text{ - уравнение линейной функции}$$

Максимальная крутизна $S_{\max} = S_0 = S_{\text{нач}}$ будет при $U_{зи} = 0$.

Они иллюстрируют управляющее действие затвора

$$S_{\text{БТ}} \gg S_{\text{ПТ}}$$

Основные параметры полевого транзистора

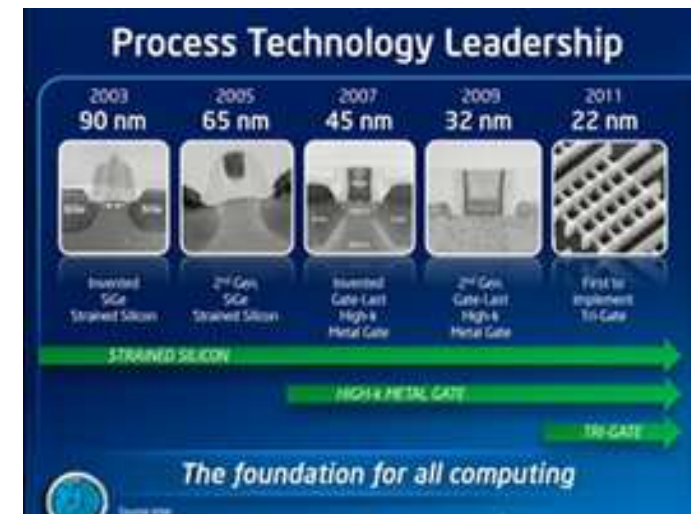
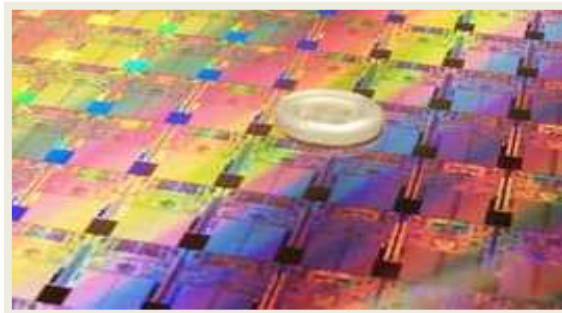
Входное сопротивление определяется сопротивлением обратносмещенных p - n -переходов и составляет $r_{BX} = 10^8 \dots 10^9$ Ом:

$$r_{BX} = \left. \frac{dU_{3И}}{dI_3} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}$$

$$r_{BX \text{ БТ}} \ll r_{BX \text{ ПТ}}$$

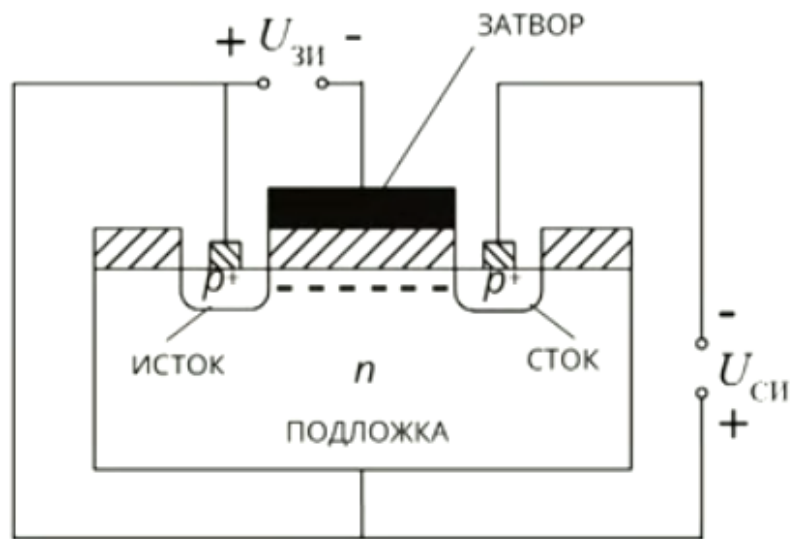
Межэлектродные ёмкости транзистора обусловлены наличием p - n -переходов, примыкающих к истоку и к стоку.

$$C_{3И} = C_{СИ} = 6 \dots 20 \text{ пФ}; \quad C_{3С} = 2 \dots 8 \text{ пФ}$$



Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом выпускаются на токи до 50 мА и напряжения до 50 В.

Полевые транзисторы с изолированным затвором

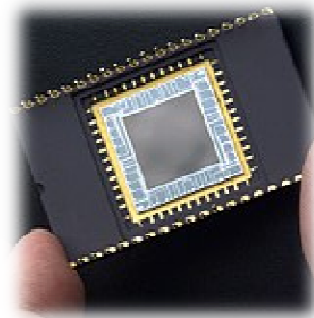
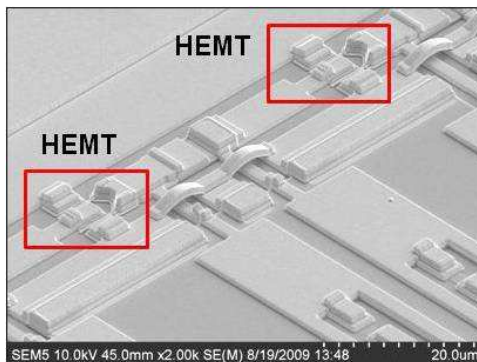


Эти транзисторы называют МДП- (металл–диэлектрик–полупроводник) или МОП- (металл – оксид – полупроводник) транзисторами.

Разновидности МДП-транзисторов:

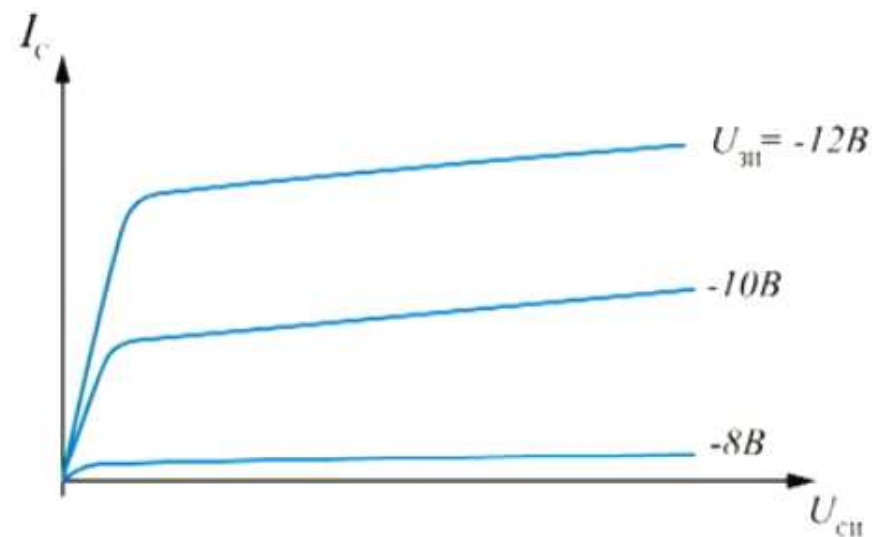
- а)* с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам);
- б)* со встроенным каналом (канал создается при изготовлении).

У МДП-транзистора, в отличие от ПТ с управляющим $p-n$ -переходом, металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод П от кристалла, называемый подложкой.

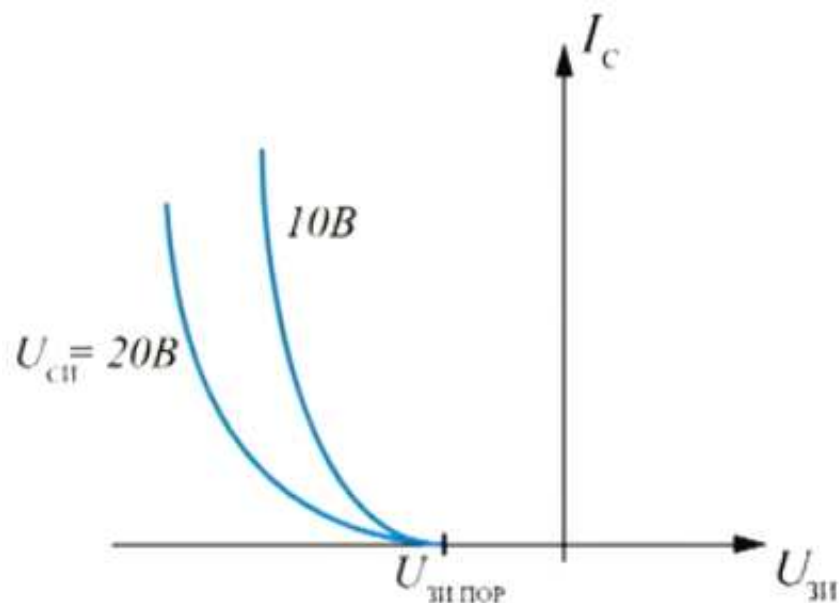


статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором

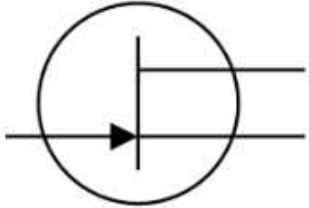
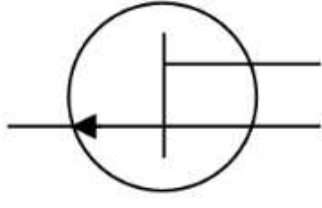
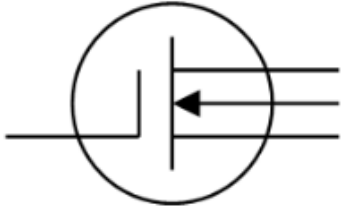
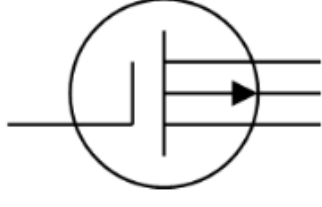
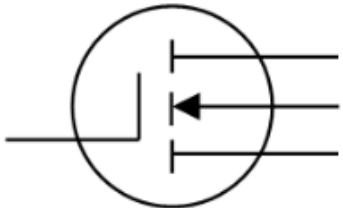
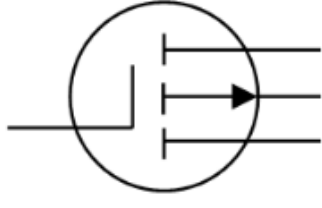
❑ Выходные (стоковые) характеристики



❑ Передаточные характеристики



Условные графические обозначения различных типов полевых транзисторов на принципиальных схемах

	<i>n</i> -типа	<i>p</i> -типа
Транзистор с управляющим <i>p – n</i> переходом		
МДП-транзистор с встроенным каналом		
МДП-транзистор с индуцированным каналом		

Маркировка полевых транзисторов

включает в себя 5 позиций:

1) материал:

Г, 1 – германий; К, 2 – кремний; А, 3 – арсенид галлия;

2) букву П, означающую, что это полевой транзистор;

3) диапазон основных параметров (мощность, частота) – число от 1 до 9:

1 – транзисторы низкочастотные малой мощности;

2 – транзисторы среднечастотные малой мощности;

3 – транзисторы высокочастотные малой мощности;

4 – транзисторы низкочастотные средней мощности;

5 – транзисторы среднечастотные средней мощности;

6 – транзисторы высокочастотные средней мощности;

7 – транзисторы низкочастотные большой мощности;

8 – транзисторы среднечастотные большой мощности;

9 – транзисторы высокочастотные большой мощности;

4) порядковый номер разработки (1-99);

5) букву, определяющую классификацию по основным параметрам (β , f_{tr}).

Пример: КП103А – кремниевый транзистор, маломощный, высокочастотный, номер разработки 03, группа А.

преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными транзисторами

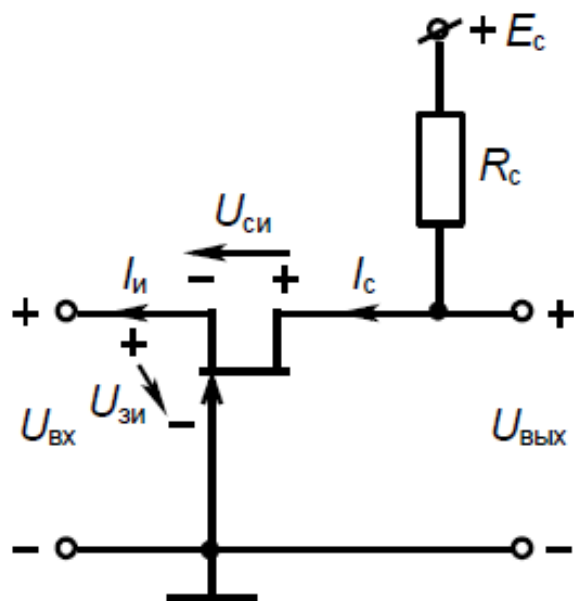
- ✓ высокое входное сопротивление,
- ✓ высокая термическая радиационная стойкость,
- ✓ большая плотность упаковки элементов, которая позволяет создавать микросхемы с очень высокой степенью интеграции в едином технологическом процессе

ПРИМЕНЕНИЕ:

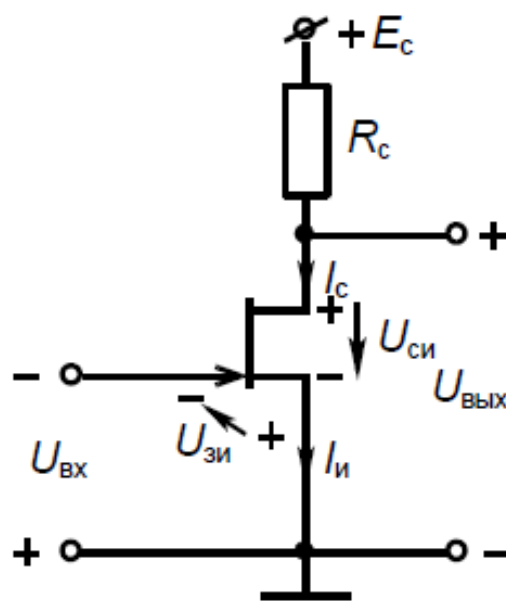
- ☐ Основа цифровых и аналоговых интегральных схем;
- ☐ Ждущие и следящие устройства;
- ☐ Основа flash-памяти;
- ☐ CCD – матрицы (приборы с зарядовой связью);
- ☐ Электронные ключи;
- ☐ Логические элементы;

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

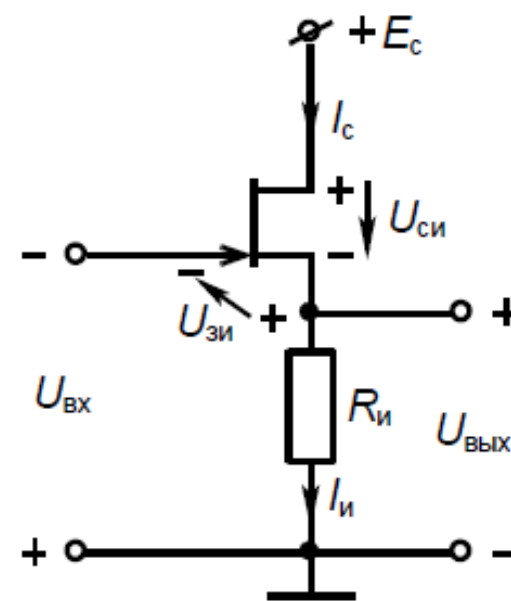
Общий исток (ОИ)



Общий сток (ОС)



Общий затвор (ОЗ)



Параметр	Схема		
	ОИ	ОЗ	ОС
$R_{ВХ}$	Единицы МОм	Единицы, десятки Ом	Единицы МОм
$R_{ВЫХ}$	Единицы кОм	Единицы кОм	Единицы, десятки Ом
K_U	$\gg 1$	$\gg 1$	< 1
K_I	—	$\cong 1$	—

Полевой транзистор как четырёхполюсник



При малых сигналах наиболее удобна система *g*-параметров.

Система уравнений четырёхполюсника имеет вид:

$$I_{1\sim} = g_{11} U_{1\sim} + g_{12} U_{2\sim}; \quad I_2 = g_{21} U_{1\sim} + g_{22} U_{2\sim}.$$

Коэффициенты данной системы имеют размерности проводимостей и являются универсальными параметрами, которые для каждой из схем включения ПТ имеют свои значения.

Для схемы ОИ:

g_{11} – входная проводимость при $U_{2\sim} = 0$;

g_{12} – проводимость обратной передачи при $U_{1\sim} = 0$;

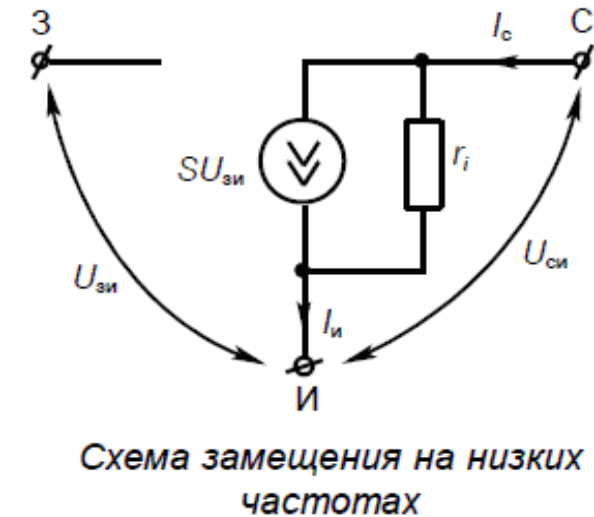
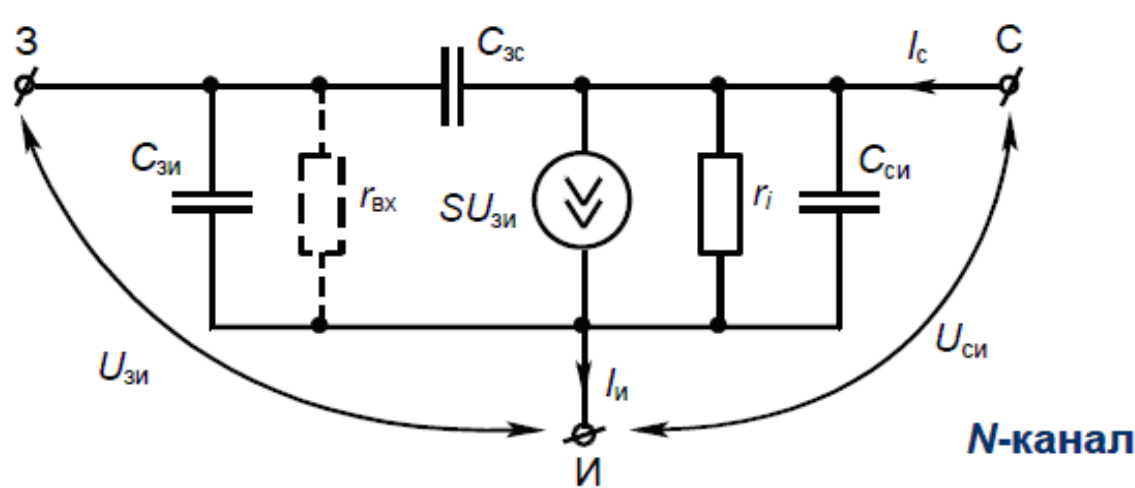
g_{21} – проводимость прямой передачи при $U_{2\sim} = 0$;

g_{22} – выходная проводимость при $U_{1\sim} = 0$.

Режимы $U_{BX\sim} = 0$, $U_{ВЫХ\sim} = 0$ включением емкостей (достаточно больших), представляющих малое сопротивление для переменных составляющих.

Малосигнальная схема замещения полевого транзистора

Схема замещения справедлива для всех типов полевого транзистора.



$C_{зи}$, $C_{зс}$, $C_{си}$ – межэлектродные емкости - оказывают влияние на в области верхних частот.
 $SU_{зи}$ – источник тока, отражающий влияние $U_{зи}$ на ток $I_{с}$.
 r_i – внутренне сопротивление - учитывает влияние напряжения $U_{си}$ на ток $I_{с}$.
 $r_{вх}$ – входное сопротивление транзистора (пренебрегаем).

Граничная частота единичного усиления: $f_T = 1/(2\pi\tau)$, где $\tau = C_{зи} / S_0$.

В отличие от биполярного транзистора, в схемах на ПТ зависимость крутизны S от частоты можно не учитывать до сотен МГц.