

схемотехника

Лекция № 5.
БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ
КАСКАДОВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

частотные свойства эквивалентной схемы биполярного транзистора с общим эмиттером

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

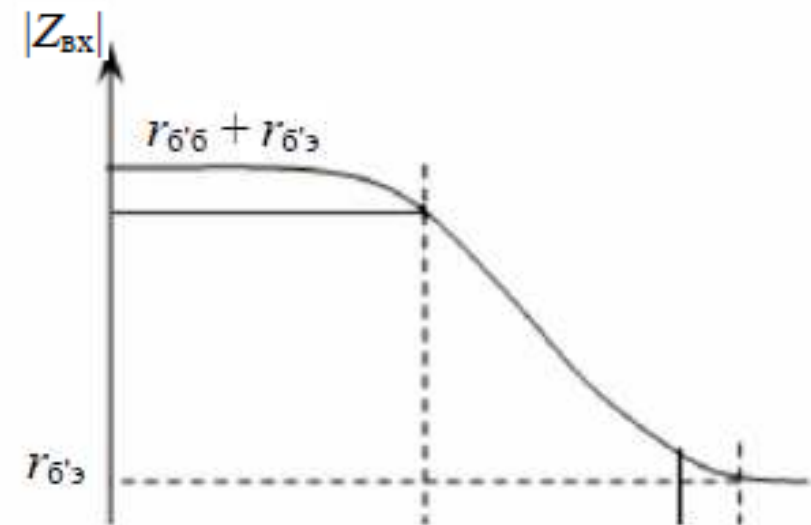
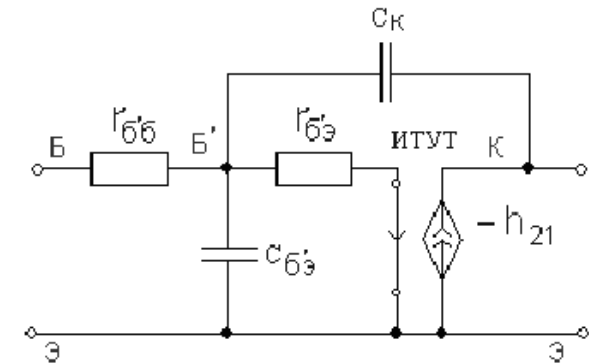
Входное сопротивление: $Z_{ВХ} = r_{б'б} \frac{r_{Б'Э}}{1 + j\omega C_0 r_{Б'Э}}$.

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.

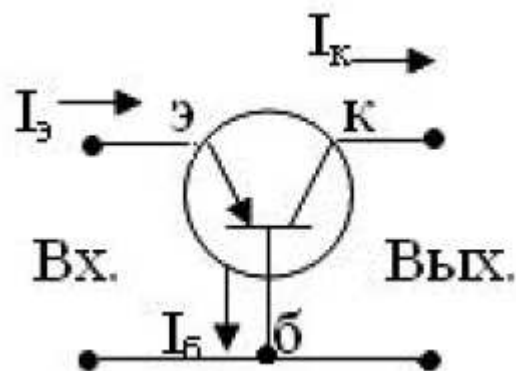
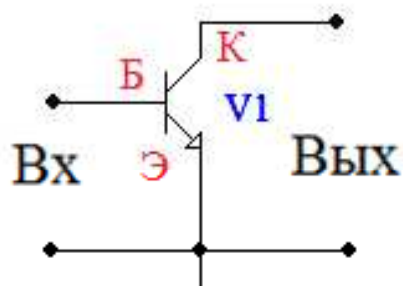
Способы включения биполярных транзисторов

Выбор схемы включения зависит от конкретных требований к данной схеме.

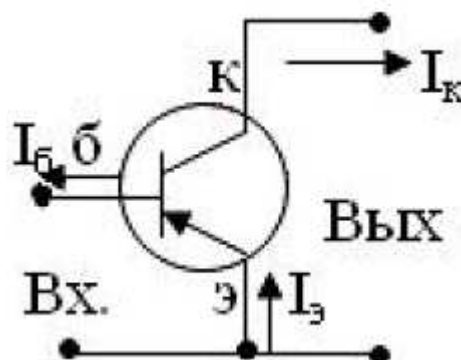
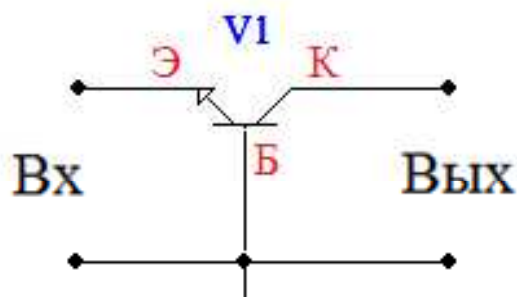
Один из электродов транзистора является общей точкой входа и выхода каскада.

Различают три схемы включения транзистора.

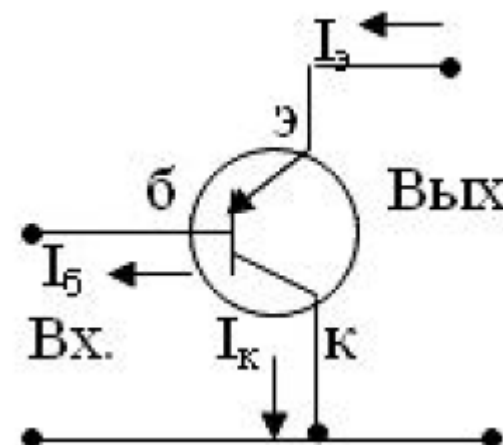
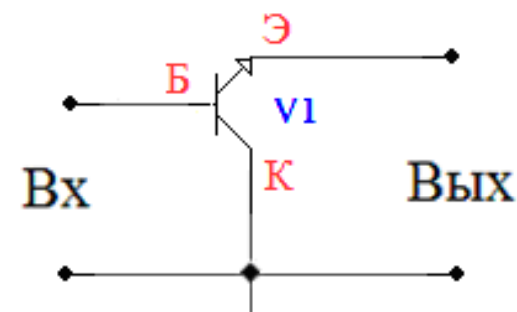
➤ Схема БТ с ОЭ



➤ Схема БТ с ОБ



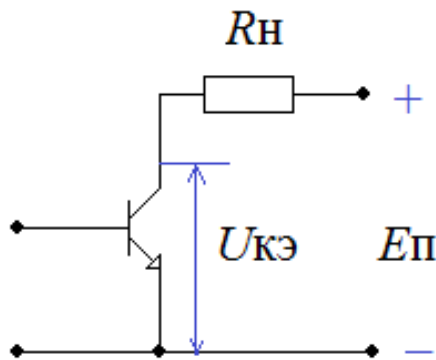
➤ Схема БТ с ОК



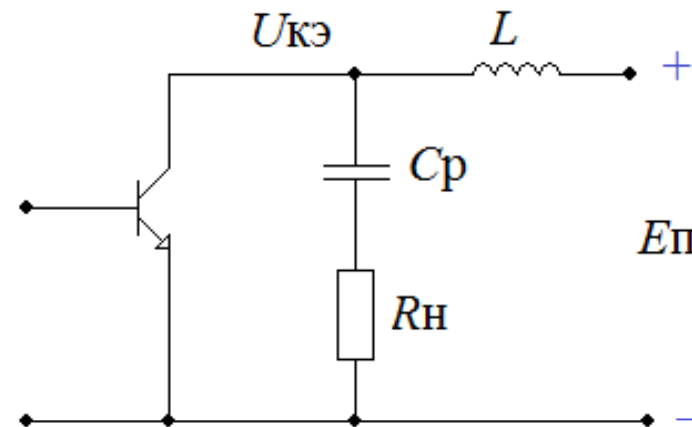
требования к цепям питания усилительных элементов

Для обеспечения режима используют две **схемы питания**:

последовательного



параллельного



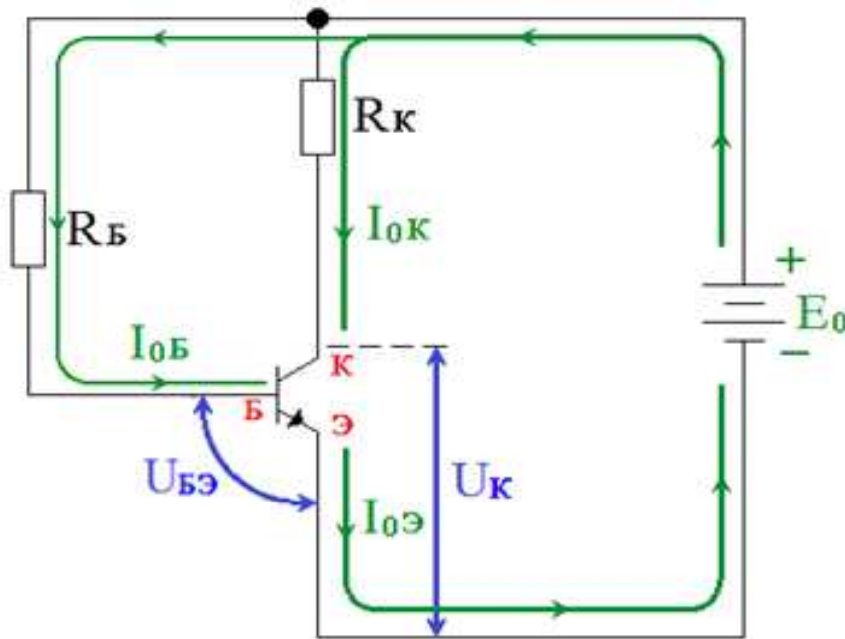
К цепям смещения предъявляются особые требования:

- 1) задать выбранное значение и полярность напряжения для положения рабочей точки;
- 2) обеспечить положение точки покоя в заданном положении при воздействии дестабилизирующих факторов.

Если выполняется только первое требование, то это – нестабилизированные цепи питания. Если оба требования выполняются одновременно, то это – стабилизированные цепи питания.

Нестабилизированные цепи питания

Цепь смещения с фиксацией тока базы и напряжения база-эмиттер



Из закона Кирхгофа для напряжений (ЗКН):

$$I_{Б0} = (E_0 - U_{БЭ}) / R_B,$$

или $E_0 \gg U_{БЭ}$, то $I_{Б0} \approx E_0 / R_B$.

Среднее значение коэффициента усиления:

$$h_{21Э} = \sqrt{h_{21Э_{\min}} \cdot h_{21Э_{\max}}}$$

Для выходной цепи ЗКН: $E_K = U_K + R_K \cdot I_K$.

Ток коллектора : $I_{K0} = h_{21} \cdot I_{Б0}$

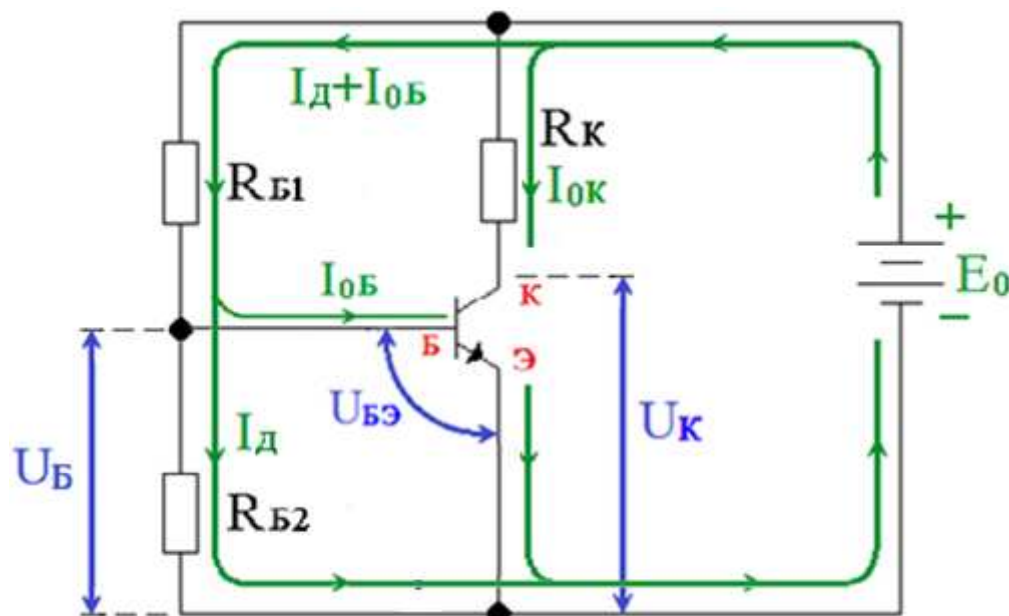
Причины неустойчивости статических характеристик :

- технологический разброс параметров от транзистора к транзистору;
- сильная их зависимость от температуры.

Вывод: ток смещения $I_{Б0}$ не зависит от параметров транзистора и от температуры перехода.

Но коэффициент усиления тока базы $h_{21} = f(t^0)$,
нет обратной связи между токами I_{K0} и $I_{Б0}$.

Цепь смещения фиксированным напряжением база— эмиттер $U_{БЭ}$ (автоматического смещения)



Из закона Кирхгофа для напряжений (ЗКН):

$$E = I_D \cdot R_2 + I_{\text{б0}} \cdot R_1 + I_D \cdot R_1$$

Т.к. ток делителя: $I_D \approx (8 \dots 12) \cdot I_B$, то
 $I_D = E_0 / (R_{Б1} + R_{Б2})$.

Закон Ома для входной цепи:

$$U_B = I_D \cdot R_{Б2} = \text{const.}$$

Для выходной цепи ЗКН:

$$E_K = U_K + R_K \cdot I_K$$

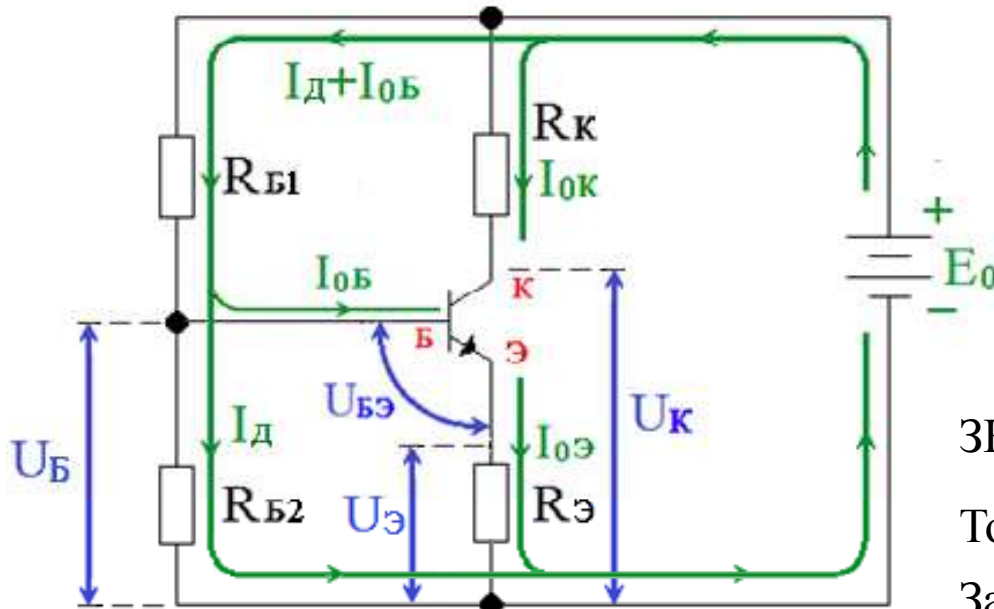
Ток коллектора : $I_{K0} = h_{21} \cdot I_{Б0}$

Среднее значение коэффициента усиления: $h_{21Э} = \sqrt{h_{21Э\text{min}} \cdot h_{21Э\text{max}}}$

Вывод: Термостабилизации такой схемы недостаточно, поэтому необходимо ввести обратную связь между токами I_{K0} и $I_{Б0}$.

Стабилизация режима транзистора.

Схема с эмиттерной стабилизацией рабочей точки



ООС последовательная по току.

Закон Кирхгофа: $U_{БЭ} = U_B - U_{Э}$.

Закон Ома: $U_{Э} = I_{Э0} \cdot R_{Э}$.

$U_{Э} \approx (0.1 \dots 0.2) \cdot E_0$.

ЗКН: $E = I_D \cdot R_2 + I_{\text{до}} \cdot R_1 + I_D \cdot R_1$

Ток делителя: $I_D \approx (8 \dots 12) \cdot I_B$

Закон Ома для входной цепи: $U_B = I_D \cdot R_{Б2}$.

Входное сопротивление:

$$R_{ВХ} = r_{\text{б}} + r_{\text{э}} (1 + h_{21\text{э}})$$

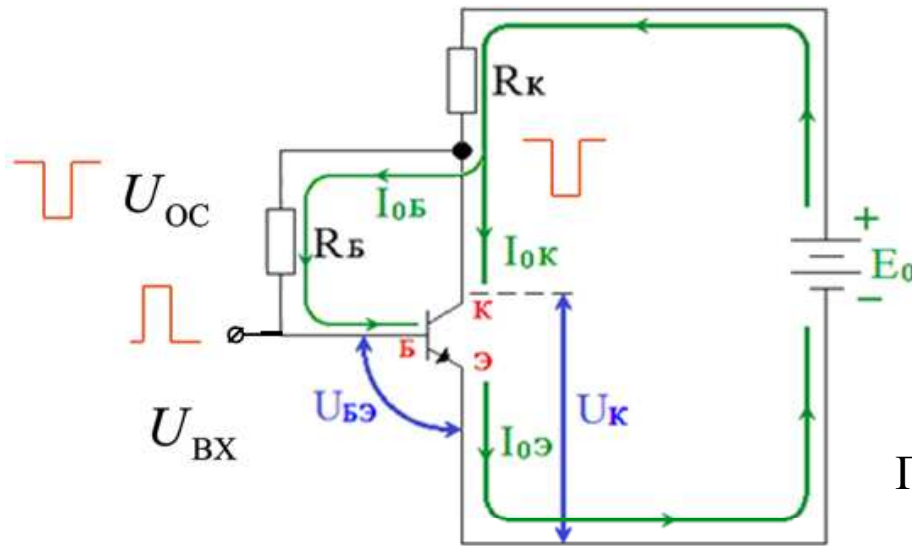
Для выходной цепи ЗКН: $E_K = U_K + R_K \cdot I_K$.

Ток коллектора : $I_{K0} = h_{21} \cdot I_{B0}$

Механизм стабилизации: $t^0 \uparrow \rightarrow I_{K0} \uparrow \rightarrow U_{БЭ} \downarrow \rightarrow I_{B0} \downarrow \rightarrow I_{K0} \downarrow$.

Для того, чтобы коэффициент усиления не упал, $R_{Э}$ по переменному току закорачивают параллельно подключенным к нему блокировочным конденсатором $C_{Э}$.

Схема с коллекторной стабилизацией рабочей точки



ООС параллельная по напряжению.

Закон Кирхгофа: $E_0 = I_{Э0} \cdot R_K + I_{Б0} \cdot R_B + U_{БЭ}$.

Для выходной цепи ЗКН: $E_K = U_K + R_K \cdot I_K$.

Ток коллектора : $I_{К0} = h_{21} \cdot I_{Б0}$

Принимая $I_{Э0} \approx I_{К0}$, получим $U_{КЭ} = E_0 - I_{Э0} \cdot R_K$.

$$I_{Б0} = (U_{КЭ} - U_{БЭ}) / R_B.$$

Входное сопротивление: $R_{ВХ} = R_B$.

Механизм стабилизации: $t^0 \uparrow \rightarrow I_{К0} \uparrow \rightarrow U_{КЭ} \downarrow \rightarrow I_{Б0} \downarrow \rightarrow I_{К0} \downarrow$.

Для того, чтобы коэффициент усиления не упал, $R_{Э}$ по переменному току закорачивают параллельно подключенным к нему блокировочным конденсатором $C_{Э}$.

Эквивалентные схемы каскадов по постоянному току

Цепь смещения с фиксацией тока базы и напряжения база-эмиттер

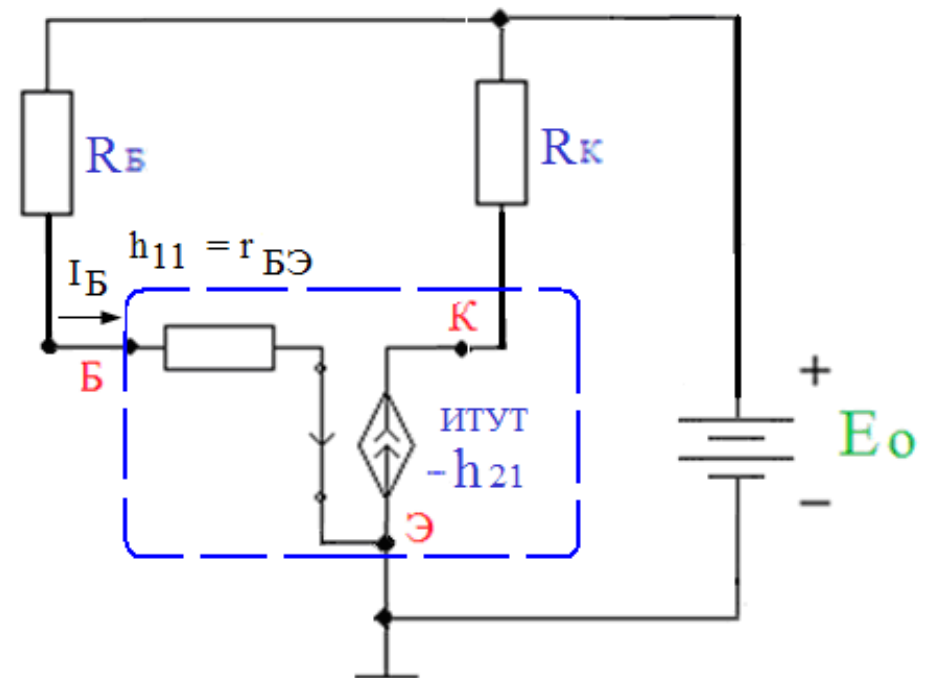
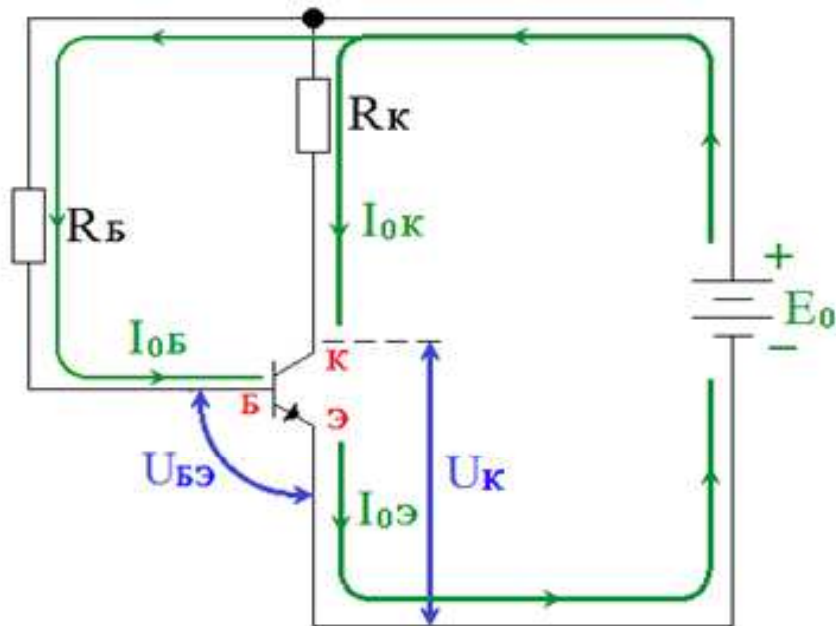
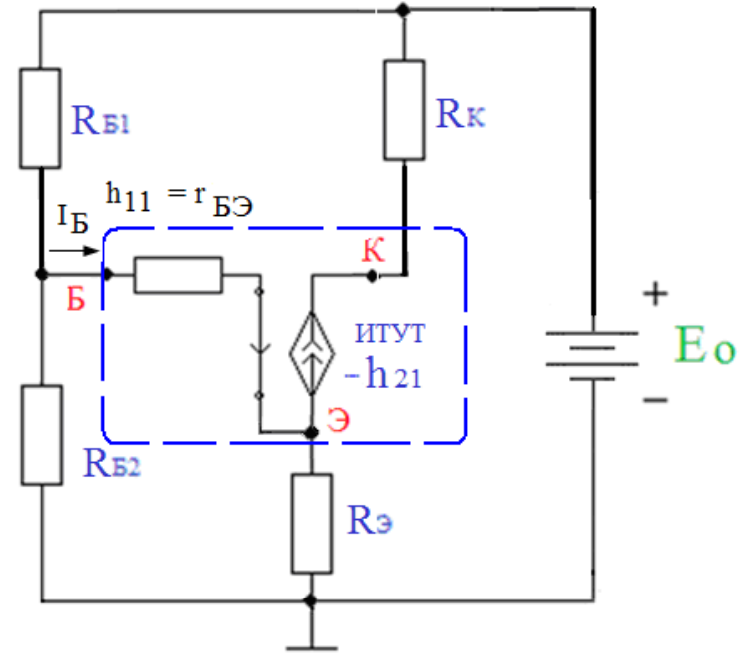
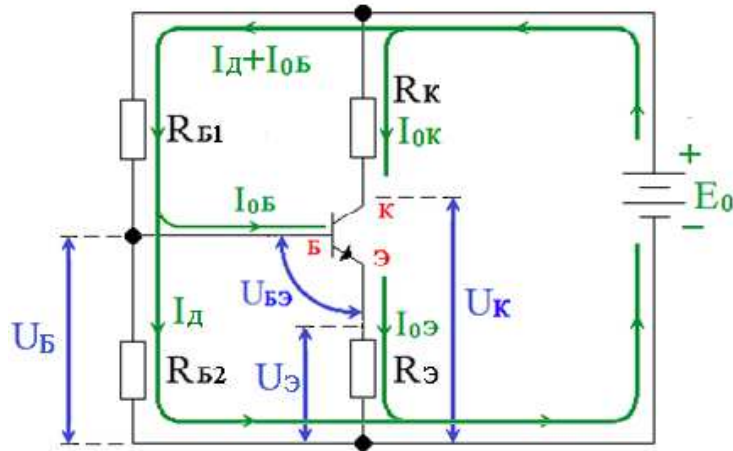


Схема с эмиттерной стабилизацией рабочей точки



Глубина обратной связи (возвратная разность):

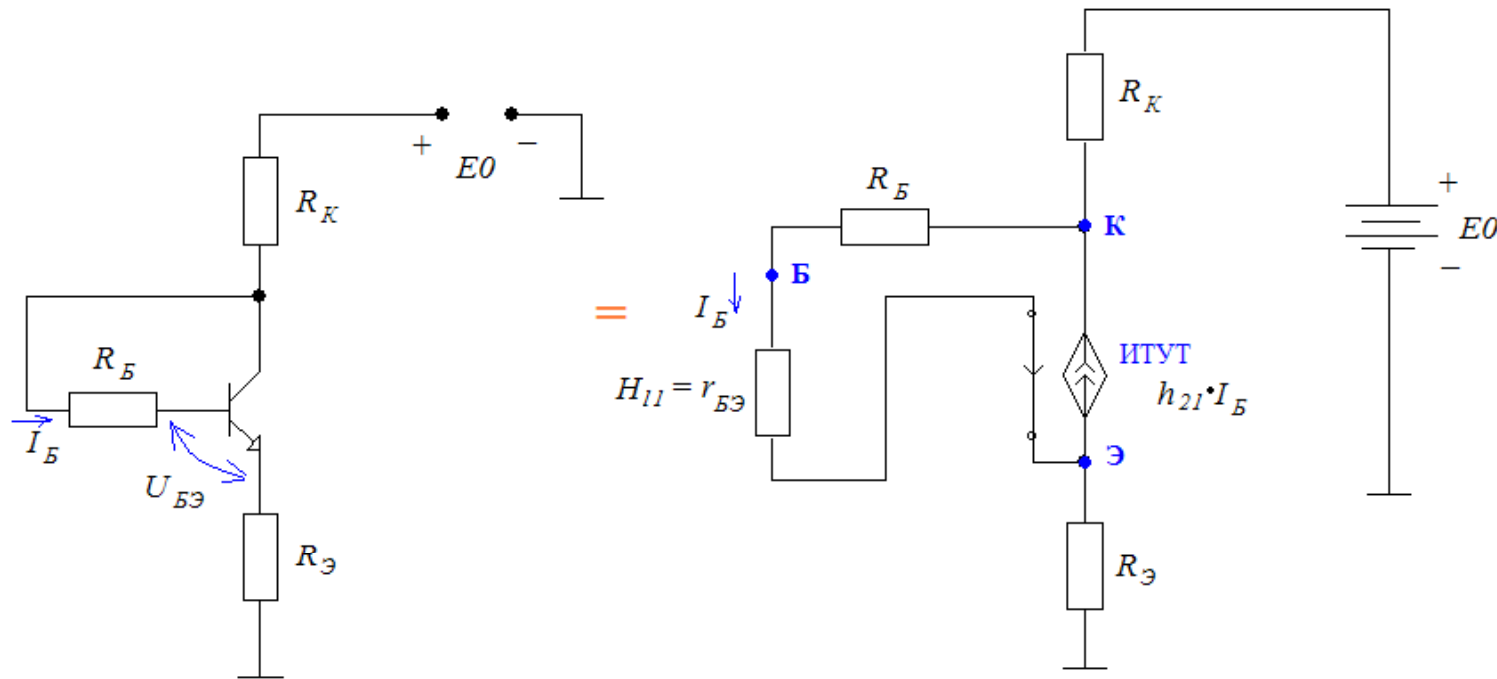
$$F = 1 + K \cdot \beta = \frac{\Delta}{\Delta^{(0)}} = 1 + \frac{R_{\mathfrak{I}} \cdot h_{21} \cdot (R_{B1} + R_{B2})}{(h_{11} + R_{\mathfrak{I}}) \cdot (R_{B1} + R_{B2}) + R_{B1} \cdot R_{B2}} = 1 + \frac{R_{\mathfrak{I}} \cdot h_{21}}{h_{11} + R_{\mathfrak{I}} + R_B} \approx 1 + \frac{R_{\mathfrak{I}} \cdot h_{21}}{h_{11}}$$

$$\text{Здесь } R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \quad h_{11} \gg R_{\text{Э}}, R_B.$$

$$R_{BXOC} = \frac{U_{BЭ}}{I_B} = \frac{R_{B2} \cdot (R_{Э} \cdot h_{21} + h_{11} + R_{Э})}{R_{B2}} \approx h_{11} + R_{Э} \cdot h_{21} = h_{11} \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{R_{Э} \cdot h_{21}}{h_{11}}\right)}_{K \cdot \beta}$$

То есть входное сопротивление \uparrow в $(1 + K \cdot \beta)$ раз.

Схема с коллекторной стабилизацией рабочей точки



$$R_{\text{BX OC}} = U_{\text{BX}} / I_{\text{Б}}.$$

Эквивалентная схема по постоянному току:

$$R_{\text{BX OC}} = H_{11} + R_{\text{Э}} \cdot h_{21} = H_{11} \cdot (1 + R_{\text{Э}} \cdot h_{21} / H_{11}).$$

Возвратная разность:

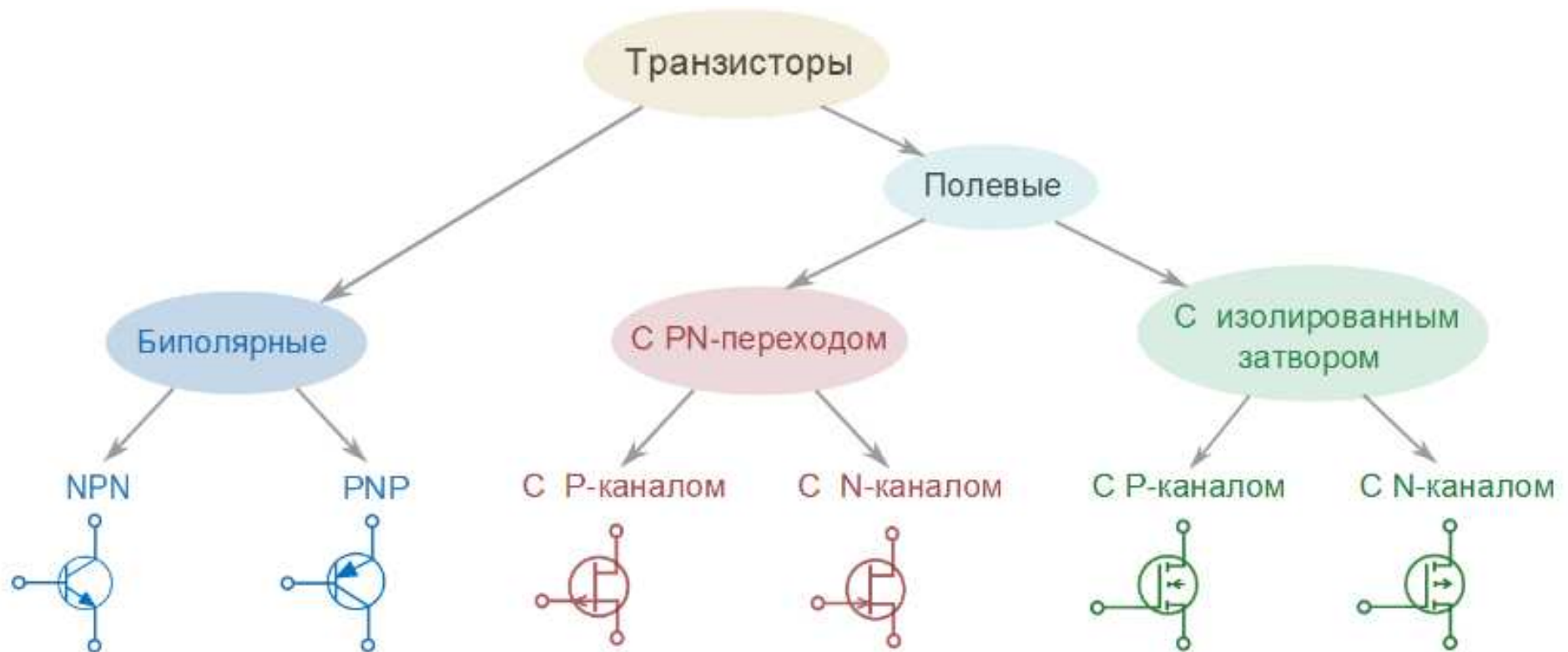
$$F = 1 + \frac{h_{21} \cdot (R_K + R_{\text{Э}})}{H_{11} + R_B + R_K + R_{\text{Э}}}$$

схемотехника

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ.

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, $i_{\text{вх}} \approx 0$.

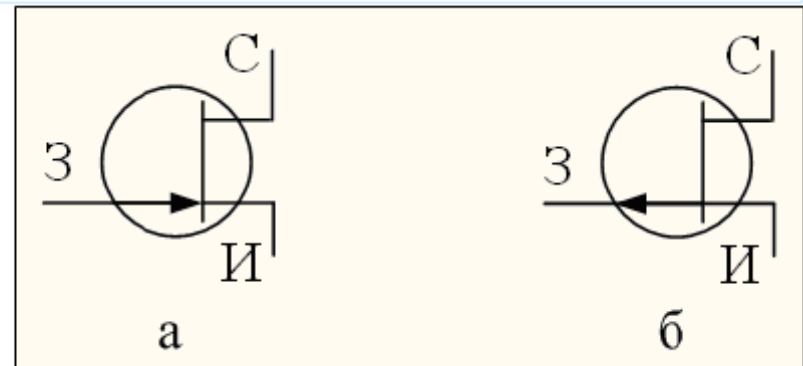
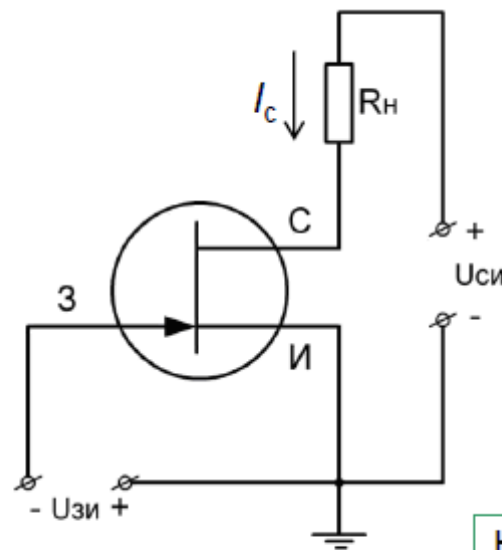
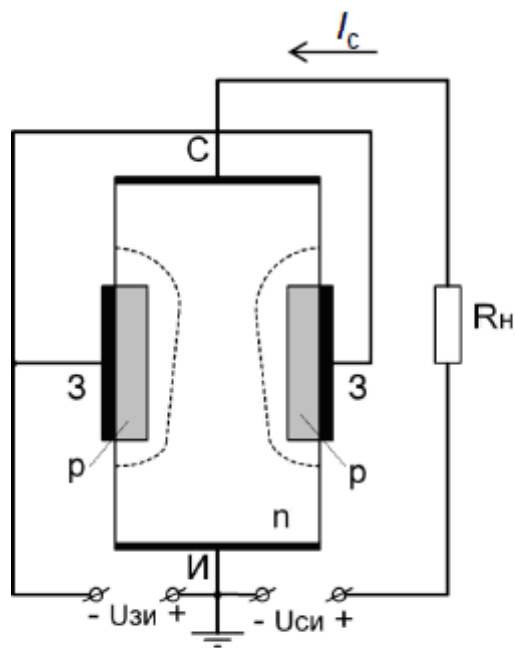
Полевые транзисторы с управляющим p – n –переходом (JFET)

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.

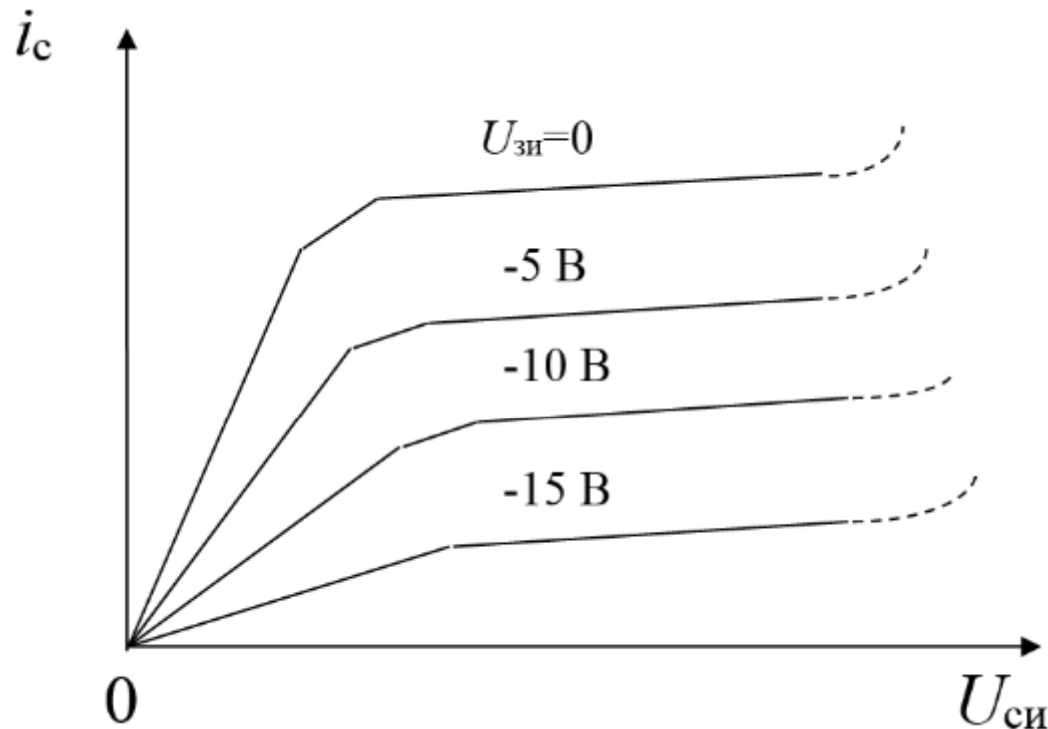
Если на затвор подать напряжение $U_{зи}$ с полярностью, противоположной указанной на рисунке, то оба перехода получают прямое смещение и входное сопротивление транзистора будет мало. Такой режим для данного транзистора – **НЕРАБОЧИЙ !!!**

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:

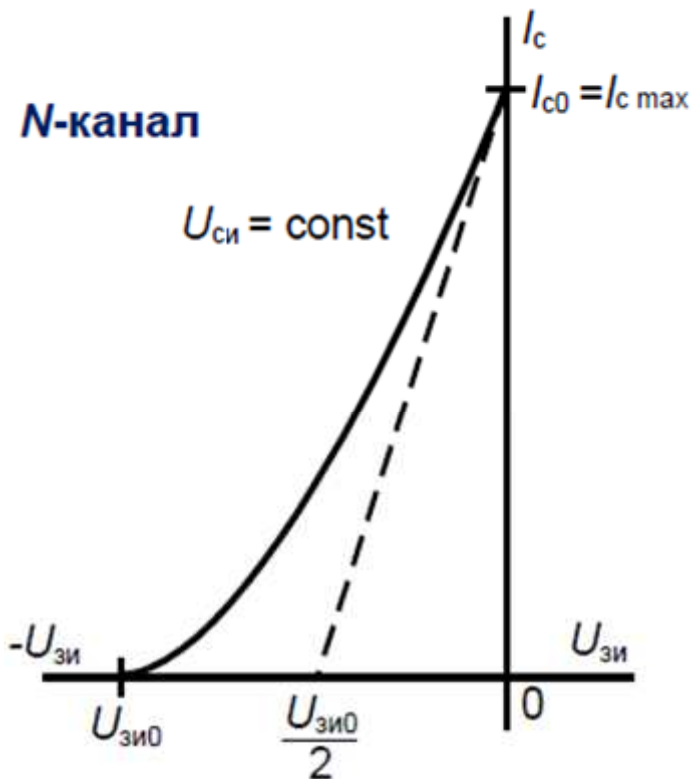
$U_{си, \text{нас}}$ — напряжение насыщения;

$I_{C, \text{нач}}$ — 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

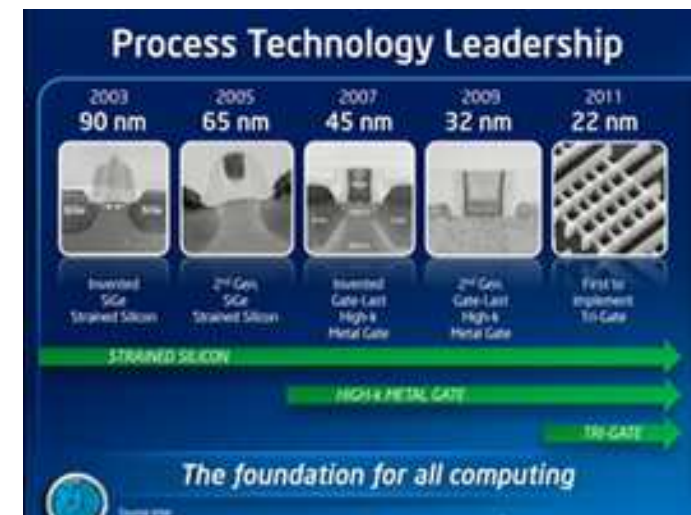
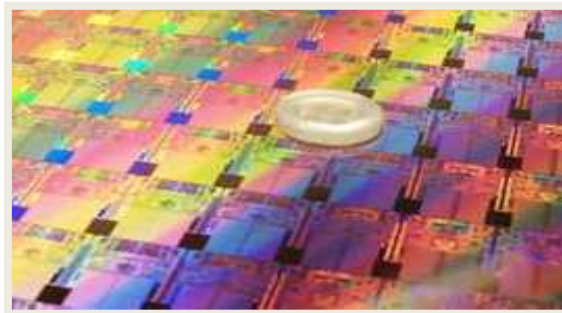
Входное сопротивление определяется сопротивлением обратносмещенных p - n -переходов и составляет $r_{BX} = 10^8 \dots 10^9$ Ом:

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

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

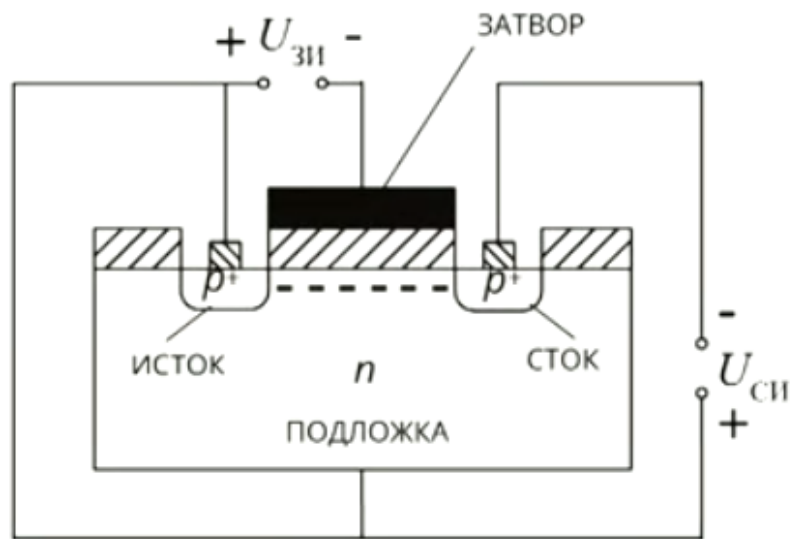
Межэлектродные ёмкости транзистора обусловлены наличием p - n -переходов, примыкающих к истоку и к стоку.

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



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

Полевые транзисторы с изолированным затвором

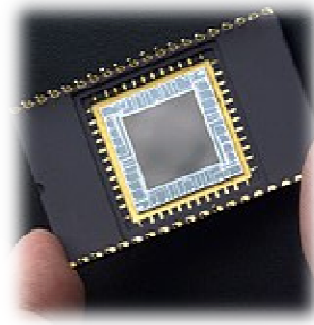
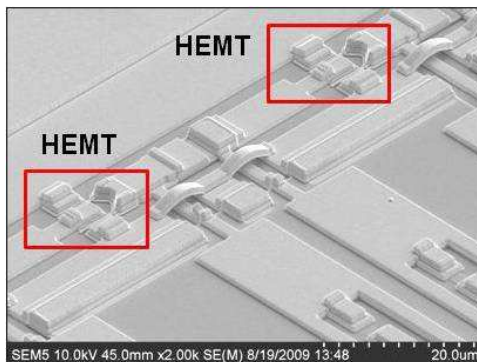


Эти транзисторы называют МДП- (металл–диэлектрик–полупроводник) или МОП- (металл – оксид – полупроводник) транзисторами.

Разновидности МДП-транзисторов:

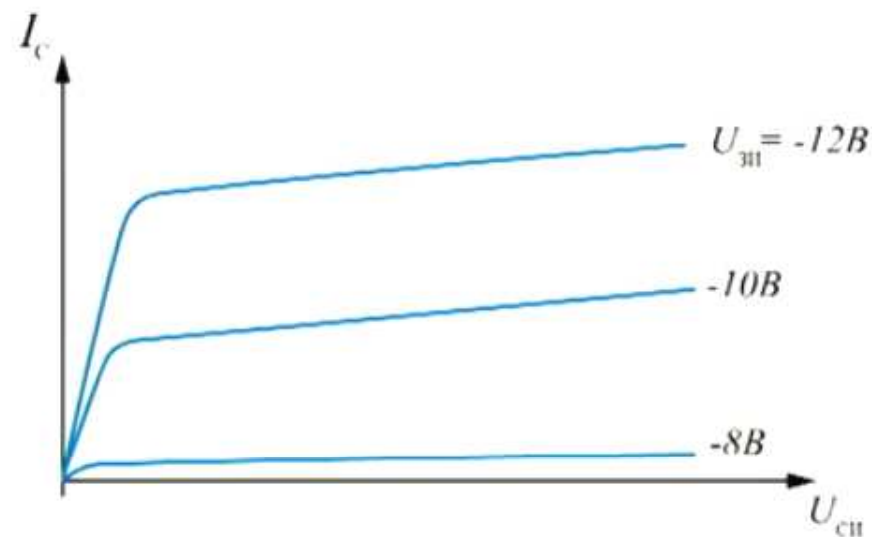
- а)* с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам);
- б)* со встроенным каналом (канал создается при изготовлении).

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.

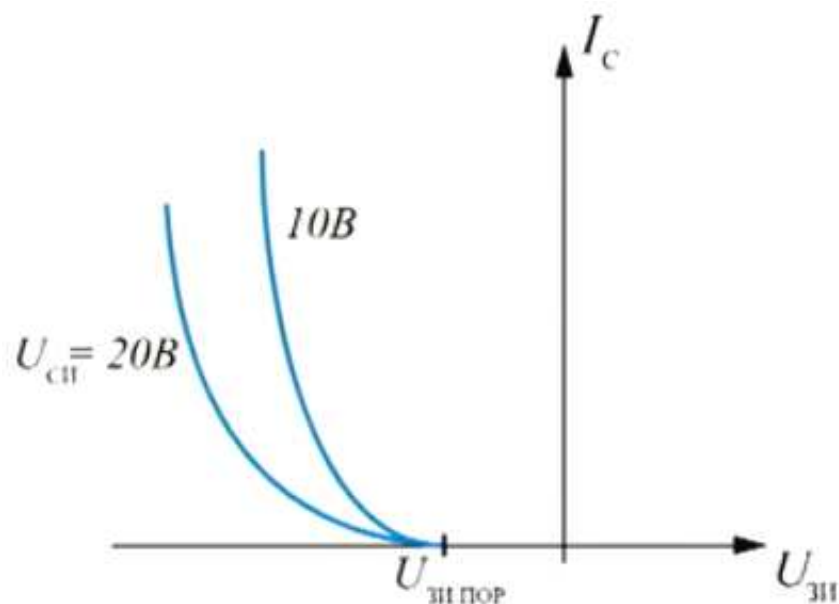


статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором

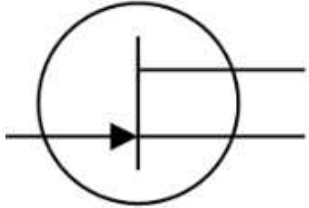
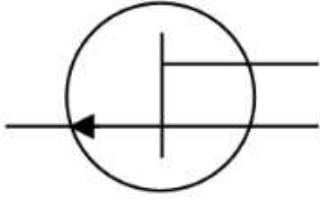
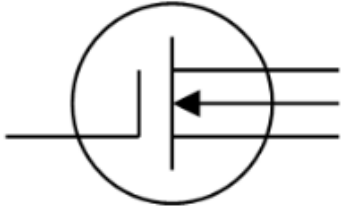
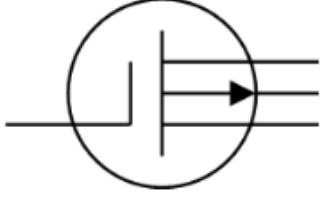
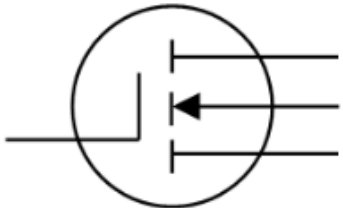
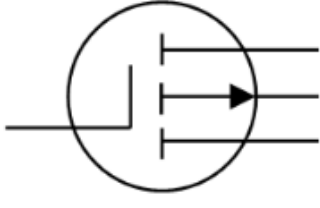
❑ Выходные (стоковые) характеристики



❑ 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

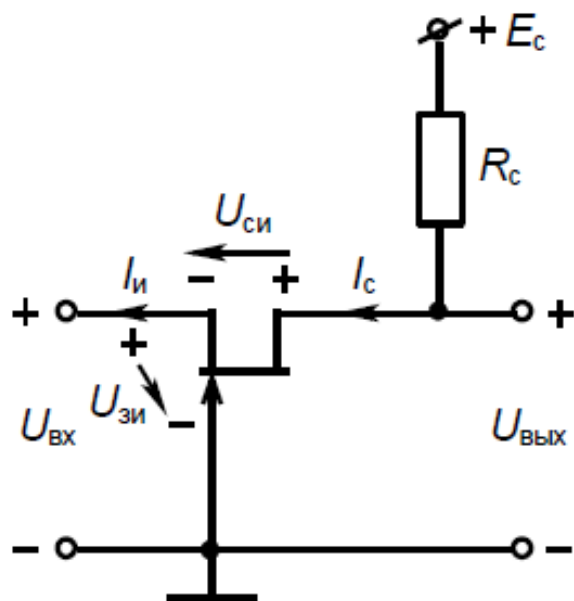
- ✓ высокое входное сопротивление,
- ✓ высокая термическая радиационная стойкость,
- ✓ большая плотность упаковки элементов, которая позволяет создавать микросхемы с очень высокой степенью интеграции в едином технологическом процессе

ПРИМЕНЕНИЕ:

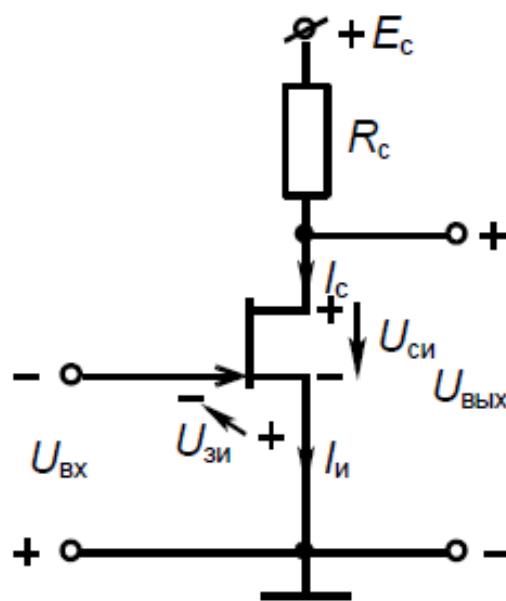
- ☐ Основа цифровых и аналоговых интегральных схем;
- ☐ Ждущие и следящие устройства;
- ☐ Основа flash-памяти;
- ☐ CCD – матрицы (приборы с зарядовой связью);
- ☐ Электронные ключи;
- ☐ Логические элементы;

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

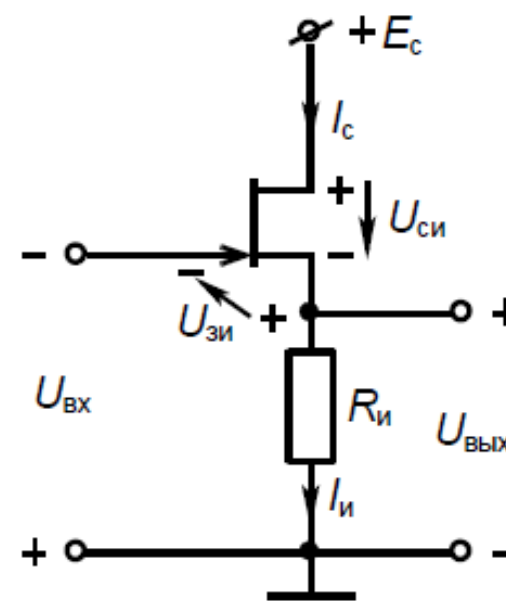
Общий исток (ОИ)



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 $U_{1\sim} = 0$;

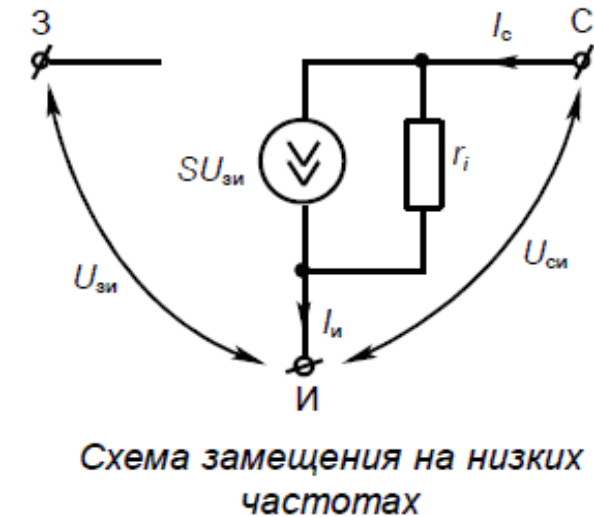
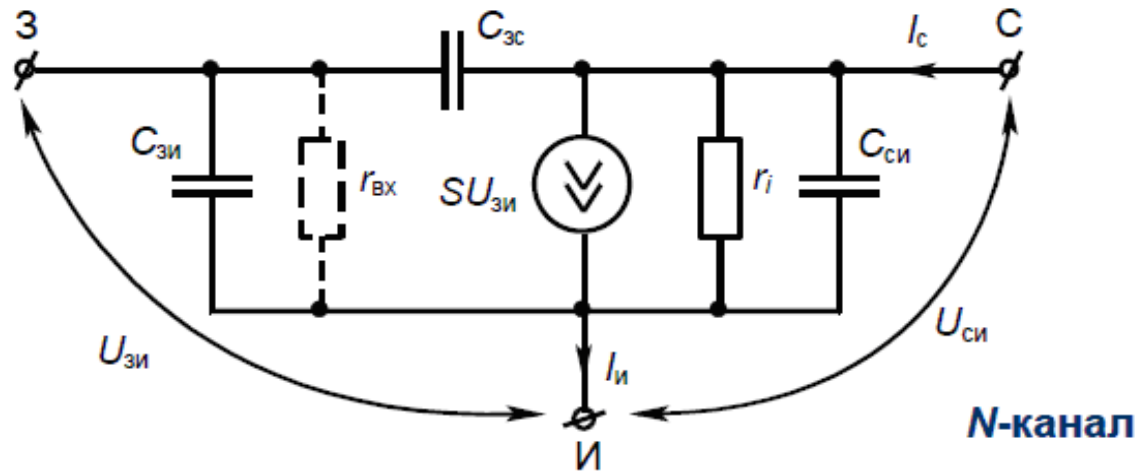
g_{21} – проводимость прямой передачи при $U_{2\sim} = 0$;

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.