Биполярный транзистор

Oleg Stukach

TPU, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: tomsk@ieee.org

МНОГОПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Взаимодействие нескольких p-n-переходов позволяет выполнить электрически управляемые (усилительные) элементы, являющиеся основными компонентами современной электроники

Полупроводниковый триод

- Полупроводниковый триод -три вывода
- Биполярный - в электропроводности участвуют два типа носителей: основные и неосновные
- Транзистор -электрически управляемый резистор, элемент электрически управляемые и способные работать как в непрерывном (линейном) режиме управления, так и в ключевом

Полупроводниковый триод

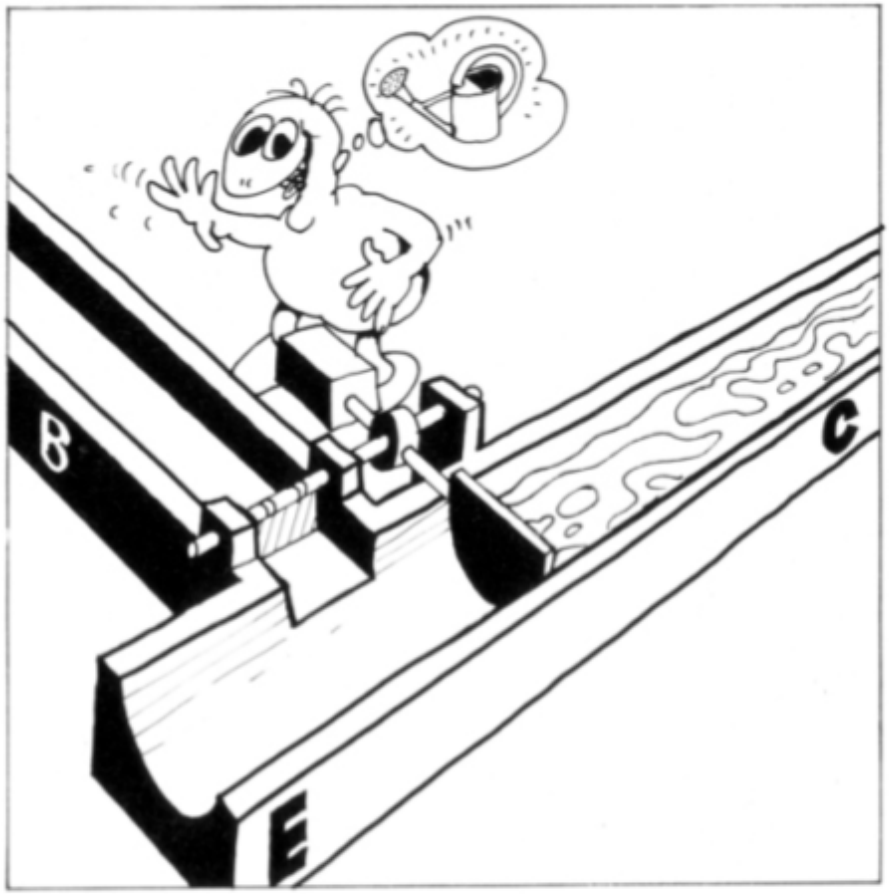
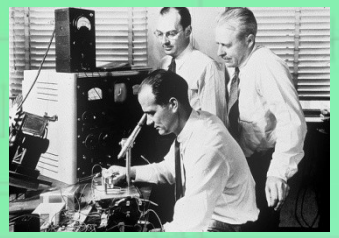
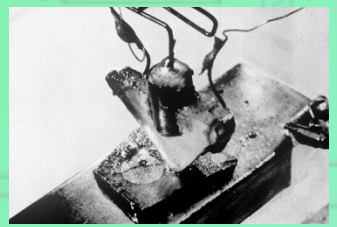


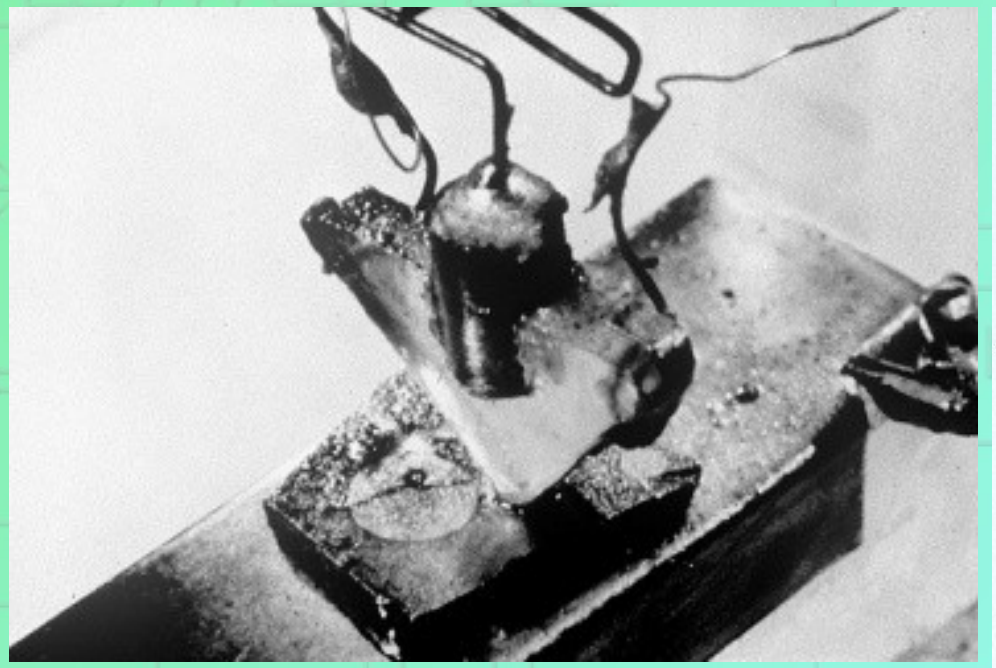
Bild 60. „Wasser-Transistor" (gesperrter Zustand)

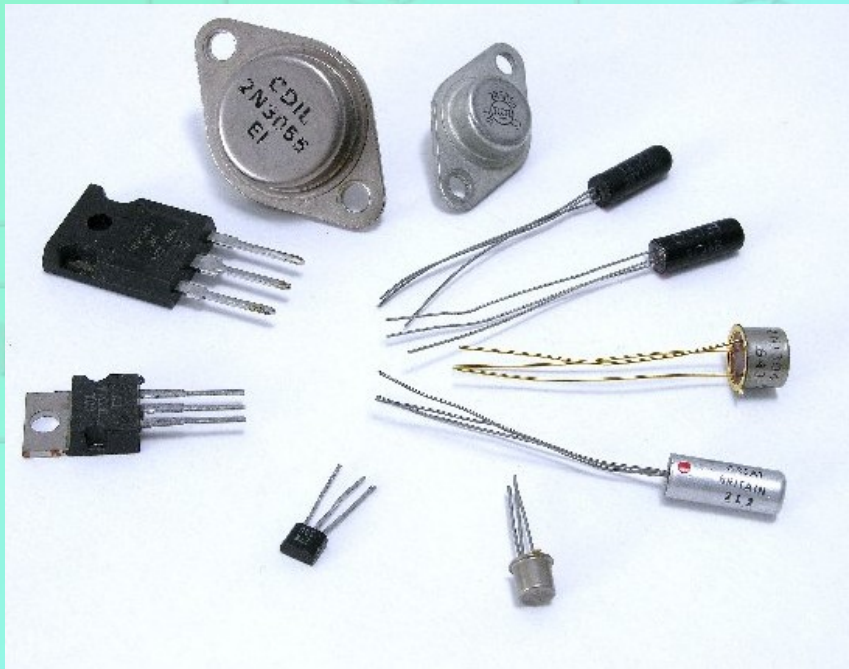
Bild 61. „Wasser-Transistor" (leitender Zustand)





Полупроводниковый триод



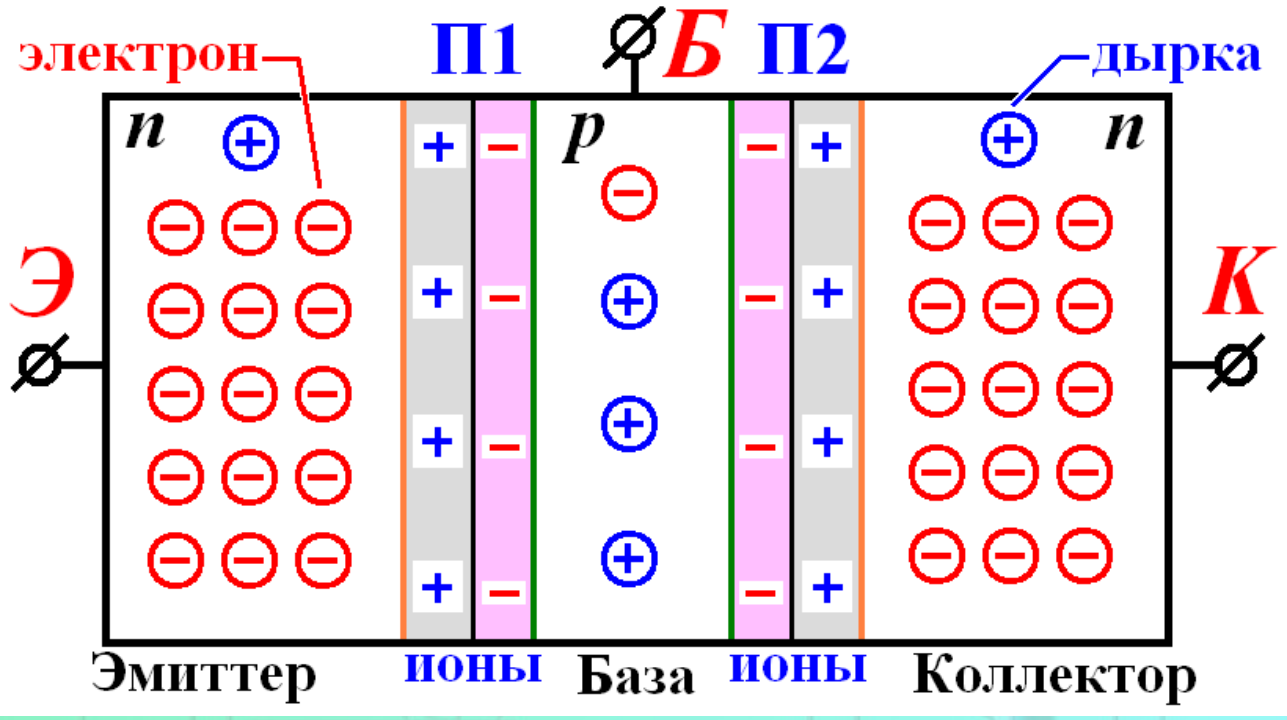


Биполярный транзистор

Тип транзистора с тремя слоями полупроводника.

Различают ***n-p-n*** и ***p-n-p*** транзисторы, где ***n*** (*negative*) – электронный тип примесной проводимости, ***p*** (*positive*) – дырочный. Основные носители заряда: электроны и дырки

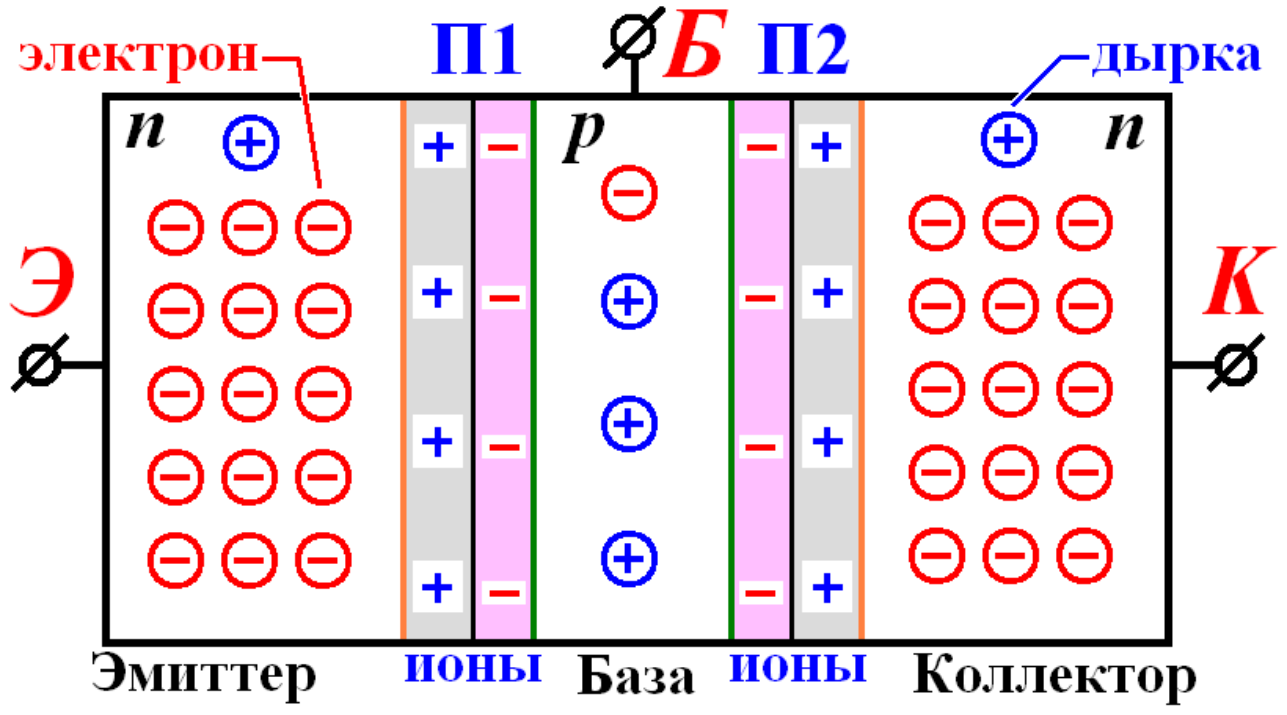
Включение транзистора



Эмиттер (Э), Коллектор (К): основные заряды электроны, не основные дырки;

База (Б): основные заряды дырки, не основные электроны; ***p-n*** переходы **П1**, **П2** образованы ионами полупроводника.

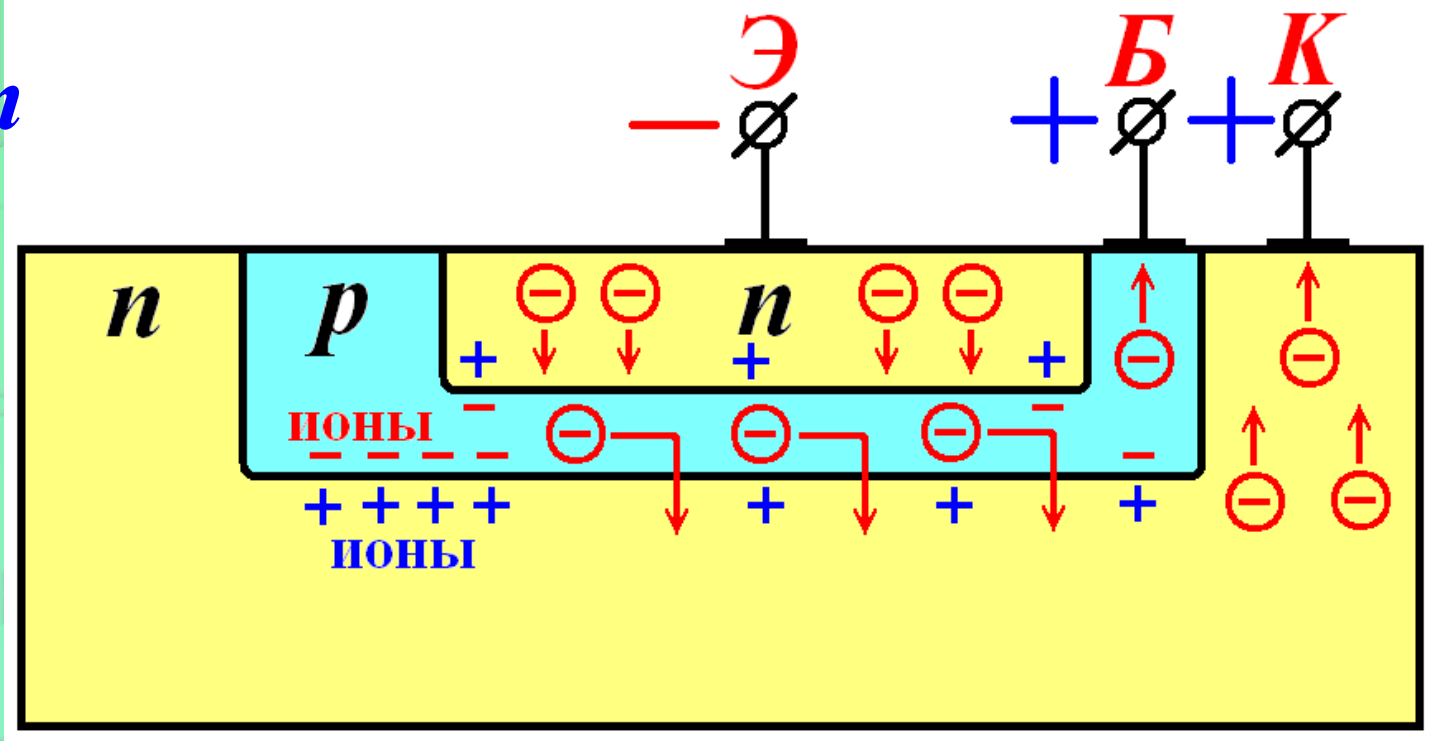
Включение транзистора



Биполярный транзистор имеет три вывода: эмиттер (от “эмиссия”), коллектор (“собирать”), база (основание). Управляющим является переход база-эмиттер, а нагрузочная цепь включается или в цепь коллектор-база (схема с общей базой - ОБ), или в цепь коллектор-эмиттер (схема с общим эмиттером - ОЭ)

Включение транзистора

n-p-n

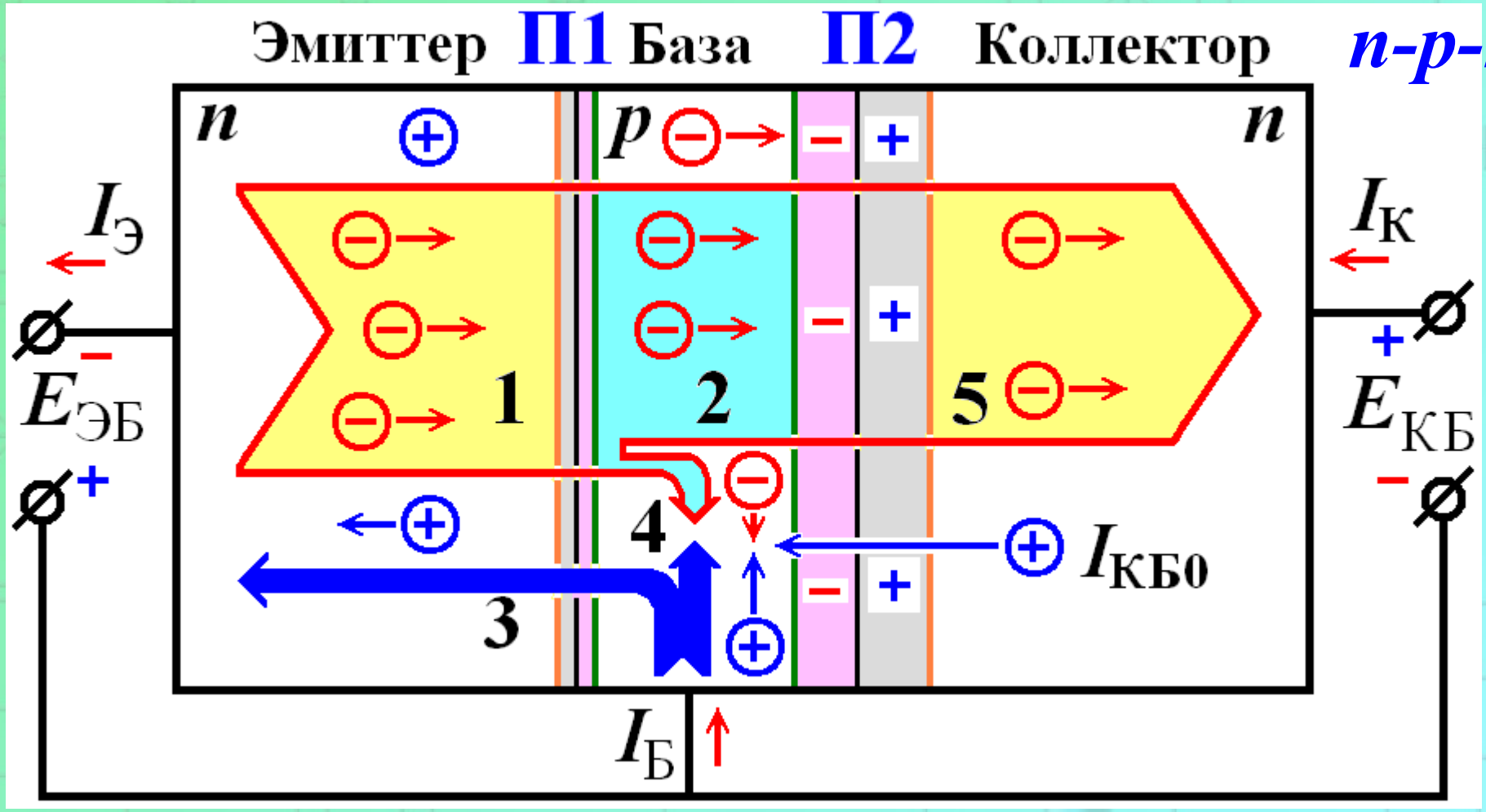


База вызывает электроны из эмиттера, но переход эмиттер – коллектор для них открыт (здесь они не основные заряды) и большая часть уходит в коллектор, совсем немного доходит до базы. За счет этого происходит усиление базового тока (ток коллектора).

Активный режим работы *n*-*p*-*n* транзистора

Эмиттерный переход смещён в прямом направлении (открыт), коллекторный переход – в обратном направлении (закрыт). Электроны (основные заряды в эмиттере) проходят открытый переход эмиттер-база в базу. Часть электронов рекомбинирует с основными зарядами в базе (дырками). На электроны не действует потенциал коллектора, т.к. этот переход закрыт.

Двигаясь хаотически по узкой базе они случайным образом попадают в коллектор, поскольку в базе электроны не основные заряды и коллекторный переход для них открыт. Базу делают очень тонкой с малым количеством примесей, поэтому большая часть электронов из эмиттера попадает в коллектор.



активный режим:

смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного перехода – в обратном направлении.

Обозначения на рисунке:

1 – инжекция электронов из источника питания $E_{ЭБ}$;

2 – диффузия электронов в базе;

3 – инжекция дырок в эмиттер, ***p-n*** переход открывается;

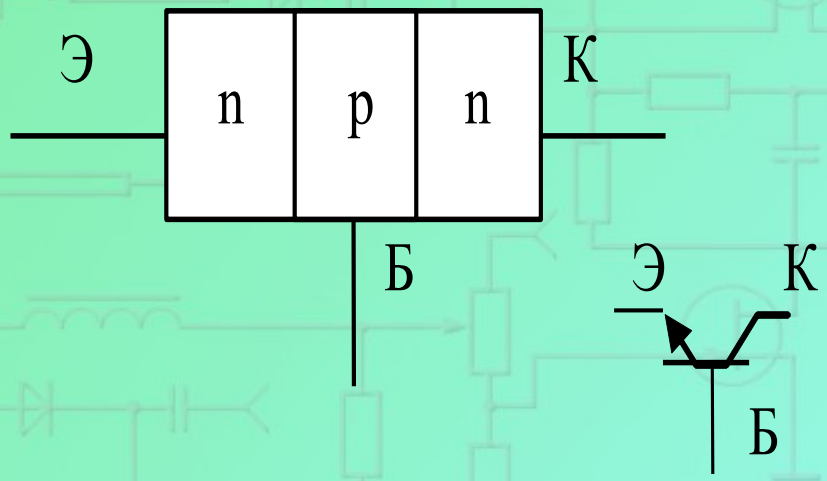
4 – рекомбинация электронов и дырок, ток базы;

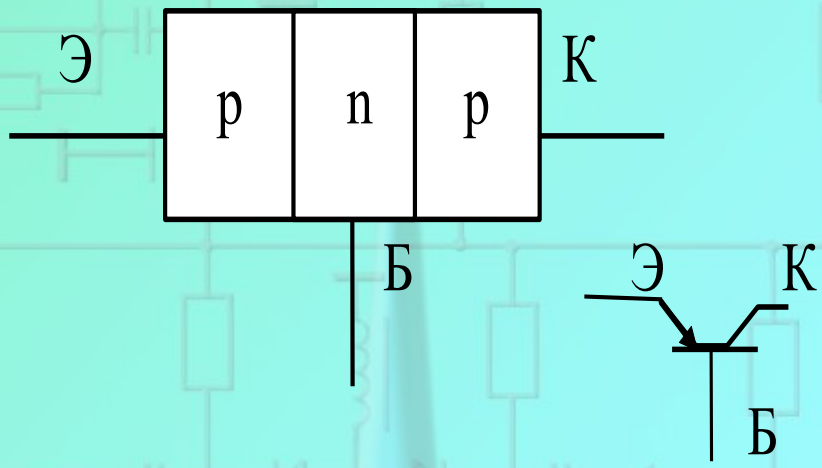
5 – экстракция (втягивание электронов) в коллектор под действием источника питания $E_{КБ}$, ток коллектора.

$E_{ЭБ}$ – источник питания своим потенциалом открывающий ***p-n*** переход **П1**;

$E_{КБ}$ – источник питания, закрывающий ***p-n*** переход **П2** для основных зарядов. Величина напряжения выбирается для усиления напряжения и мощности в нагрузке цепи коллектора.

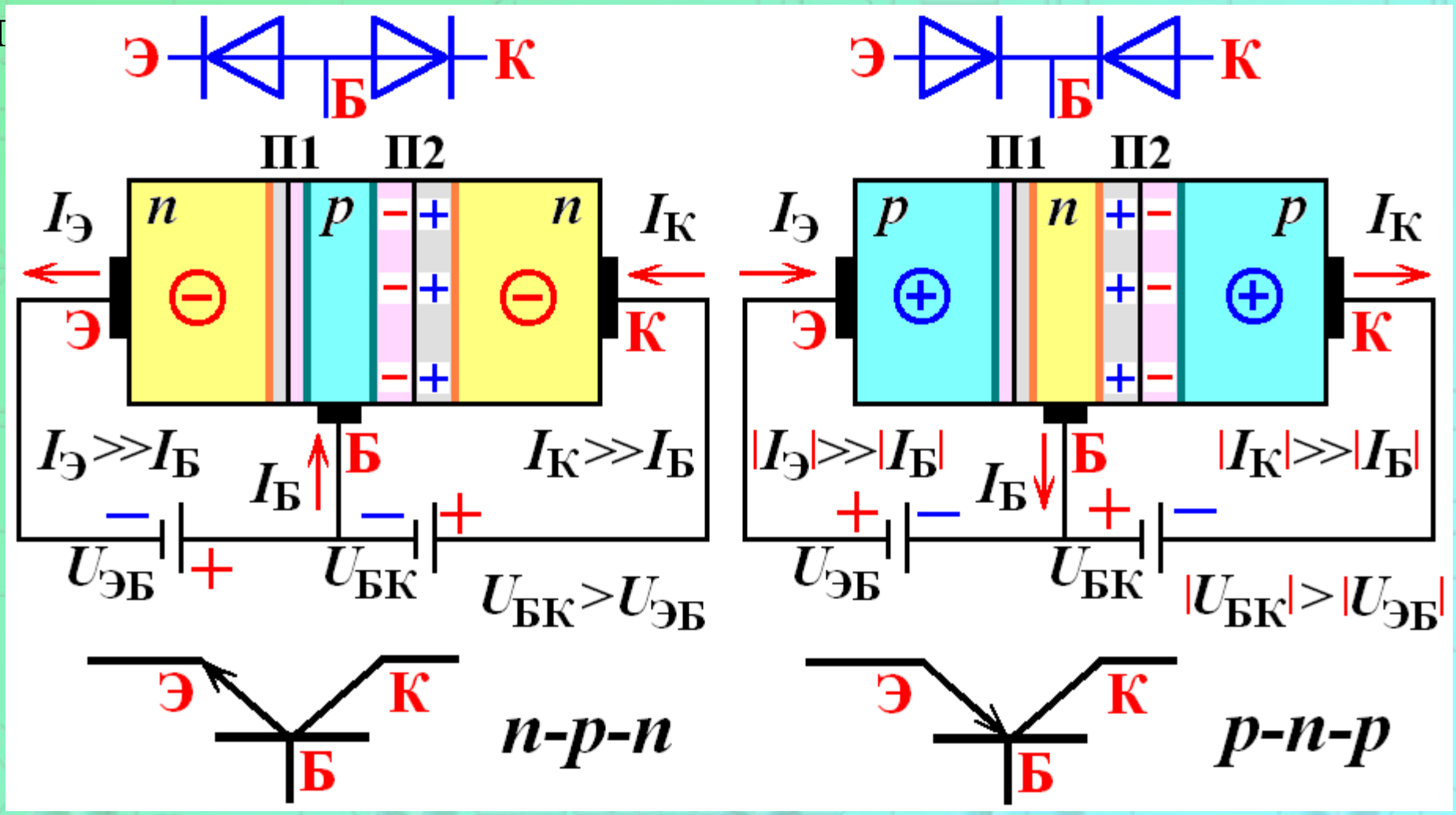
Схематическое изображение и условные обозначения





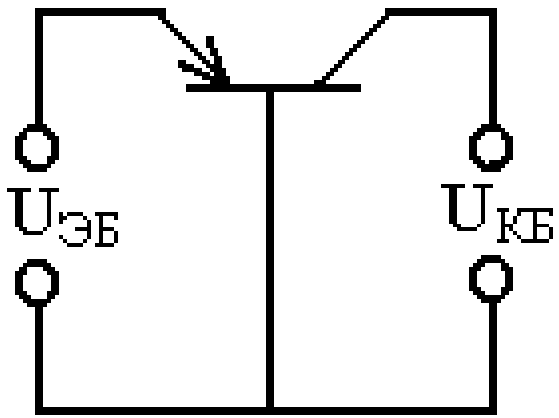
Биполярные транзисторы *n-p-n* и *p-n-p* типа

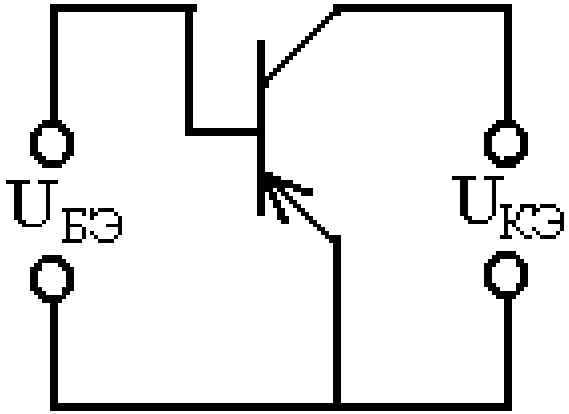
Применение: усиление электрических сигналов

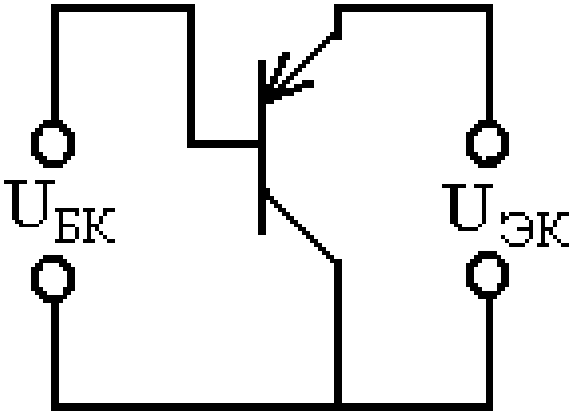


Схемы включения БТ:

с общей базой (ОБ),
общим эмиттером (ОЭ),
общим коллектором (ОК) .







ОБ **ОЭ** **ОК**

Режимы транзистора

активный (линейный) режим - коллекторный переход заперт, эмиттерный - открыт;

режим отсечки (разомкнутый ключ) - оба перехода заперты;

режим насыщения (замкнутый ключ) - оба перехода открыты

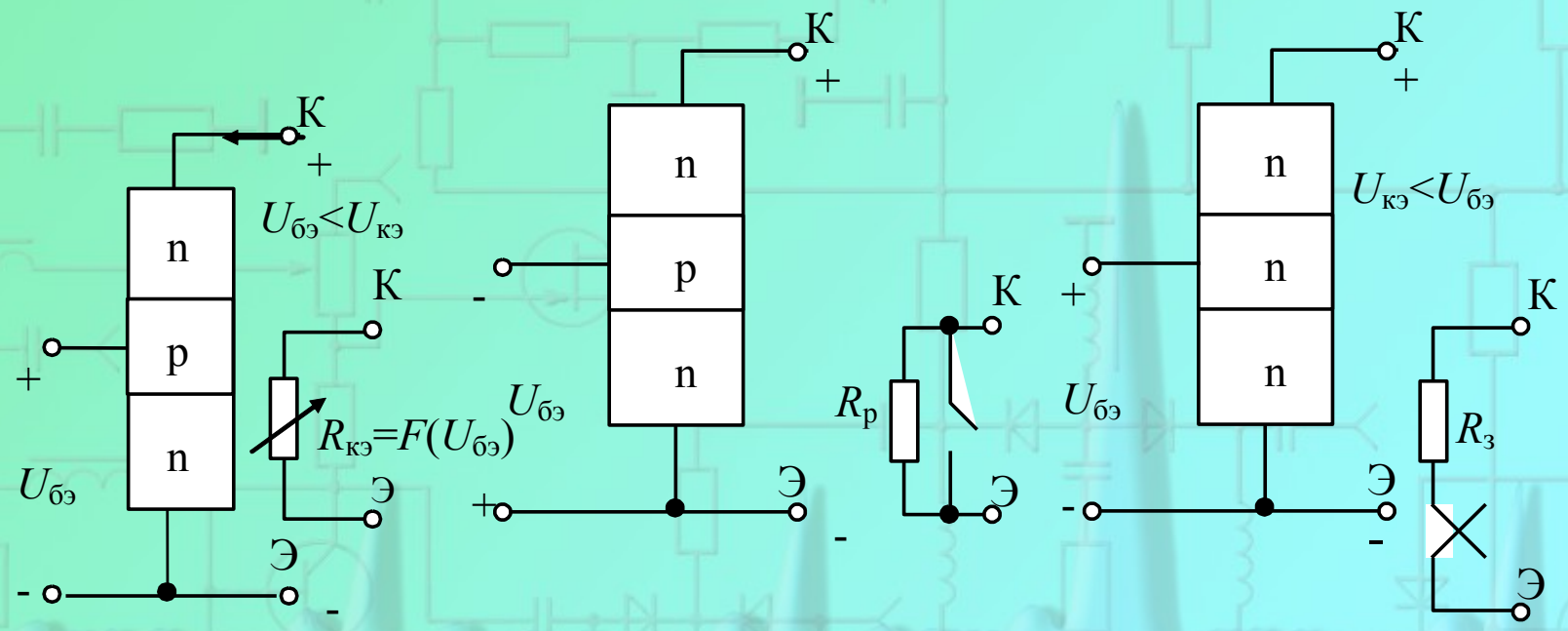
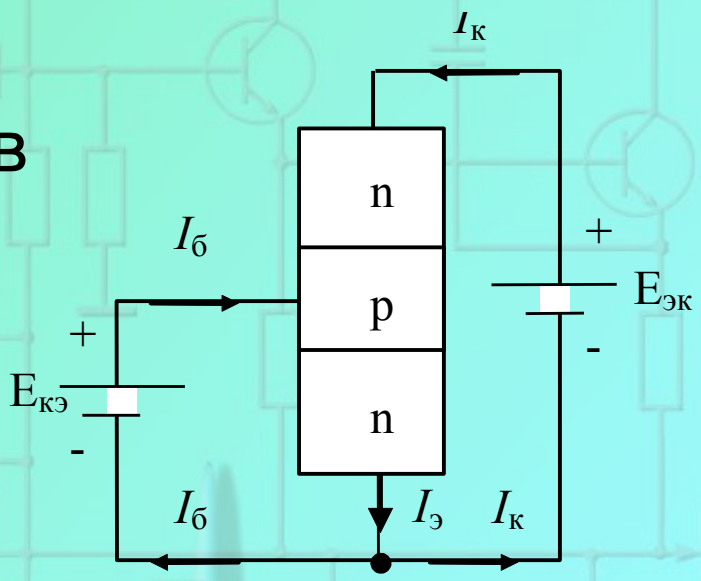


Схема с общим эмиттером

Мощность, потребляемая от управляющего источника, *Р*у=*Е*бэ*I*б много меньше, чем в схеме с ОБ, благодаря чему схема с ОЭ является основной схемой, используемой на практике.



Iк= *S***Е*эб + *I*ко, где S - коэффициент, называемый крутизной биполярного транзистора, имеющий размерность проводимости

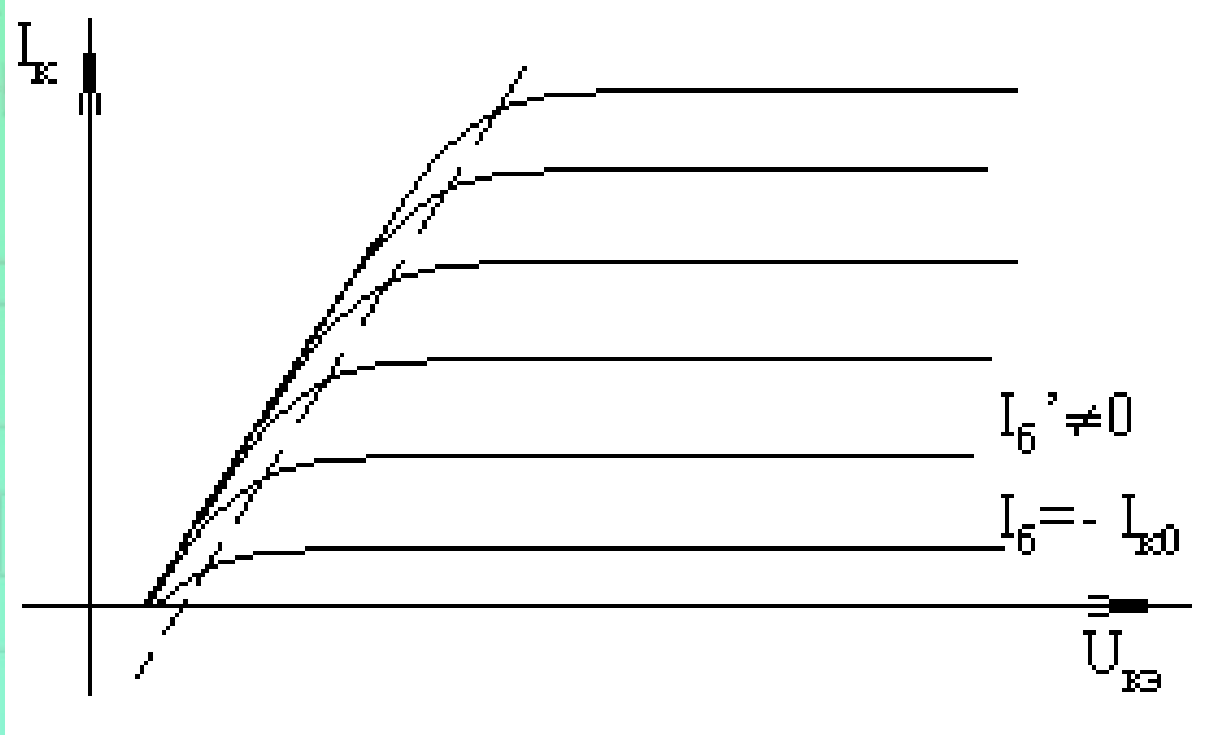
Статические характеристики биполярного транзистора для активного режима

Статический режим работы транзистора – 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).

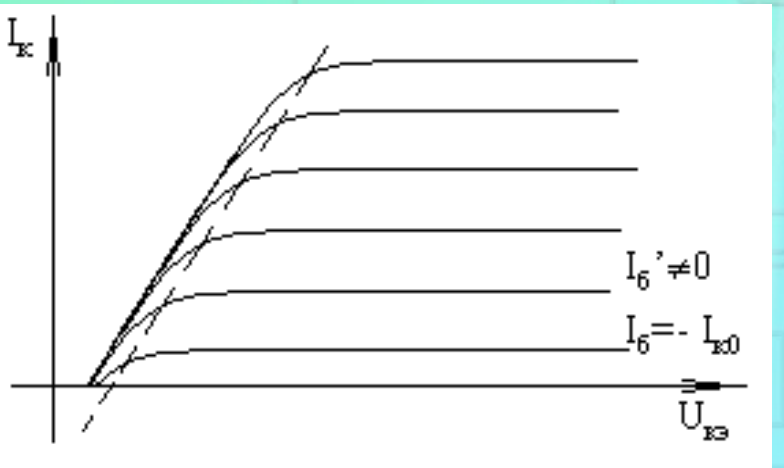
Их вид зависит от способа включения транзистора

Типичный вид ВАХ биполярного транзистора с ОЭ



Режимы работы

- Пунктиром изображено геометрическое место точек, соответствующих равенству: *Uкэ*=*U*бэ (*U*кб=0).
- Левее этой кривой находится область насыщенного режима. Активный режим начинается при *I*б>0.
- При *I*б ≤ 0 имеет место режим отсечки. Минимально возможный ток коллекторов в режиме отсечки достигается при *I*б = -*I*ко, когда согласно *I*к=*I*ко.



Статический коэффициент передачи

Статический коэффициент передачи тока базы:

$$\beta = \frac{I_К}{I_Б};$$

$$I_Э = I_К + I_Б;$$

$$I_Б << I_Э, I_К.$$

статический коэффициент передачи $I_Э$:

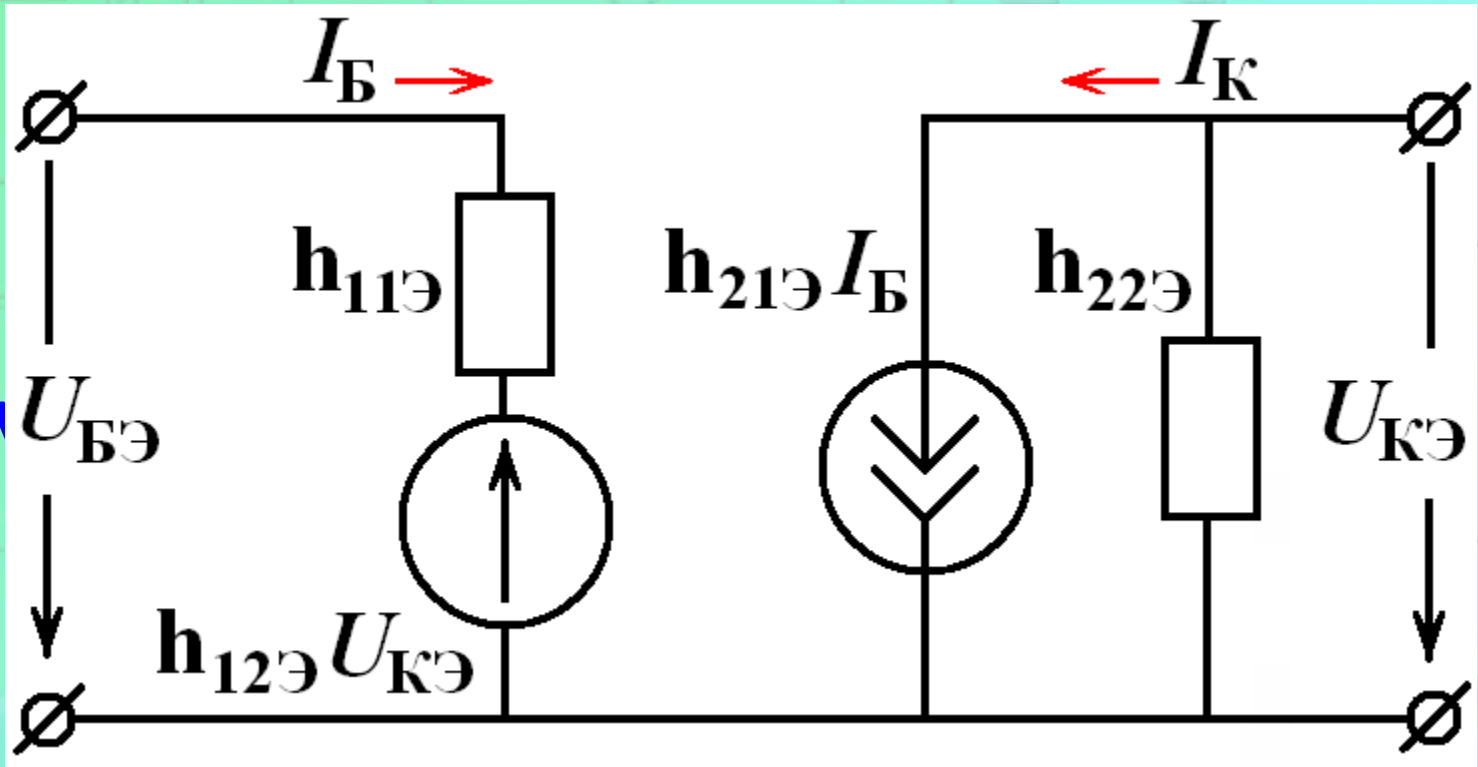
$$\alpha = I_К / I_Э = I_К / I_К + I_Б = \frac{I_К / I_Б}{I_К / I_Б + 1} = \frac{\beta}{\beta + 1};$$

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

Эквивалентная схема БТ, система h-параметров

$$dU_{БЭ} = h_{11Э}\, dI_Б + h_{12Э}\, dU_{КЭ}$$
$$dI_К = h_{21Э}\, dI_Б + h_{22Э}\, dU_{КЭ}$$

Схем



h параметры схемы с общим эмиттером

$h_{11Э} = U_{БЭ}/I_Б$, при **$U_{КЭ}$ = const**:
входное сопротивление транзистора переменному току при отсутствии выходного переменного напряжения.

$h_{12Э} = U_{БЭ}/U_{КЭ}$, при **$I_Б$ = const**:
коэффициент обратной связи по напряжению – доля выходного переменного напряжения передаваемая на вход транзистора вследствие обратной связи в нем.

$h_{21Э} = I_К/I_Б$, при **$U_{КЭ}$ = const**:
коэффициент усилия по току – усиление переменного тока транзистором при работе без нагрузки.

$h_{22Э} = I_К/U_{КЭ}$, при **$I_Б$ = const**:
выходная проводимость переменного тока между коллектором и эмиттером.

Выходное сопротивление $R_{вых} = 1/h_{22Э}$.

Характеристики транзистора

$h_{11}=\Delta U_1/\Delta I_1$ – входное сопротивление транзистора при неизменном $U_{вых}$ ($\Delta U_2=0$);

$h_{21}=\Delta I_2/\Delta I_1$ – коэффициент передачи тока при неизменном $U_{вых}$ ($\Delta U_2=0$);

$h_{12}=\Delta U_1/\Delta U_2$ – коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном $I_{вх}$ ($\Delta I_1=0$);

$h_{22}=\Delta I_2/\Delta U_2$ – выходная проводимость транзистора при неизменном $I_{вх}$ ($\Delta I_1=0$).

$$d\,U_1 = h_{11}\,d\,I_1 + h_{12}\,dU_2;$$

$$d\,I_2 = h_{21}\,d\,I_1 + h_{22}\,dU_2$$

Линеаризованная модель биполярного транзистора

*I*к= *F*(*I*б, *U*кэ), *U*бэ= *F*(*I*б, *U*кэ)

Разлагая в ряд Тейлора относительно некоторого режима покоя *I*б0, *I*к0, *U*кэ0, *U*бэ0 получаем линеаризованное уравнение

$$dI_к = \frac{\partial I_к}{\partial I_б} dI_б + \frac{\partial I_к}{\partial U_{кэ}} dU_{кэ}$$

$$dI_к = \beta dI_б + \frac{1}{r_{кэ}} dU_{кэ}$$

$$dU_{бэ} = \frac{\partial U_{бэ}}{\partial I_б} dI_б + \frac{\partial U_{бэ}}{\partial U_{кэ}} dU_{кэ}$$

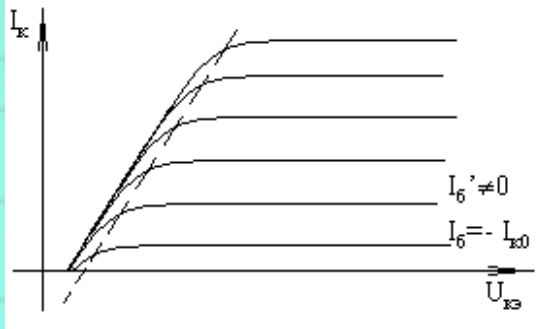
$$dU_{бэ} = r_{эб} dI_б + \gamma dU_{кэ}$$

$$\frac{\partial I_к}{\partial I_б} = \beta \quad \frac{\partial I_к}{\partial U_{кэ}} = \frac{1}{r_{кэ}} \quad \frac{\partial U_{бэ}}{\partial I_б} = r_{эб} \quad \frac{\partial U_{бэ}}{\partial U_{кэ}} = \gamma$$

Физический смысл коэффициентов

- дифференциальный коэффициент усиления тока базы

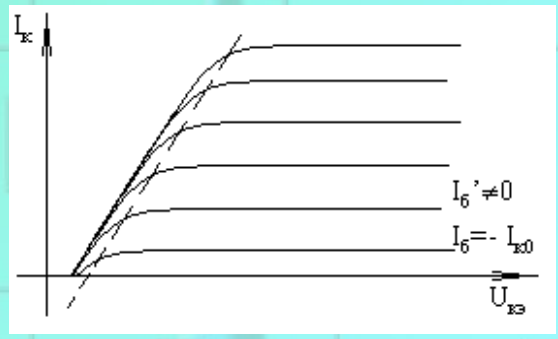
$$\beta = \left.\frac{dI_k}{dI_б}\right|_{\substack{dU_{кэ}=0 \\ (U_{кэ}=U^0_{кэ})}}$$



Физический смысл коэффициентов

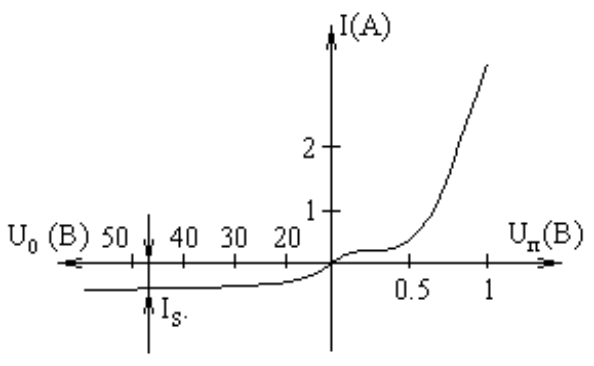
- дифференциальное выходное (внутреннее) сопротивление

$$r_{кэ} = \left.\frac{dU_{кэ}}{dI_k}\right|_{\substack{dI_б=0 \\ (I_б=I_б^0)}}$$



Физический смысл коэффициентов

$$r_{эб} = \left.\frac{dU_{бэ}}{dI_б}\right|_{dU_{кэ}=0}$$



Физический смысл коэффициентов

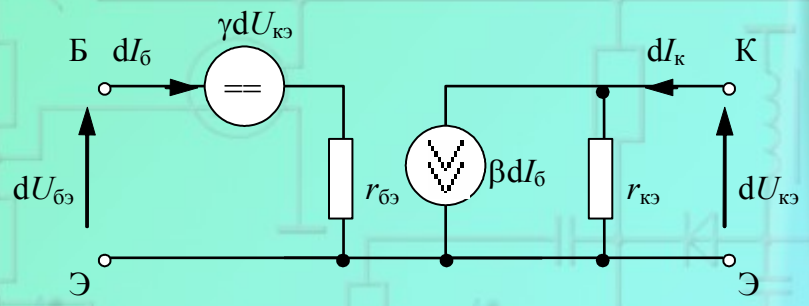
- коэффициент обратной связи по напряжению

$$\gamma = \left.\frac{dU_{бэ}}{dU_{кэ}}\right|_{dI_б = 0}$$

Линеаризованная электрическая модель

$$dI_{\text{к}} = h_{21} dI_{\text{б}} + h_{22} dU_{\text{кэ}}$$

$$dU_{\text{бэ}} = h_{11} dI_{\text{б}} + h_{12} dU_{\text{кэ}}$$

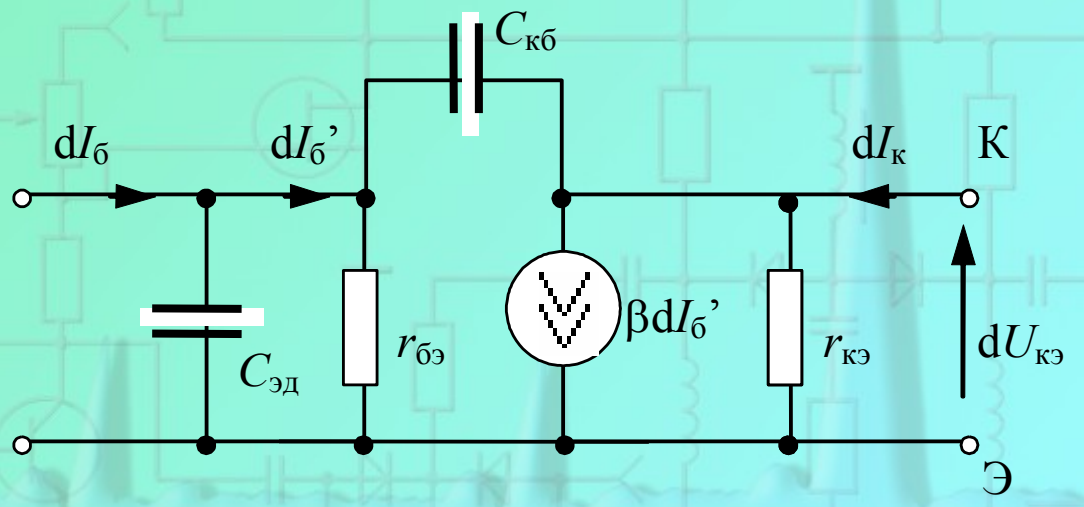


Инерционность биполярного транзистора

- Инерционность биполярного транзистора, как любого управляемого элемента, приводит к потере управляемости при быстрых изменениях тока управления.
- Причиной инерционности биполярного транзистора являются конечное время переноса зарядов от эмиттерного перехода к коллекторному и паразитные емкости указанных переходов. В активном режиме коллекторный переход заперт и в нем учитывается зарядная емкость. В открытом эмиттерном переходе превалирующее значение имеет диффузионная емкость.

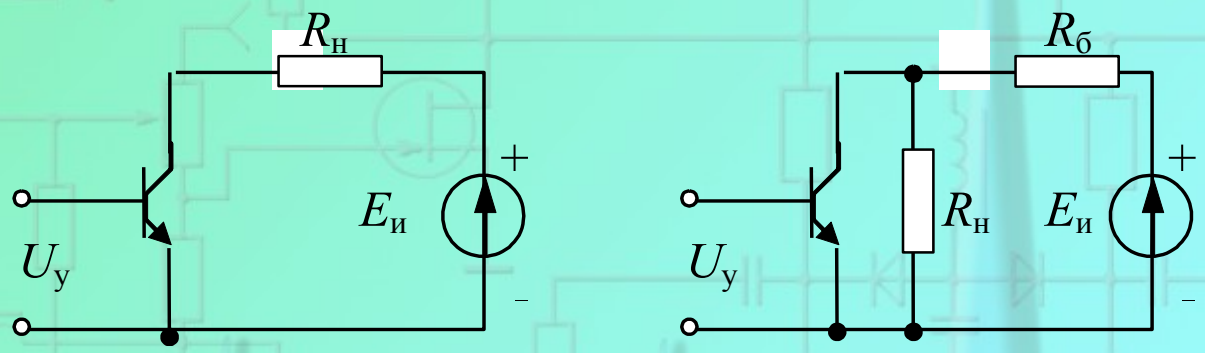
Инерционность биполярного транзистора в активном режиме

- диффузионной емкости открытого эмиттерного перехода Сэд и зарядной емкости коллекторного перехода Скз



Ключевой режим биполярного транзистора

- Схема последовательного (а) и параллельного (б) ключа

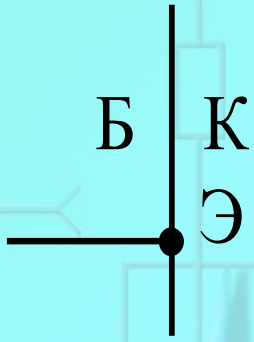


Режим насыщения

- Полагая, что сопротивление насыщенного транзистора много меньше эквивалентного сопротивления нагрузки *r*н << *R*э, можно считать, что в режиме насыщения ток коллектора, достигающий своего максимального значения.
- В активном режиме имело бы место соотношение *B*Iб ≈ Iкн.

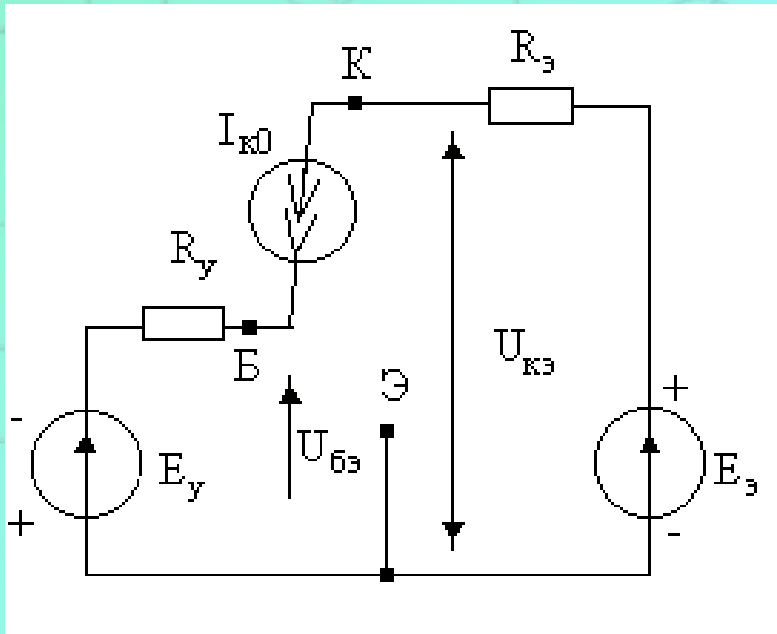
$$I_{кн} = \frac{E_э}{R_э}$$

Переход в режим насыщения наступает при условии *B*Iб>Iкн



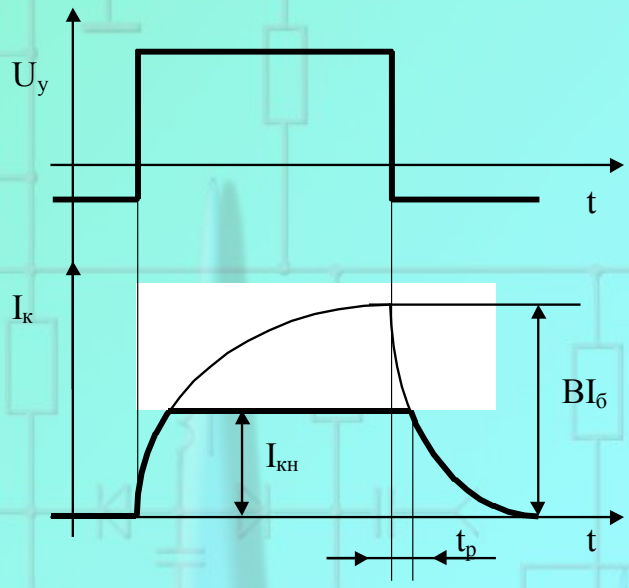
Режим отсечки

- $I_{эо} << I_{ко}$
- Напряжение коллектор-эмиттер запертого транзистора из-за малой величины $I_{ко}$ равно
- $U = E_э - R_э I_{к0} \approx E_э$
- $|E_у| > I_{ко} R_у$

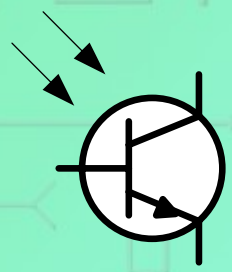


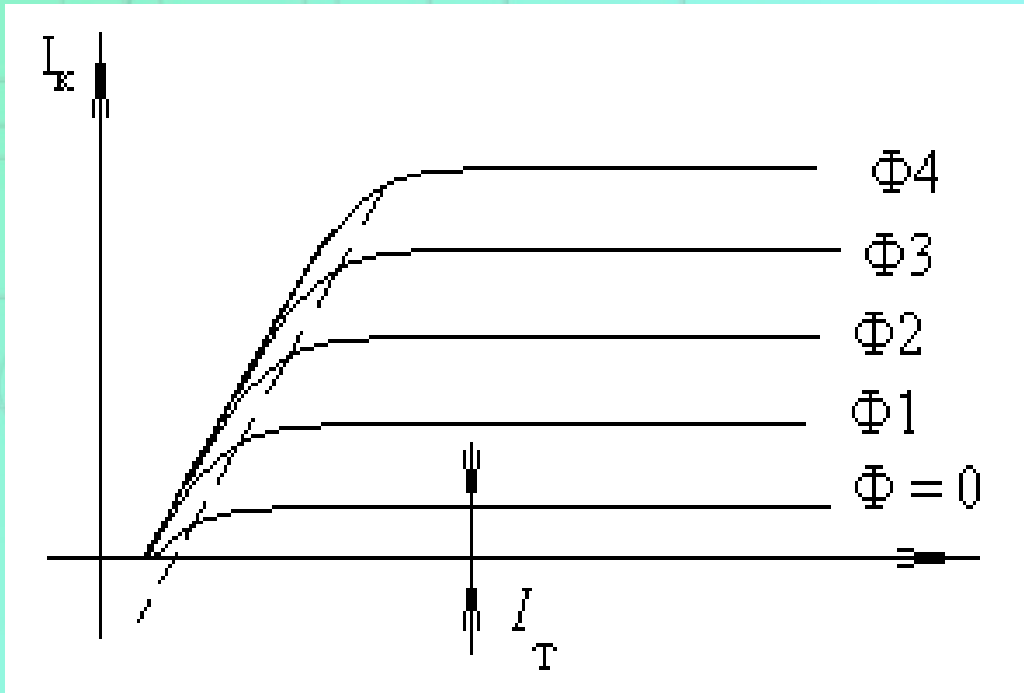
Быстродействие ключа

- Задержка выключения транзи-стора на время рассасывания избыточных носителей в базе *tp*



Фототранзисторы





Полевые транзисторы

Полевые транзисторы - это управляемые элементы, особенностью которых является практически нулевая мощность управления в статическом состоянии. Это означает, что в отличие от биполярных транзисторов ток управления полевых транзисторов мал, и можно считать, что они управляются напряжением (электрическим полем) - отсюда название “полевые”

Достоинства полевых транзисторов

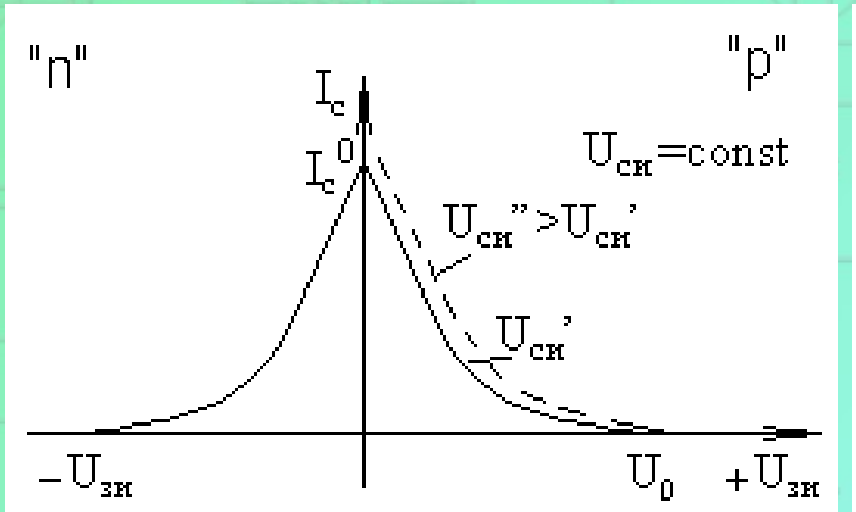
- На полевых транзисторах выполняются цифровые устройства, не потребляющие энергии в статическом состоянии, то есть с малым потреблением.
- На полевых транзисторах, в силу их особенностей, удобно строить ключи переменного тока, в том числе и прецизионные аналоговые коммутаторы.
- Мощные полевые транзисторы обладают значительно меньшим сопротивлением в открытом состоянии при работе в ключевом режиме, что обеспечивает более высокие значения КПД преобразователей энергии.
- В полевых транзисторах отсутствует эффект диффузионной емкости и связанные с ним ограничения быстродействия, обусловленные эффектом насыщения

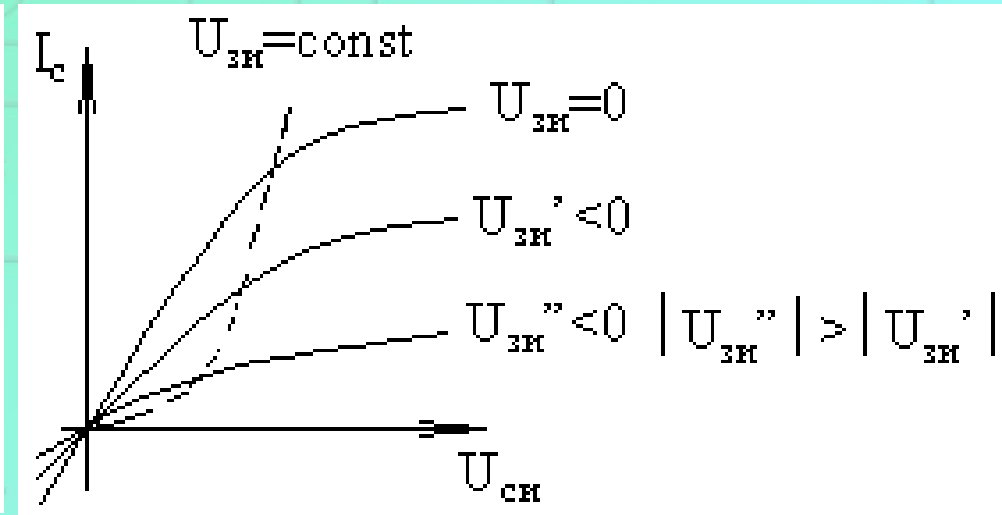
Недостатки полевых транзисторов

- Крутизна управления у полевых транзисторов существенно меньше
- Быстродействие цифровых ключей на полевых транзисторах существенно меньше

ВАХ полевого транзистора

а) сквозные (проходные) и б) выходные

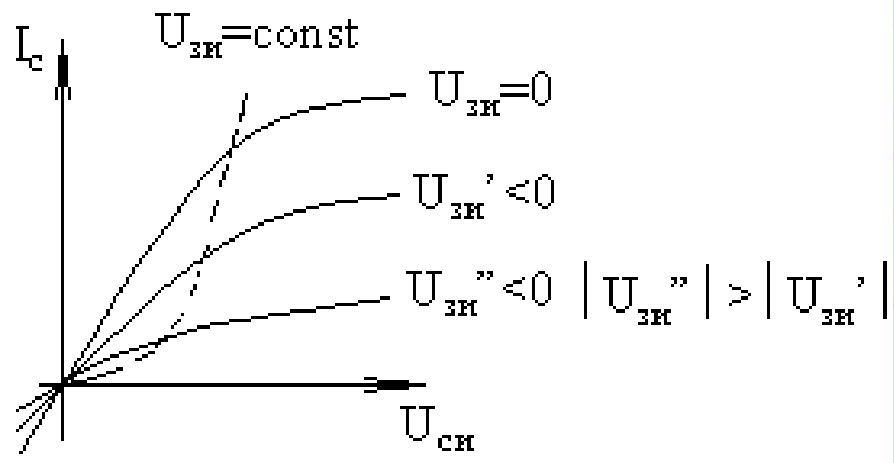




Линейность характеристики ПТ

При малых напряжениях *U*си (меньше φТ) зависимость *I*с= *f* (*U*си) почти линейная, и линейность сохраняется, если полярность напряжения *U*си сменить на обратную

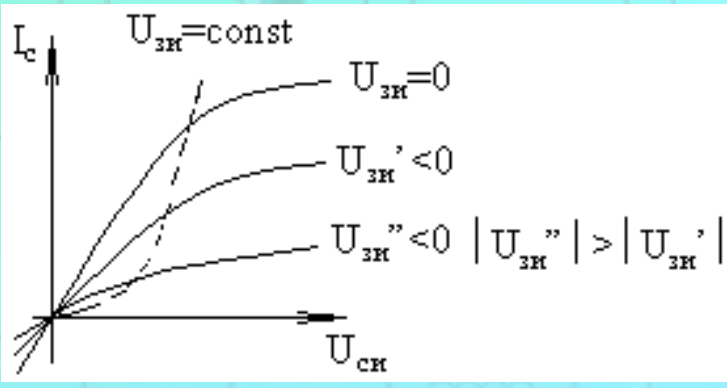
$$I_{\text{с}} = B\left[\left(U_{\text{зи}} - U_{\text{си}}\right)U_{\text{си}} - \frac{1}{2}U_{\text{си}}^{2}\right]$$



Нелинейность характеристики ПТ

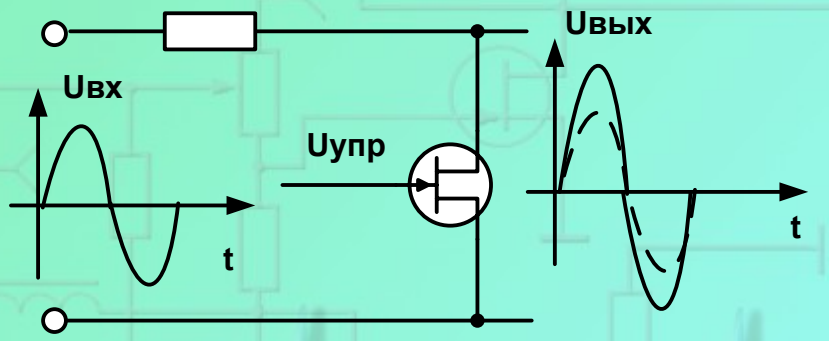
- При увеличении напряжения *U*си зависимость *I*с= *f* (*U*си) становится нелинейной. При (*U*зи + *U*си) ≥ *U*зи отс канал вблизи стока перекрывается и ток стока практически перестает зависеть от напряжения сток-исток (*U*си), где *I*с нач. - ток стока при *U*зи= 0 и *U*си = *U*зи отс.

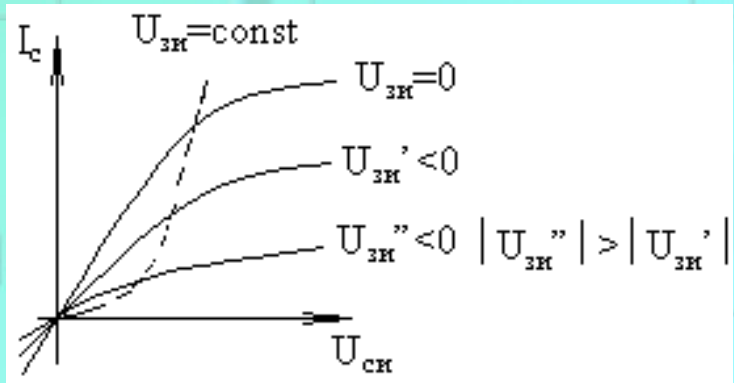
$$I_{\text{с}} = I_{\text{с нач}}\left(1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{отс}}}\right)^2$$



Линейный аттенюатор на полевом транзисторе

- Полевой транзистор в линейной области ведет себя как линейное сопротивление, величиной которого можно управлять, изменяя напряжение *U*зи. Это свойство используется при построении линейных регуляторов сигнала





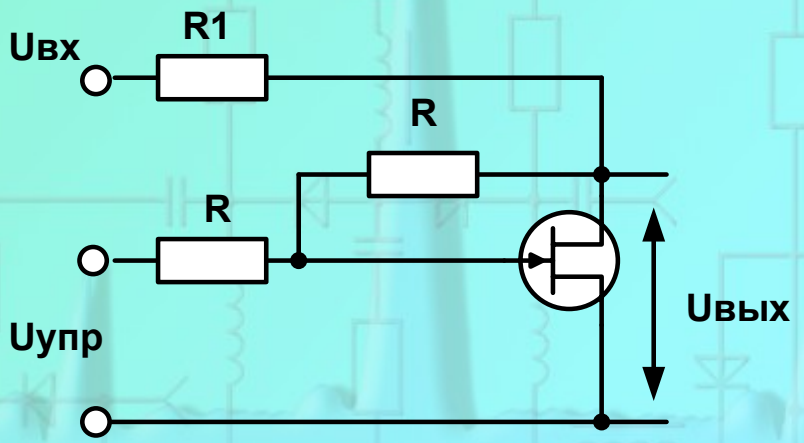
Недостаток таких аттенюаторов – малая амплитуда выходного напряжения (< φT).

Линейный аттенюатор с расширенным диапазоном *U*вых

- Для расширения диапазона выходных напряжений ½*U*си передается в цепь управления. Зависимость *I*с= *f*(*U*си) линейная. *R* >> *R*1

$$U_{\text{зи}} = U_{\text{упр}} + \frac{1}{2}U_{\text{си}}$$

$$I_{\text{с}} = B\left[\left(U_{\text{зи отс}} - U_{\text{упр}}\right)U_{\text{си}}\right]$$



Линеаризованная электрическая модель полевого транзистора

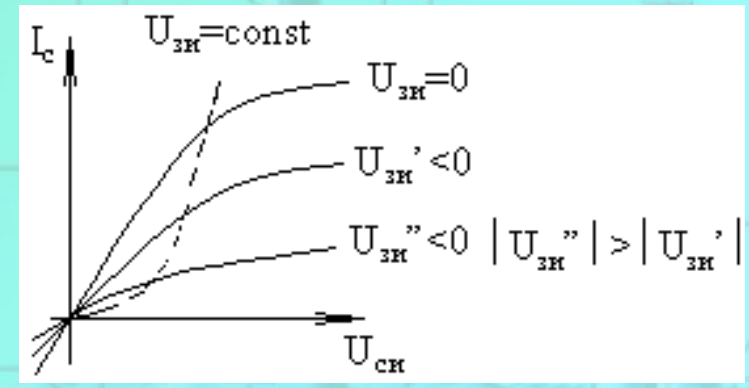
Линеаризованное уравнение может быть получено для заданного режима покоя *IсА*, *Uзи*А, *Uси*А

$$dI_{\text{с}} = \frac{\partial I_c}{\partial U_{\text{зи}}} dU_{\text{зи}} + \frac{\partial I_{\text{с}}}{\partial U_{\text{си}}} dU_{\text{си}} = S dU_{\text{зи}} + \frac{1}{r_i} dU_{\text{си}}$$

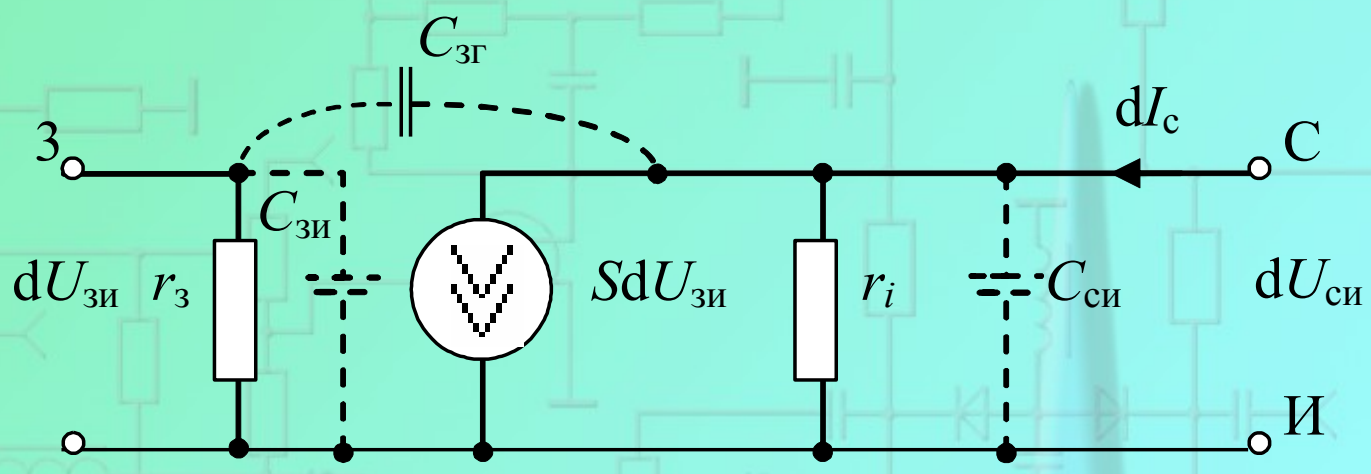
$$S = \left.\frac{dI_{\text{с}}}{dU_{\text{зи}}}\right|_{\substack{\Delta U_{\text{си}}=0 \\ U_{\text{си}}=U_{\text{си}}^{A}}}$$

$$r_{\text{з}} = \frac{dU_{\text{зи}}}{dI_{\text{з}}}$$

$$r_i = \left.\frac{dU_{\text{си}}}{dI_{\text{с}}}\right|_{\substack{\Delta U_{\text{зи}}=0 \\ U_{\text{зи}}=U_{\text{зи}}^{A}}}$$



Линеаризованная электрическая модель полевого транзистора



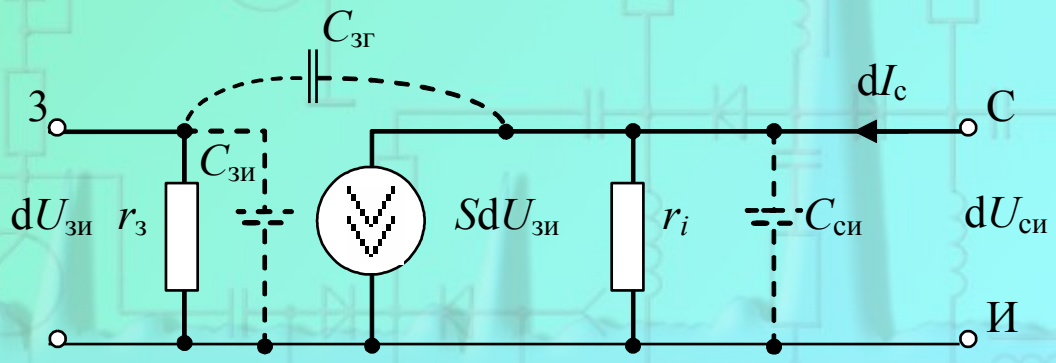
Усилительные свойства

- Максимальные усилительные свойства полевых транзисторов характеризуются внутренним коэффициентом усиления , который связан с крутизной и внутренним сопротивлением уравнением $\mu = S \cdot ri$.

$$\mu = \left.\frac{dU_{\text{си}}}{dU_{\text{зи}}}\right|_{\Delta I_{\text{с}}=0}$$

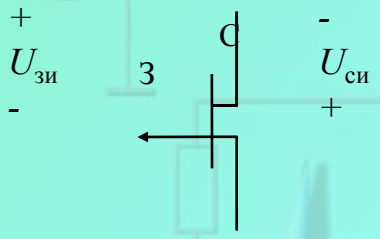
Инерционность ПТ

- Инерционность ПТ определяется конечным временем переноса носителей в области канала и наличием межэлектродных паразитных емкостей: входной *С*зи, выходной – *С*си, проходной – *С*зс.



Полевой транзистор с каналом p-типа

- Полярность запирающего напряжения противоположна полярности источника питания, то есть для работы этого элемента требуется два разнополярных напряжения

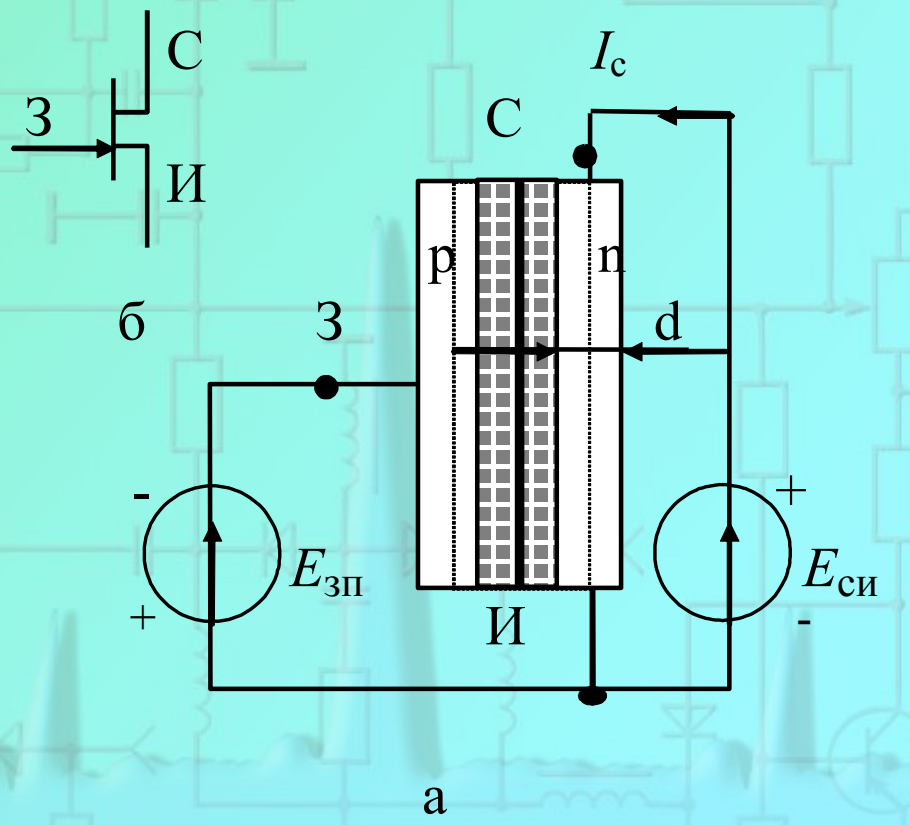


Полевые транзисторы

- с *управляемым p-n-переходом*
- с *изолированным затвором*

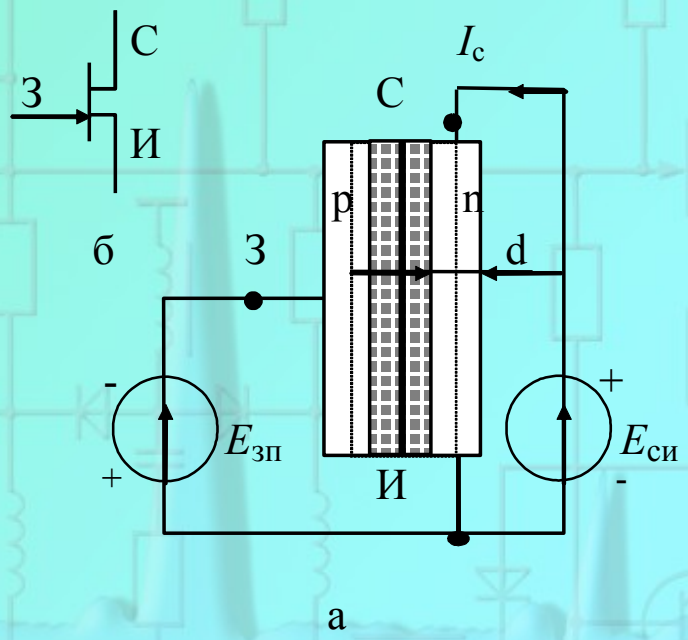
Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом

- Сопротивление проводящего канала сток-исток зависит от его длины, удельного сопротивления слоя **n** и площади поперечного сечения, определяемой шириной канала **d**.

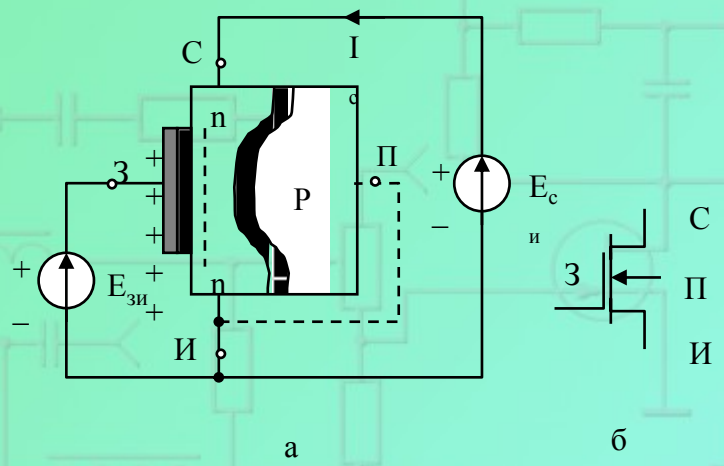


Функциональная зависимость *Ic*

- При увеличении (относительно исходного нулевого) значения запирающего напряжения *Е*зи ширина обедненной области p-n-перехода (заштриховано) увеличивается, а ширина проводящего n-канала уменьшается.
- *Ic=F(d, Е*си), *d=f(Е*зи)
- *Ic=F(Е*зи, *Е*си)



Полевые транзисторы с изолированным затвором



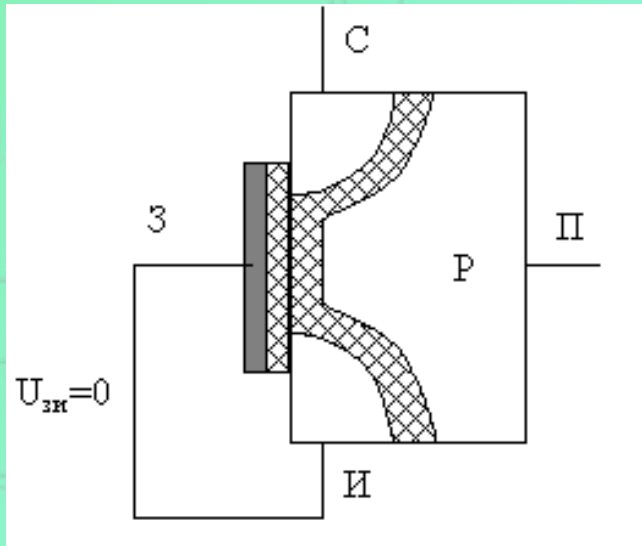
- Схематическое изображение полевого транзистора с изолированным затвором: а - встроенный канал n-типа;
б - условное графическое изображение

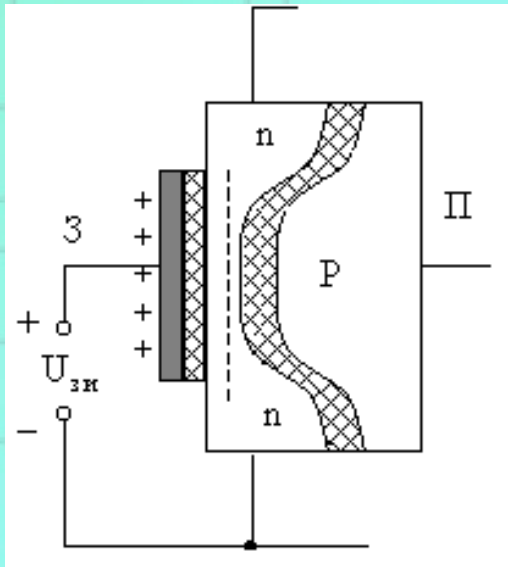
Управление током стока происходит за счет модуляции ширины канала под диэлектриком из-за изменения знака и величины управляющего напряжения затвор-исток

Полевые транзисторы с изолированным затвором

- Поскольку технологически диэлектрик получается путем окисления поверхности кремниевого материала канала (SiO_2), то иногда фигурирует название МОП-транзисторы.
- По сочетанию металл (контакт затвора) – диэлектрик-полупроводник (проводящий канал), такие транзисторы получили название МДП-транзисторов.

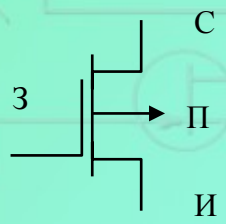
МДП-транзистор с индуцированным каналом



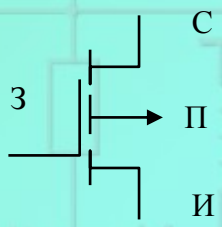


Графическое изображение полевых транзисторов с изолированным затвором

а - с встроенным; б - изолированным каналом р-типа.

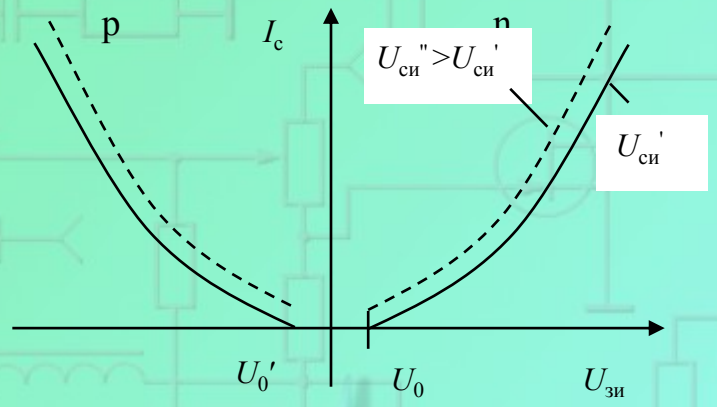


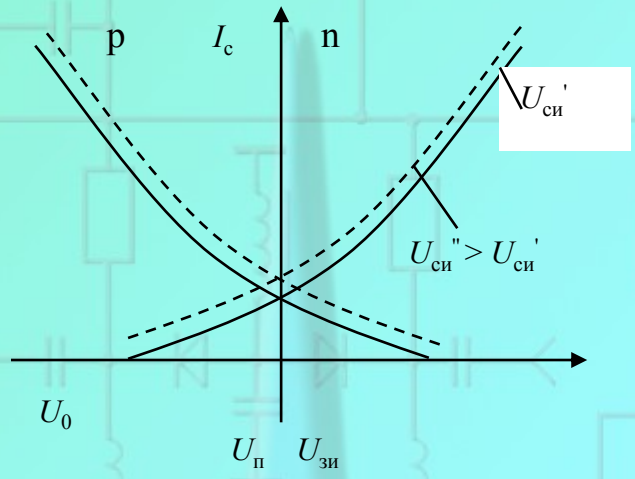
а



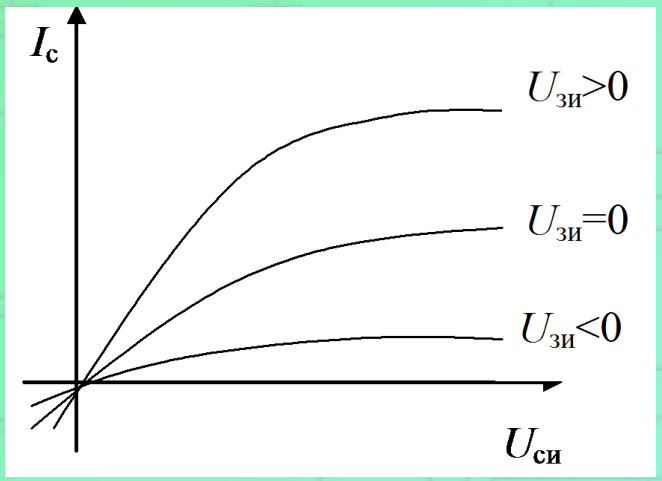
б

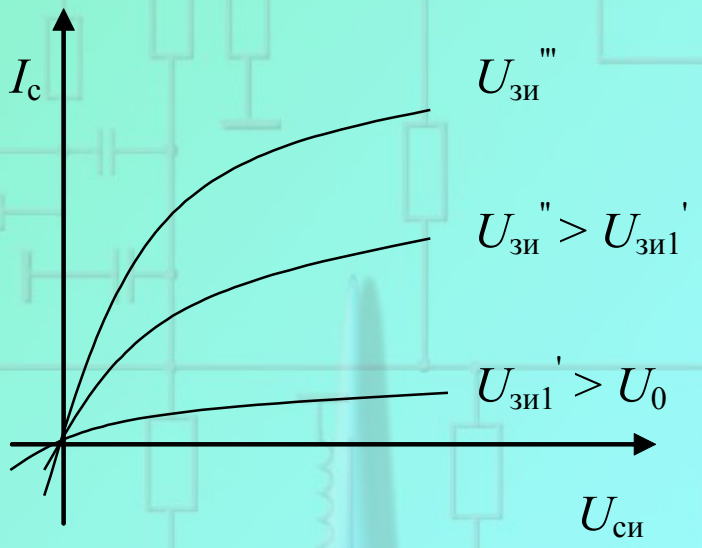
Статические проходные и выходные характеристики ПТ





Выходные ВАХ МДП-транзистора





Пара полевых транзисторов с каналом n- и p-типа, имеющие одинаковые характеристики, называется комплементарной

Ключевой режим работы полевых транзисторов

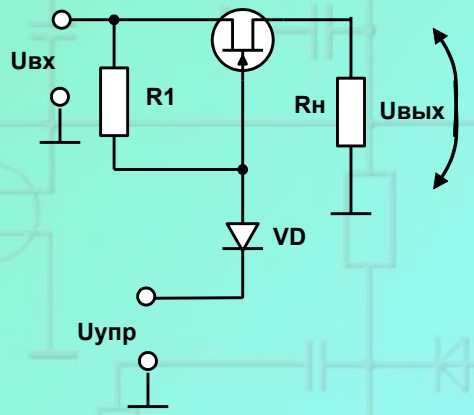
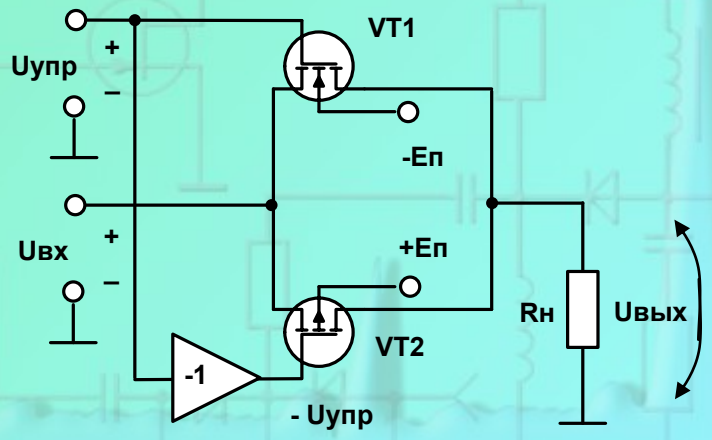
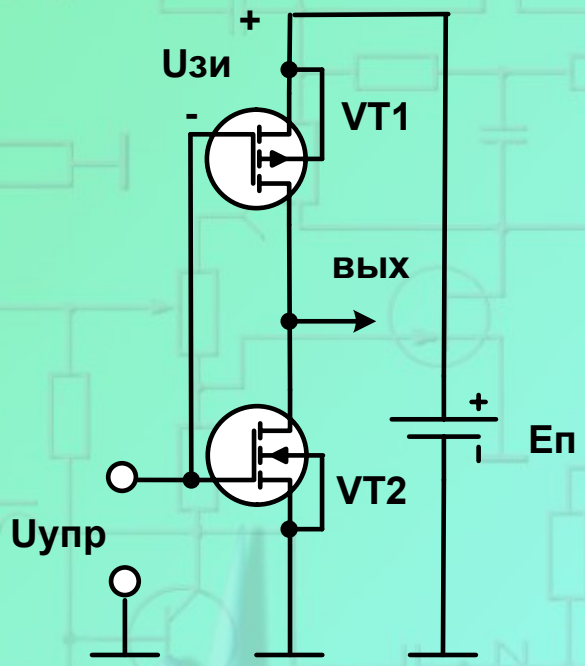


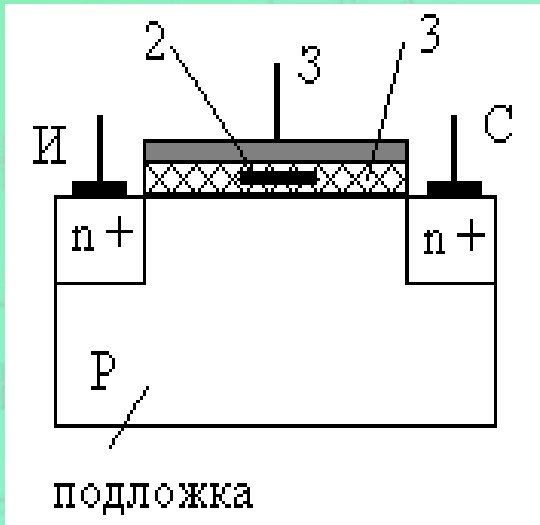
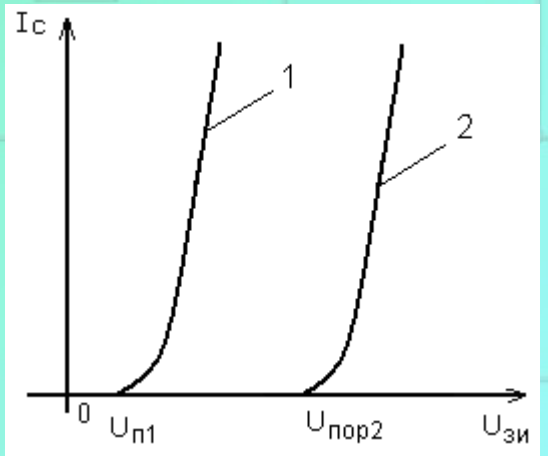
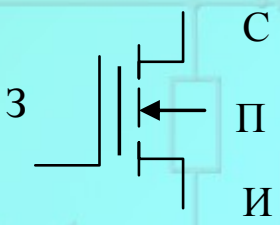
Схема коммутатора на полевых транзисторах

- Аналоговые ключи выпускаются в виде отдельных микросхем в ИС 547КП1, К190КТ1, КР590КН1- КР590КН9



Ключ на комплементарных транзисторах



- Если *U*упр = 0, то VT1 открыт, так как *U*зи*VT1* = – E, а VT2 закрыт *U*зи*VT2* = 0. Выходное напряжение *U*вых = E и ток, протекающий через ключ *I*ост очень мал. Во втором состоянии, при *Uупр* = E *U*зи*VT1* = 0, а *U*зи*VT2* = E, VT1 закрыт, а VT2 открыт, *U*вых = 0 и в этом состоянии через ключ протекает очень маленький ток *I*ост.

Полевой транзистор с плавающим затвором