Раздел 3. Транзисторы

3.1. Устройство и принцип действия

Транзисторы делятся на

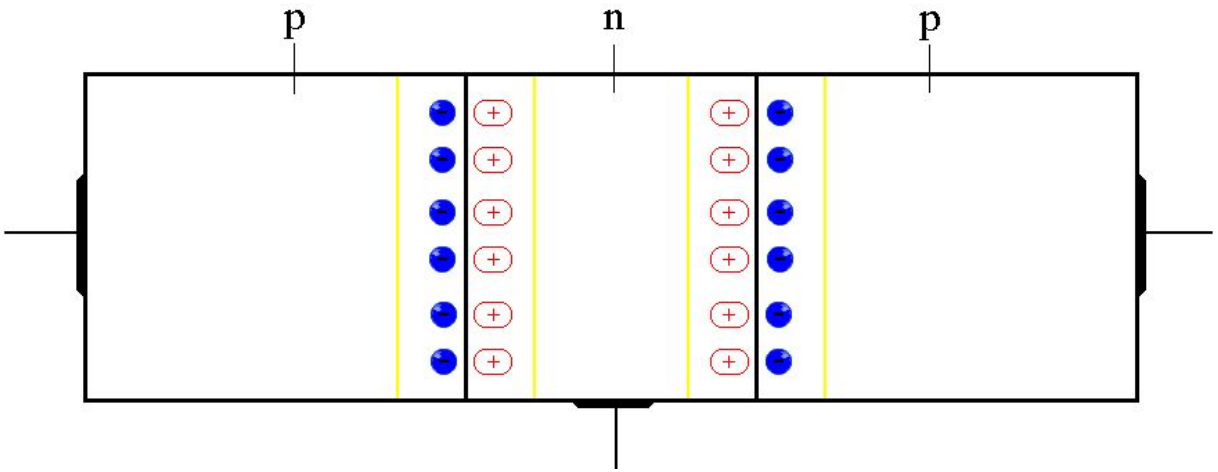
- биполярные,
- униполярные (полевые).

Биполярный транзистор – прибор для усиления мощности, состоящий из трех областей с разным типом проводимости.

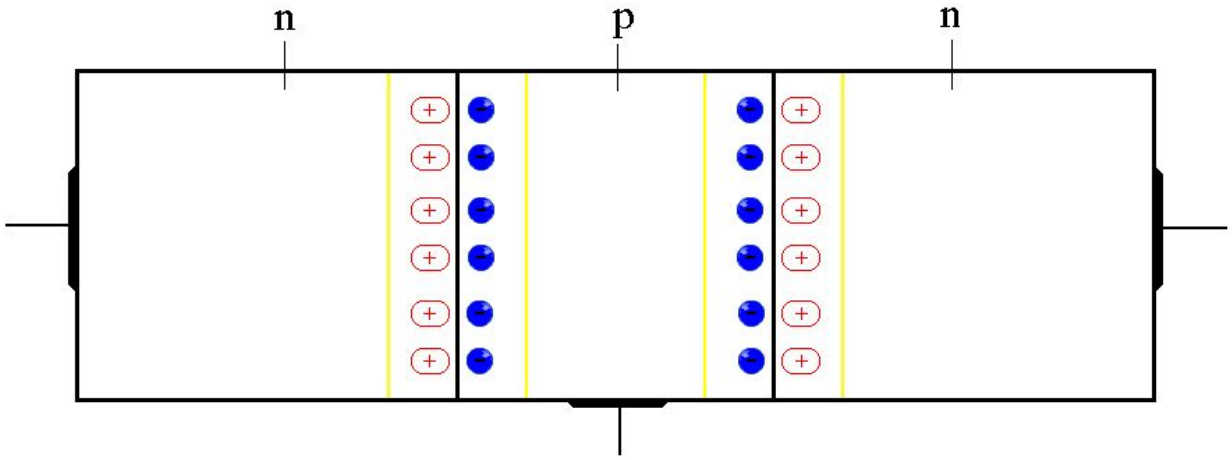
БПТ подразделяются на p-n-p и n-p-n в зависимости от чередования типов полупроводников

3.1. Устройство и принцип действия

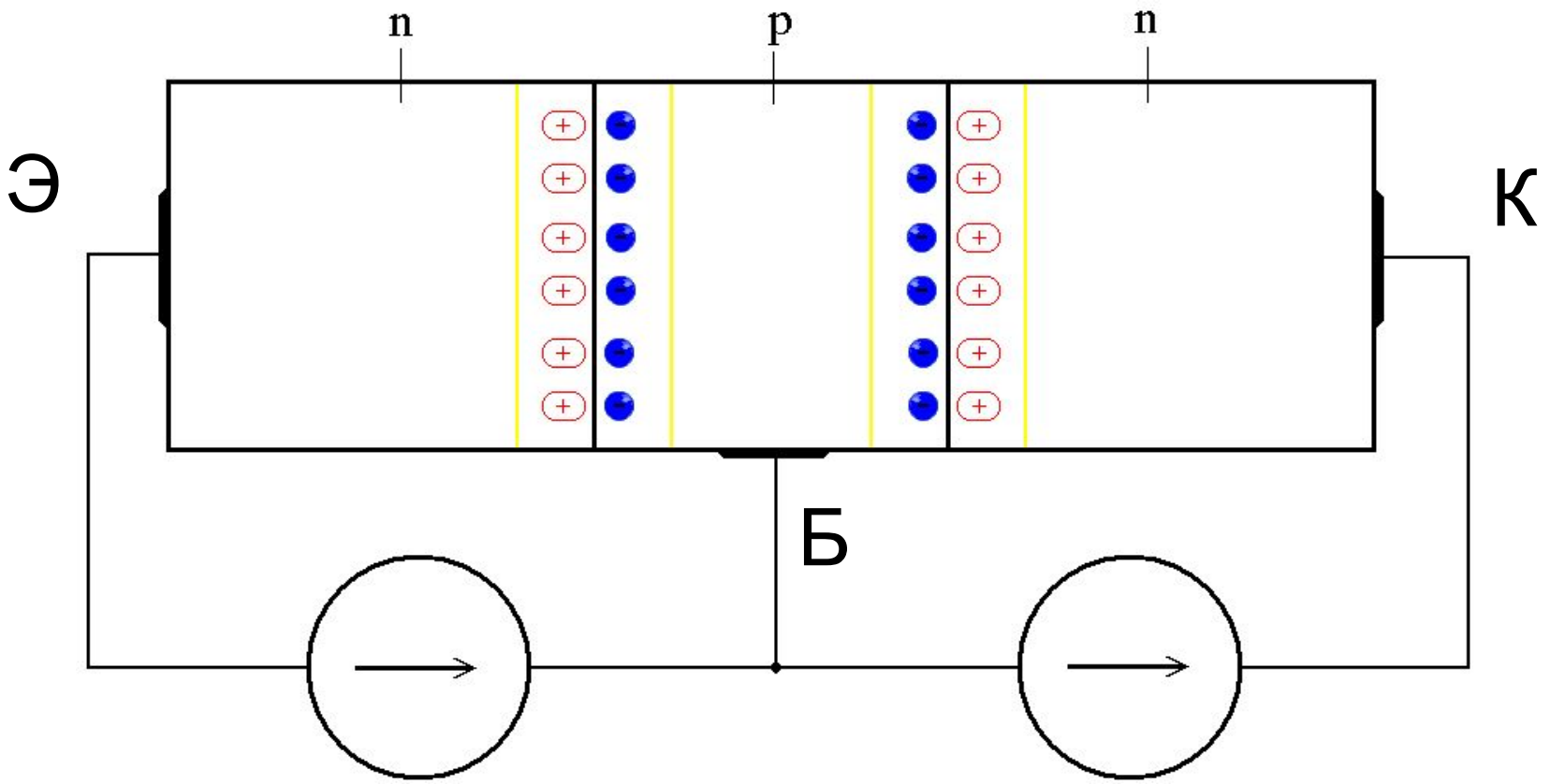
- p-n-p

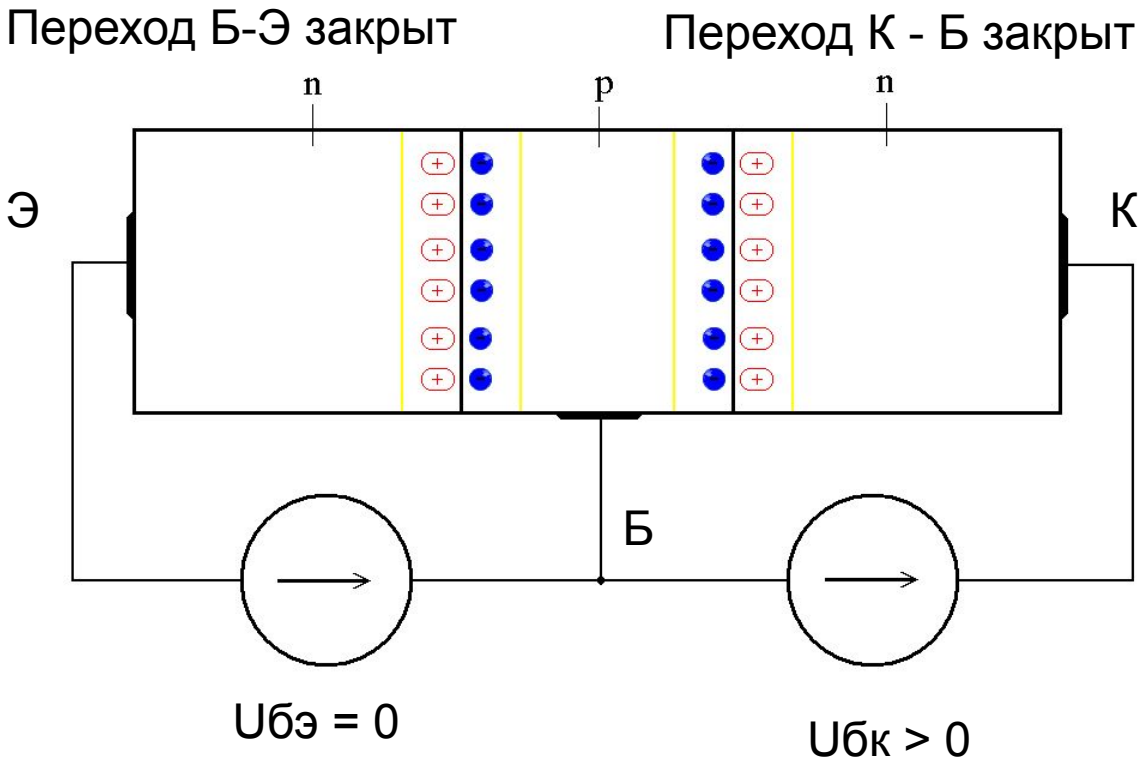


- n-p-n



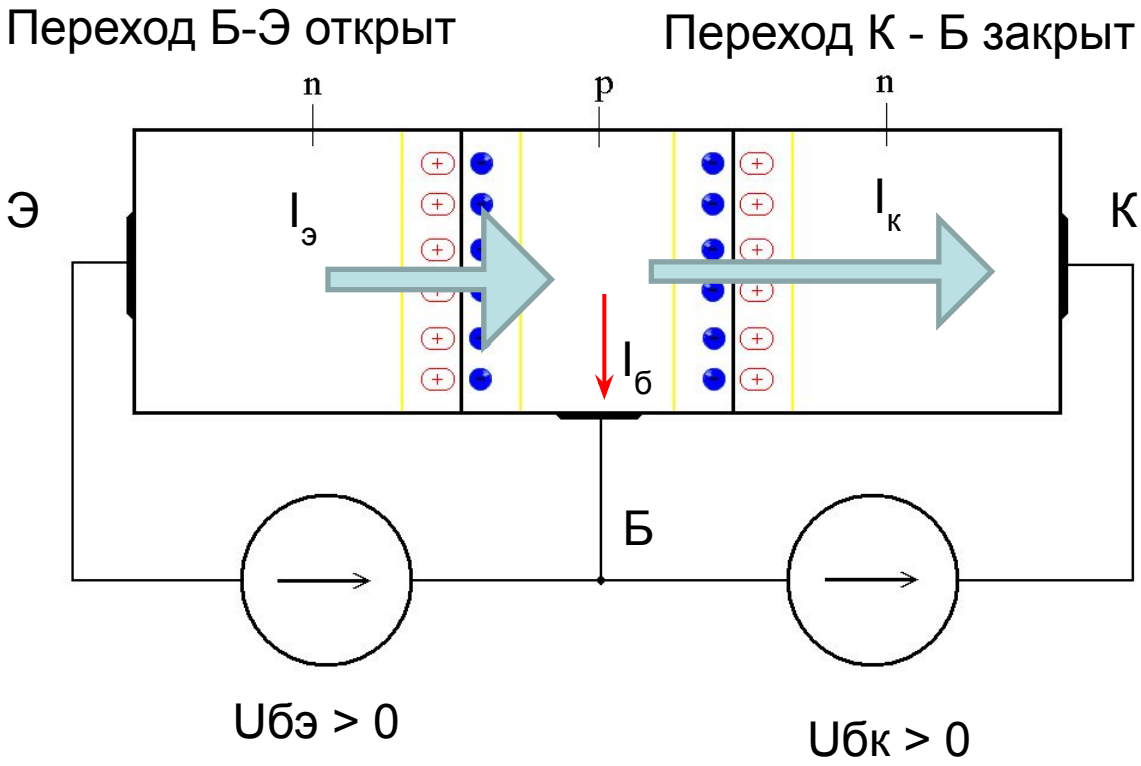
Существуют 3 схемы подключения источников к транзистору



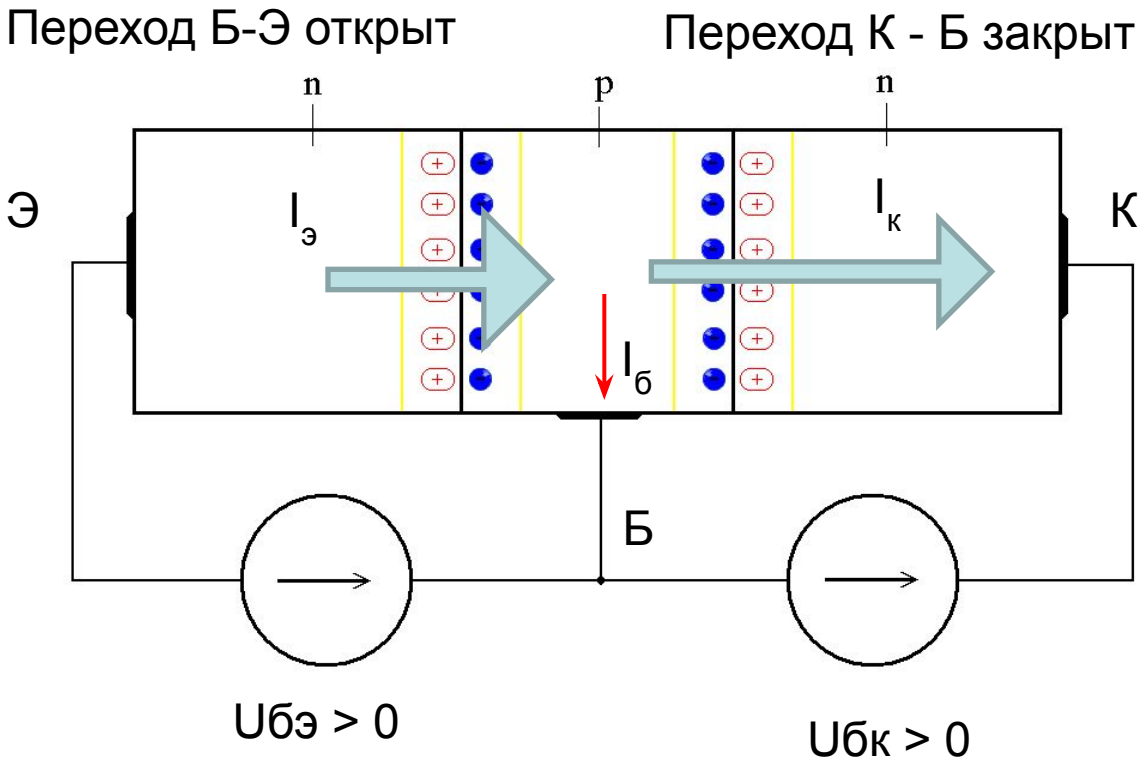


Важно: переход коллектор-база для электронов коллектора закрыт, но для электронов базы он открыт, электрическое поле отлично бы способствовало перемещению электронов из базы в коллектор…, если бы электроны были в базе!

Чтобы электроны появились в базе, нужно открыть переход эмиттер-база, подав Uбэ > 0



Под действием Uбэ электроны из коллектора переходят в базу. База делается тонкой, в этом случае электроны в базе сразу попадают под действие электрического поля, стремящегося переместить электроны из базы в коллектор. Поэтому основная часть электронов уходит в коллектор, и малая часть уходит в базу.



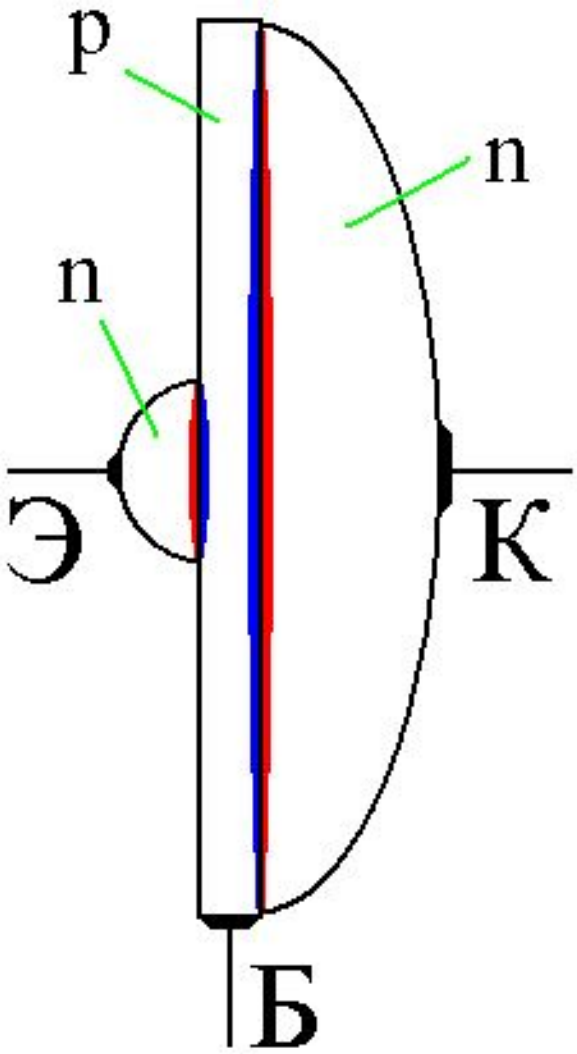
$I_э = I_б + I_к$, $I_э \approx I_к$

Важно здесь то, что непременным условием наличия сквозного тока эмиттер-коллектор является наличие малого тока базы! Если мы прекратим маленький ток базы, прекратится и большой ток коллектора! Ток коллектора очевидно пропорционален току базы!

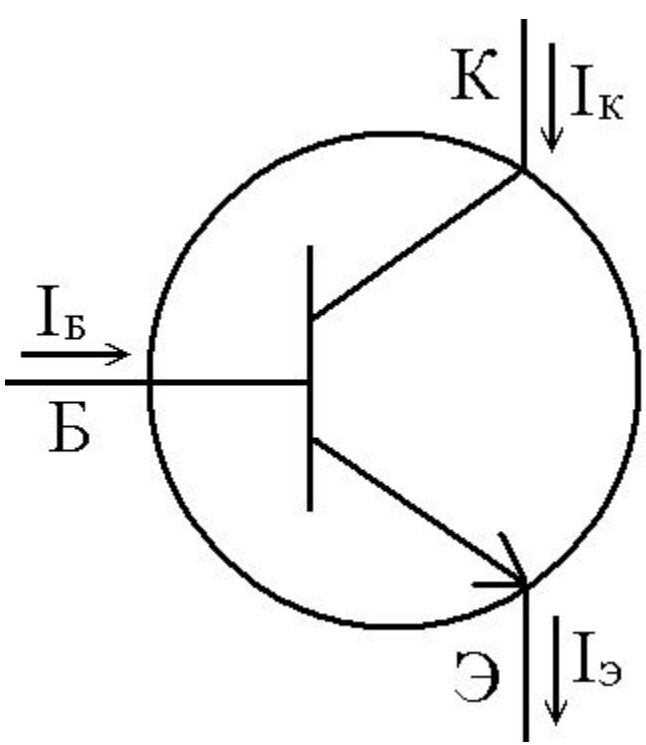
3.1. Устройство и принцип действия

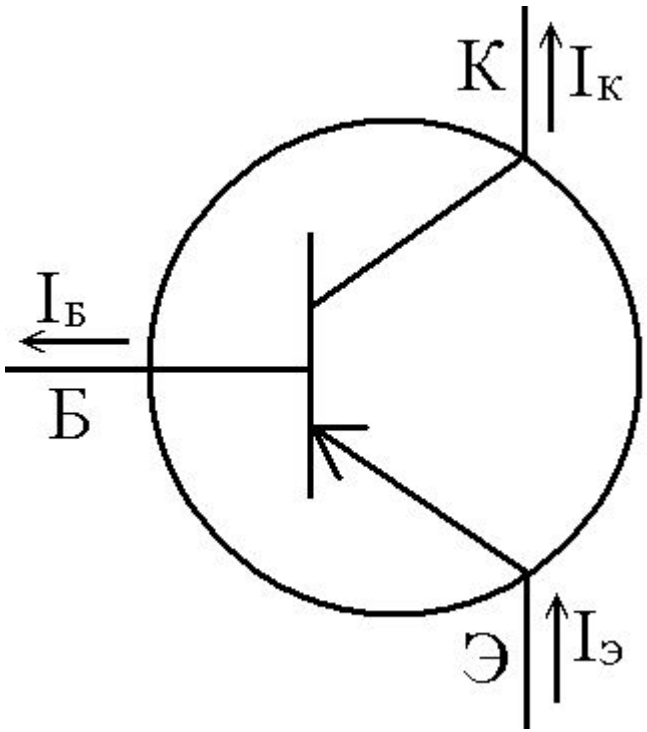
- Ток эмиттера и коллектора течет только в случае открытого перехода база-эмиттер, следовательно, мы может регулировать ток коллектора и эмиттера, управляя током базы!
- Если считать, что входным является малый ток базы, а выходным – большой ток коллектора, транзистор оказывается усилителем тока.
- Если смотреть на два состояния: есть ток базы – есть и сквозной ток эмиттер-коллектор; нет тока базы – нет сквозного тока Э-К, транзистор становится ключом, управляемым током базы.
- Также можно думать, что меняя ток базы, мы меняем сопротивление между эмиттером и коллектором (т.к. при одном и том же напряжении между К и Э изменение тока базы меняет ток между К и Э).

Конструкция транзистора



3.1. Устройство и принцип действия



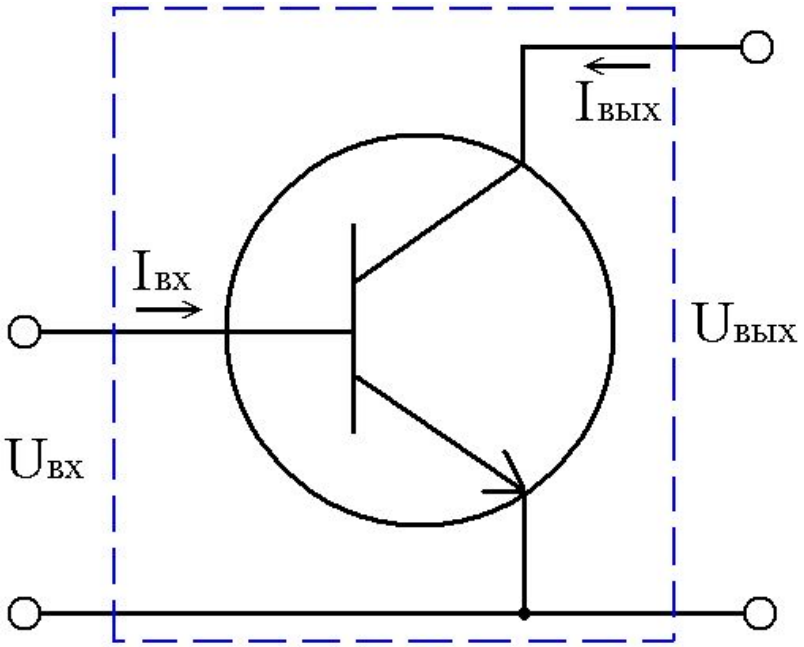


$$I_к \approx 0,9 - 0,95 \cdot I_э$$

$$I_б \approx 0,05 - 0,1 \cdot I_э$$

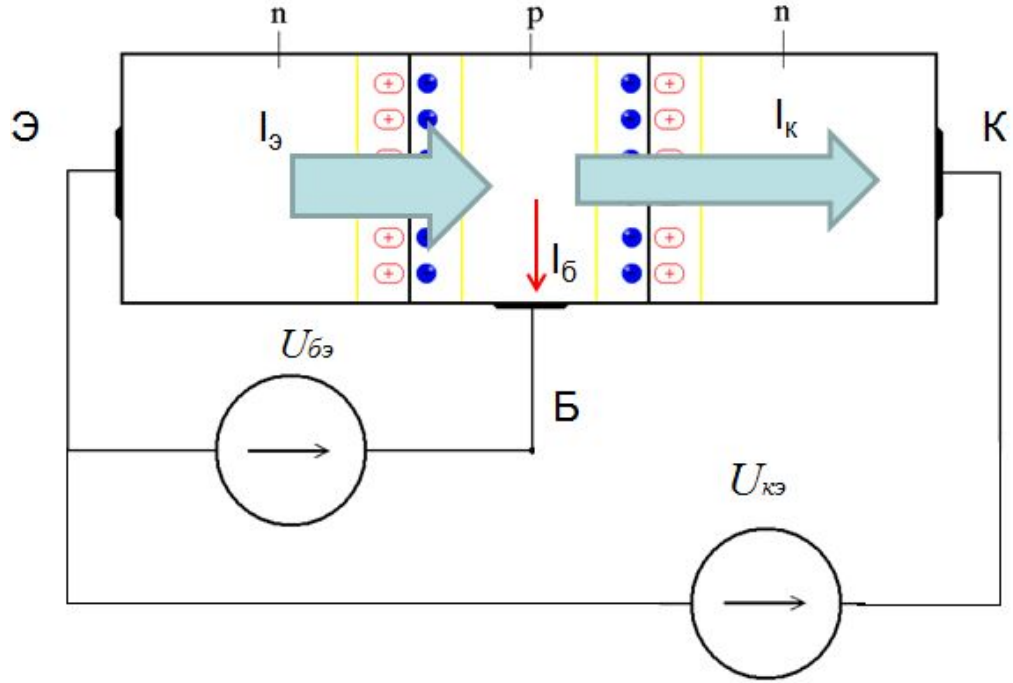
Транзистор может включаться по схеме с:

- общей базой;
- общим коллектором;
- общим эмиттером (самая распространенная)

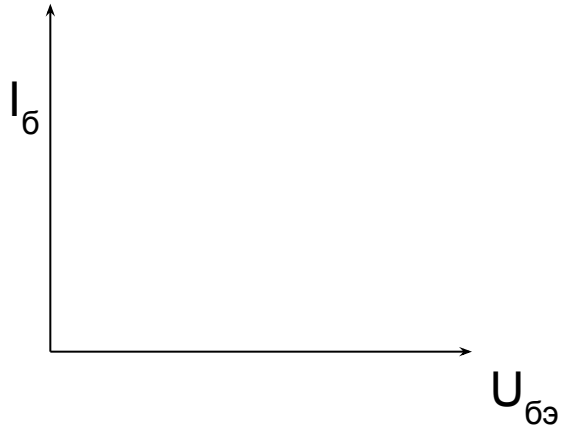


Включение по схеме с ОЭ

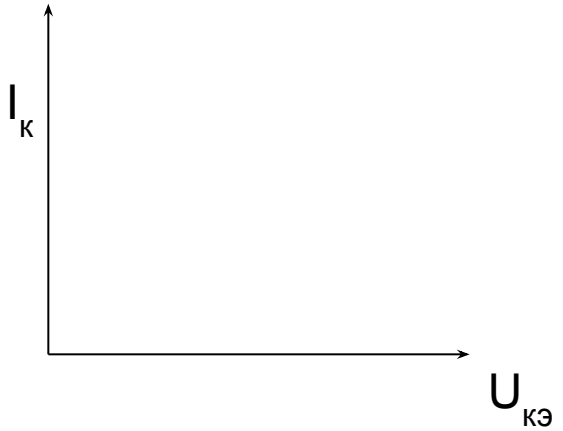
3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



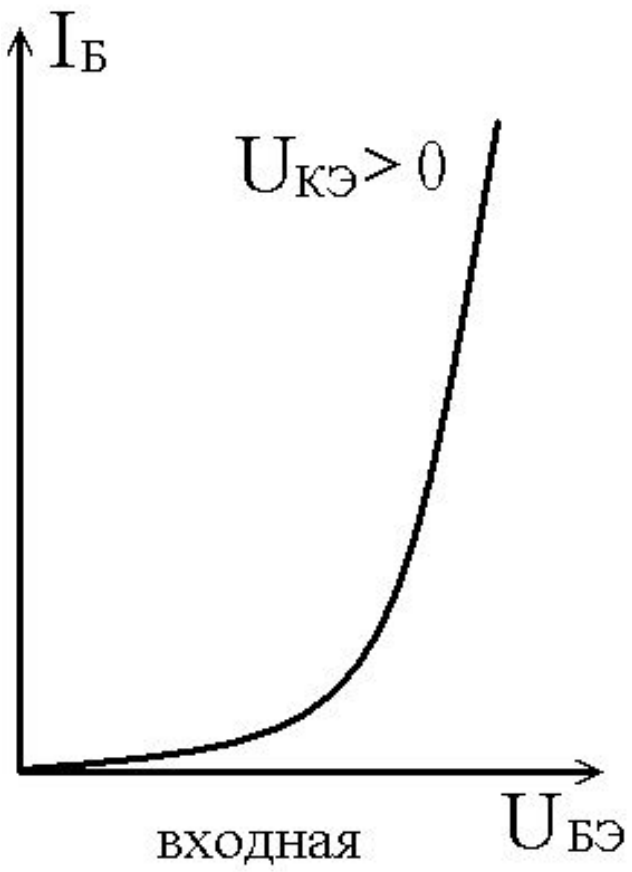
Входная характеристика $I_б(U_{бэ})$ – характеристика pn-перехода

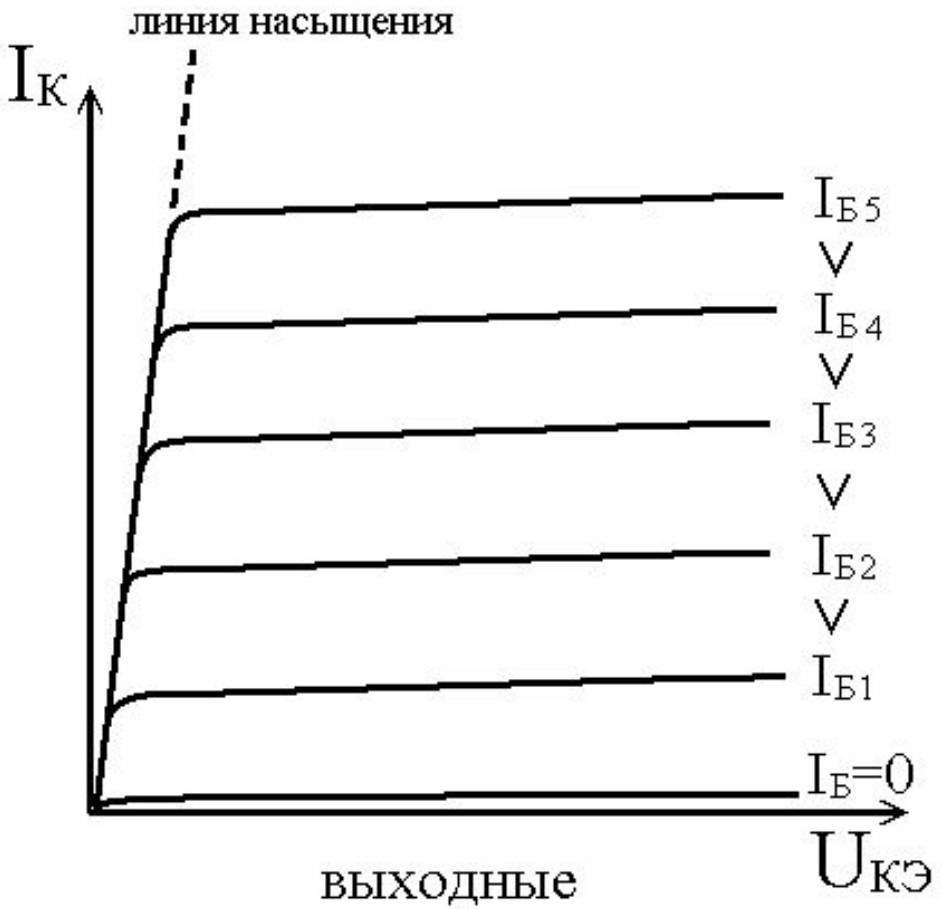


Выходная характеристика $I_к(U_{кэ})$

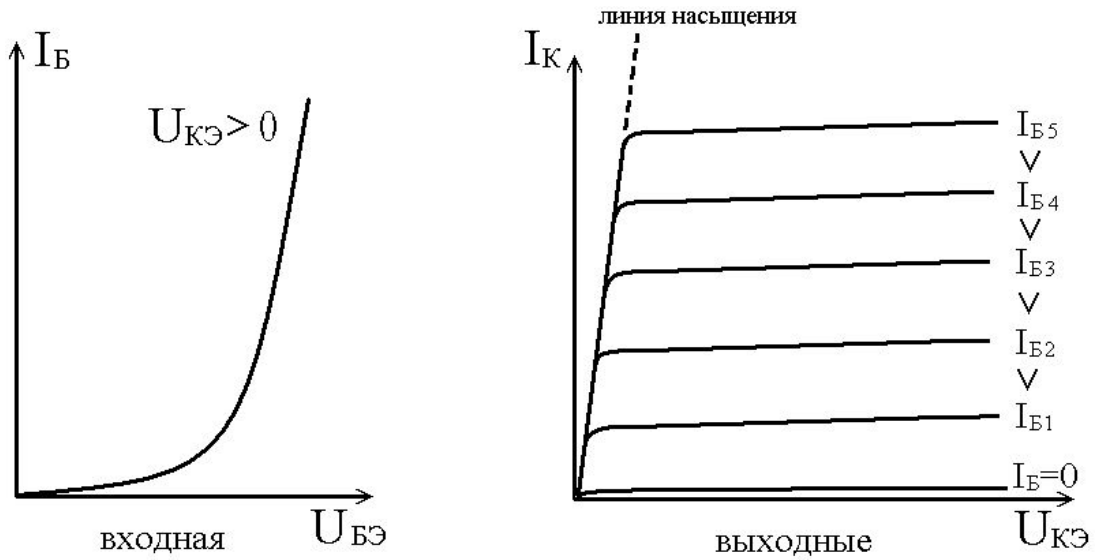


3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



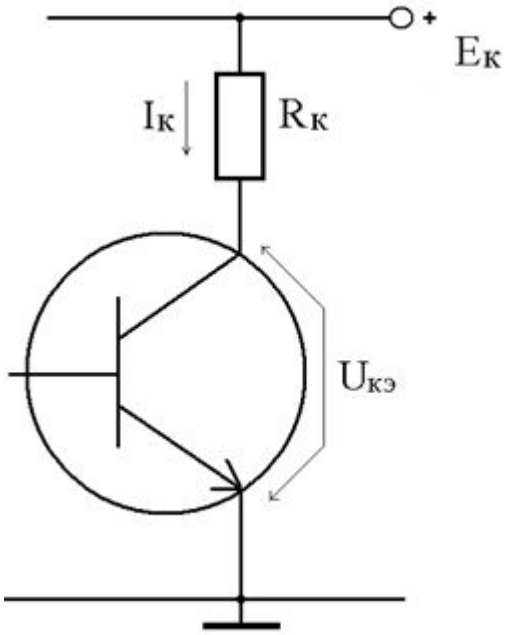


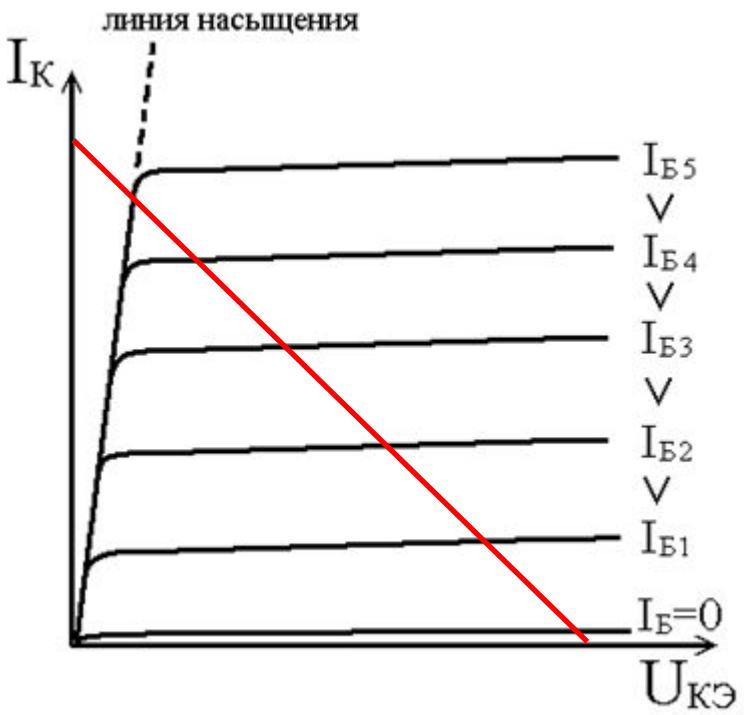
3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ



Рабочая область характеристик транзистора ограничена

- Максимальным напряжением $U_{кэ}$
- Максимальным током коллектора $I_к$
- Максимальной мощностью коллектора $P_к$
- Минимальным (тепловым) током коллектора $I_{к0}$.



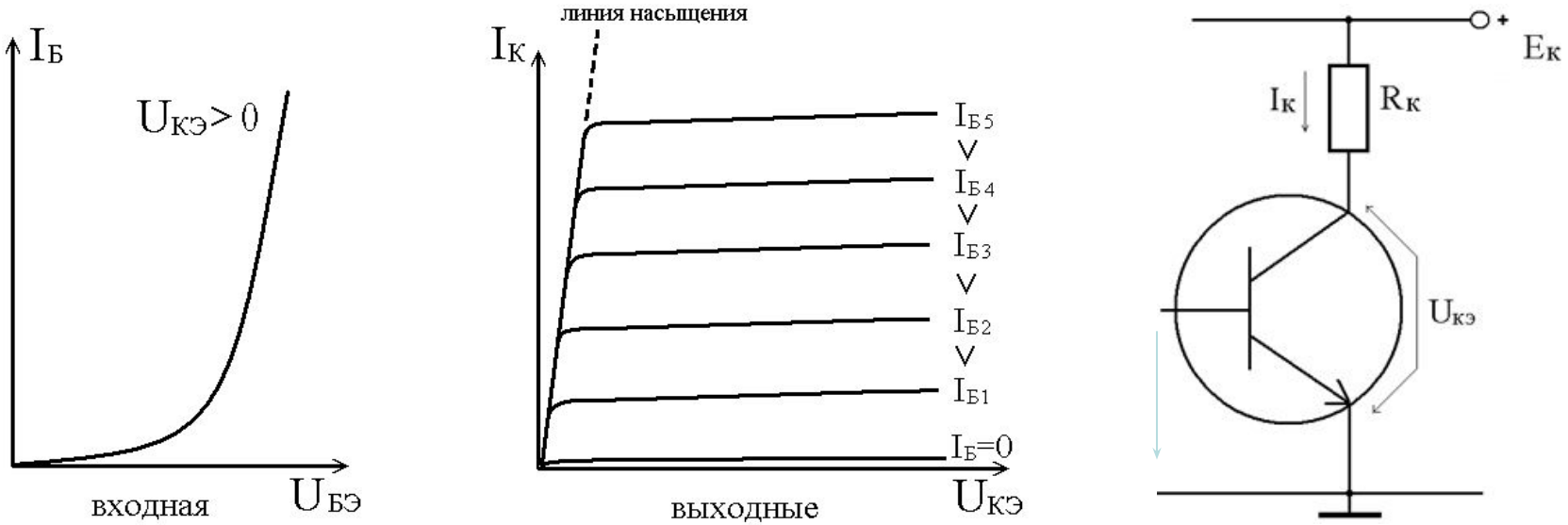


$$U_{кэ} = E_к - I_к \cdot R_к$$

режимы работы транзистора:

- линейный, рабочая точка находится в пределах линейных участков характеристик (используется в усилителях переменного тока)
- насыщение, когда ток $I_б$ настолько велик, что $U_{кэ}$ уже не зависит от тока $I_к$ и минимально.
- отсечка, когда оба перехода в транзисторе закрыты, и $U_{кэ}$ максимально и не зависит от $I_б$ и $I_к$. (режимы отсечки и насыщения используются в транзисторных ключах)
- инверсный режим, когда переход база-эмиттер смещен в обратном направлении, а коллектор-база – в прямом (применяется в двунаправленных ключах)

3.2. Основные характеристики транзистора в схеме с ОЭ

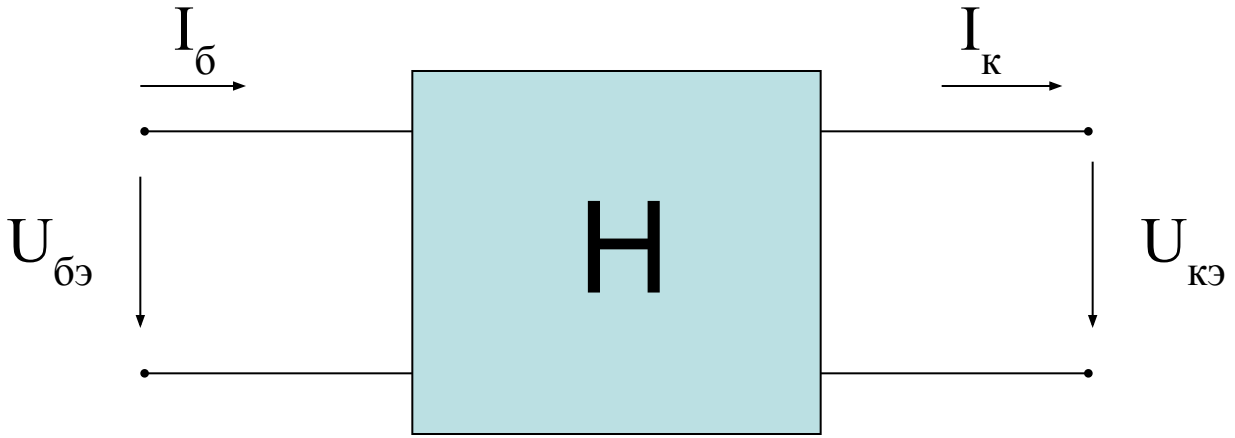


В линейном режиме *приращения* токов и напряжений пропорциональны. Этот режим используется в усилителях. Пропорциональность изменений оков и напряжений важна для сохранения формы сигнала.

Чтобы попасть в линейный режим и усиливать переменное напряжение, на вход транзистора необходимо подавать постоянную составляющую напряжения, называемую напряжением покоя. Без напряжения покоя усилить переменное напряжение или ток нельзя, т.к. транзистор пропускает только токи одной полярности.

3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

В пределах линейных участков входной и выходной характеристик транзистора переменные составляющие входных и выходных токов и напряжений связаны друг с другом линейными уравнениями. Поэтому транзистор можно описать как линейный четырехполюсник.



3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

$$\Delta u_{бэ} = h_{11} \cdot \Delta i_б + h_{12} \cdot \Delta u_{кэ}$$

$$\Delta i_к = h_{21} \cdot \Delta i_б + h_{22} \cdot \Delta u_{кэ}$$

Смысл h-параметров:

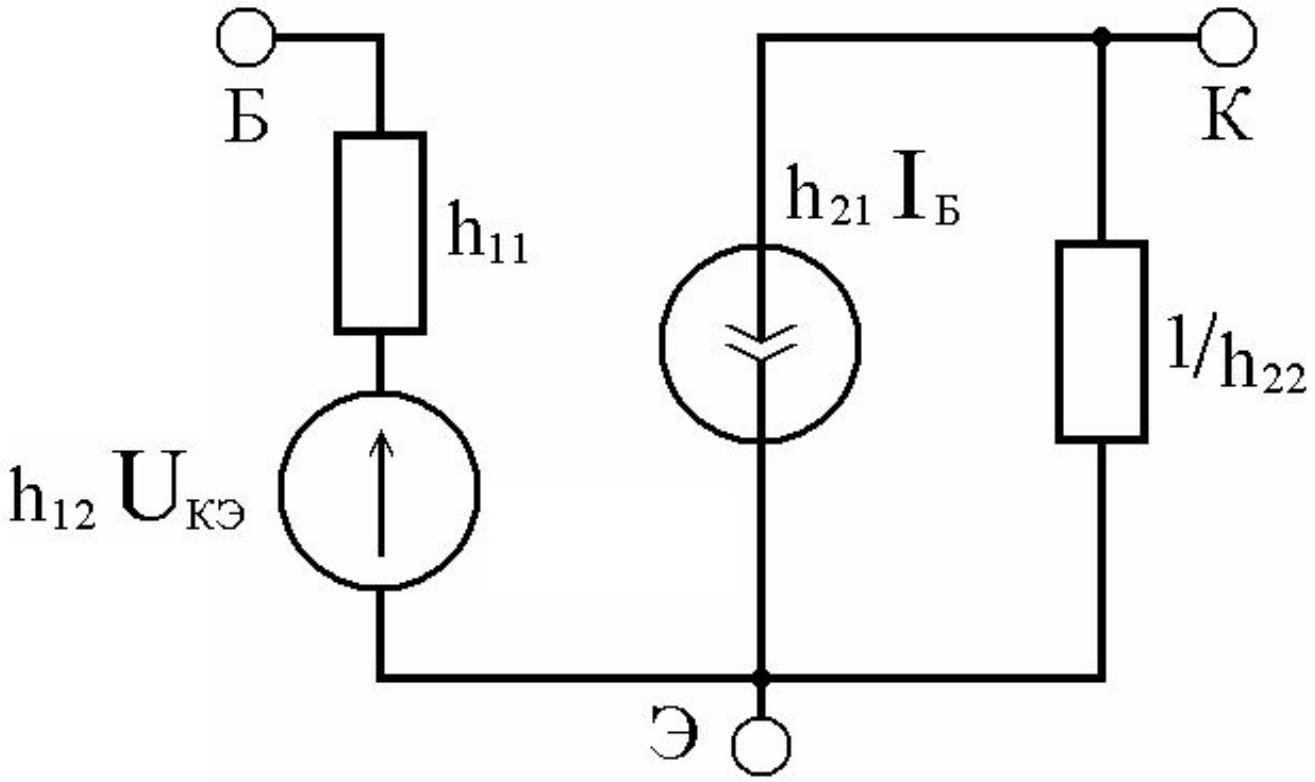
h_{11} – входное сопротивление при кз на выходе

h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению при хх на выходе

h_{21} – коэффициент передачи по току при кз на выходе

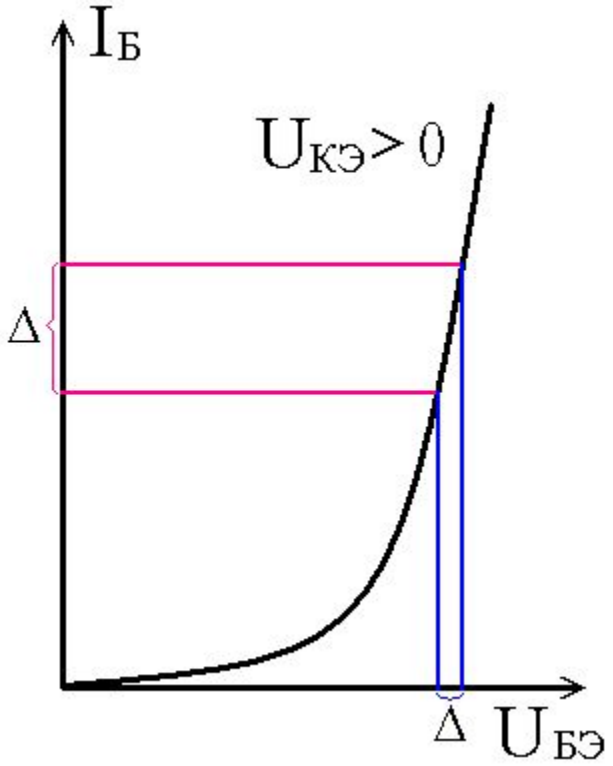
h_{22} – выходная проводимость при хх на входе

Схема замещения транзистора на переменном токе

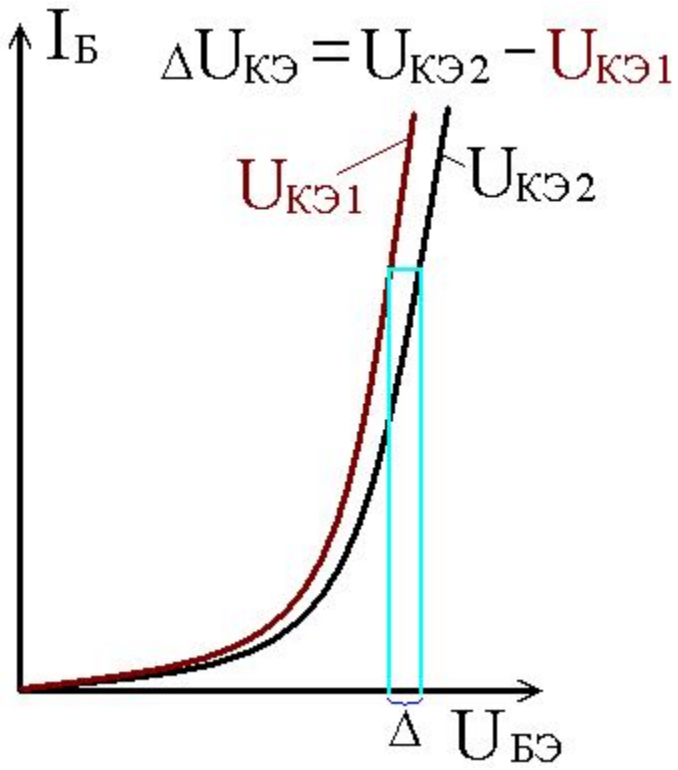


Определение h-параметров по характеристикам транзистора

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}}$$



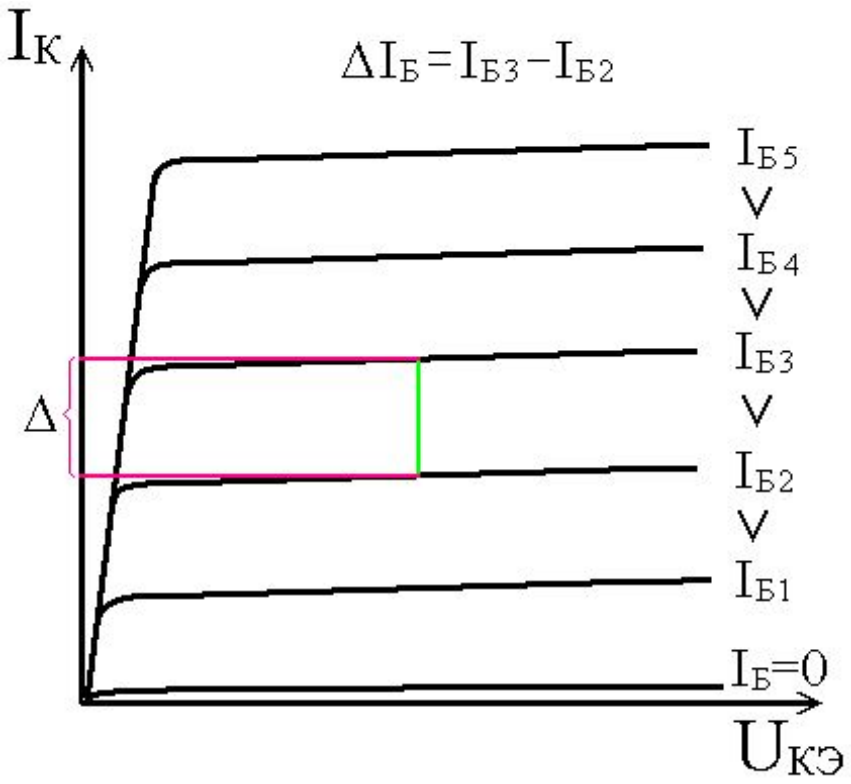
$$h_{12} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}}$$

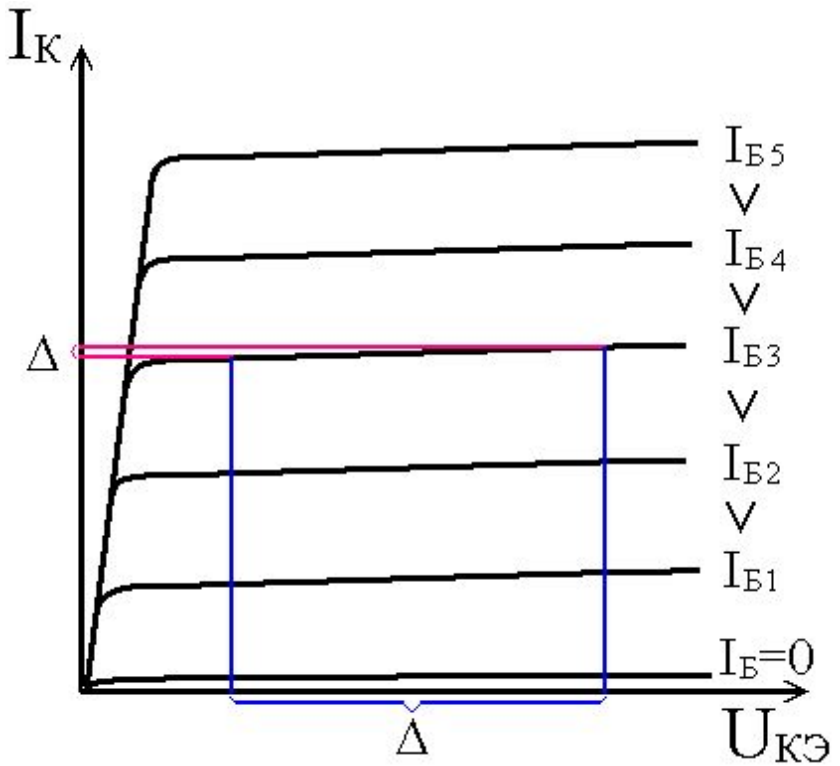


3.3. Схема замещения транзистора на переменном токе

$$h_{21} = \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}}$$





В паспортных данных транзистора указывают:

- h_{11}
- h_{22}
- h_{21}
- $I_{кmax}$
- $U_{кэmax}$
- $P_{кmax}$

Униполярные (полевые) транзисторы

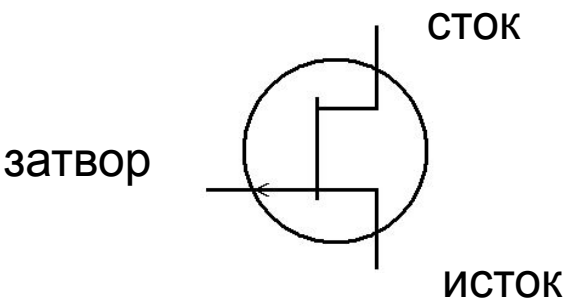
Полевые транзисторы

- Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, ток которого управляется электрическим полем.
- В полевых транзисторах используются заряды только одного типа: либо электроны, либо дырки.
- Носители заряда перемещаются от электрода, называемого ИСТОКОМ к электроду, называемому СТОКОМ. Электрическое поле, регулирующее сопротивление в канале (и ток) формируется с помощью третьего электрода – ЗАТВОРА.

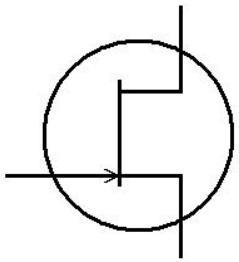
Полевые транзисторы делятся на:

1. FET: С управляемым p-n переходом.
2. MOS: С изолированным затвором (с индуцированным каналом (МОП), со встроенным каналом (МДП)).

5.1. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляемым переходом

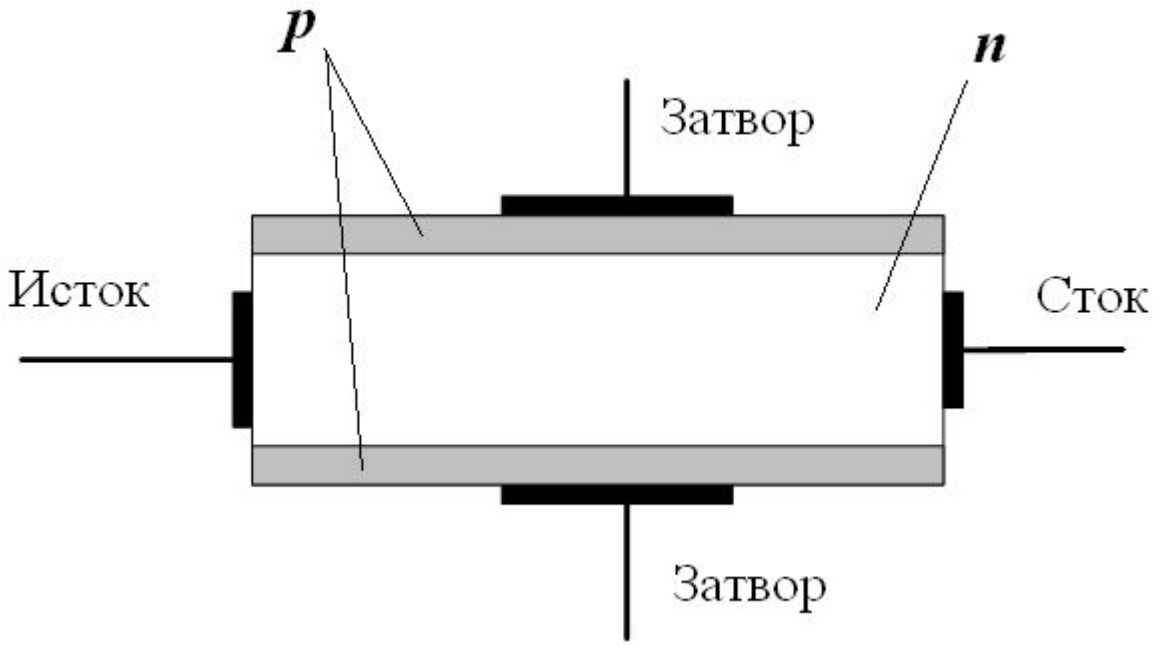


p – канал

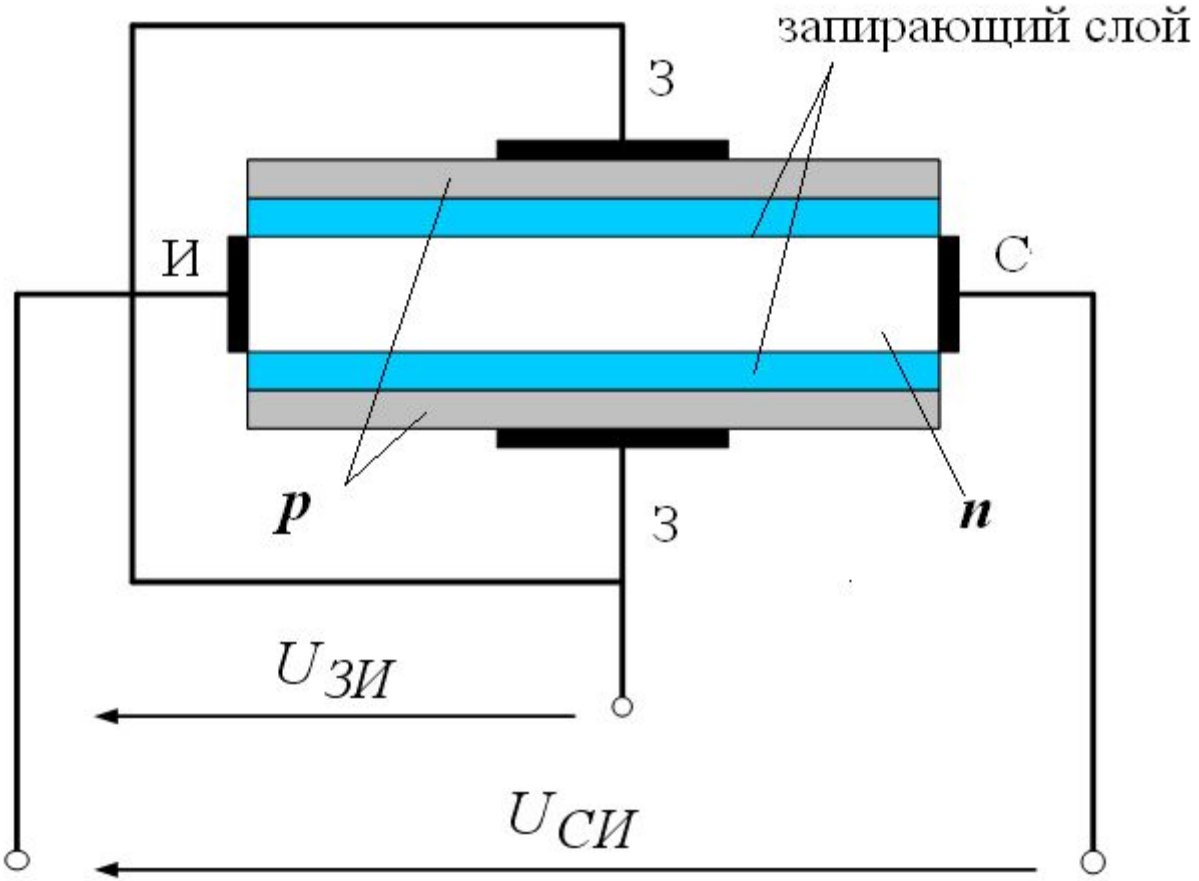


n - канал

Транзистор с n-каналом



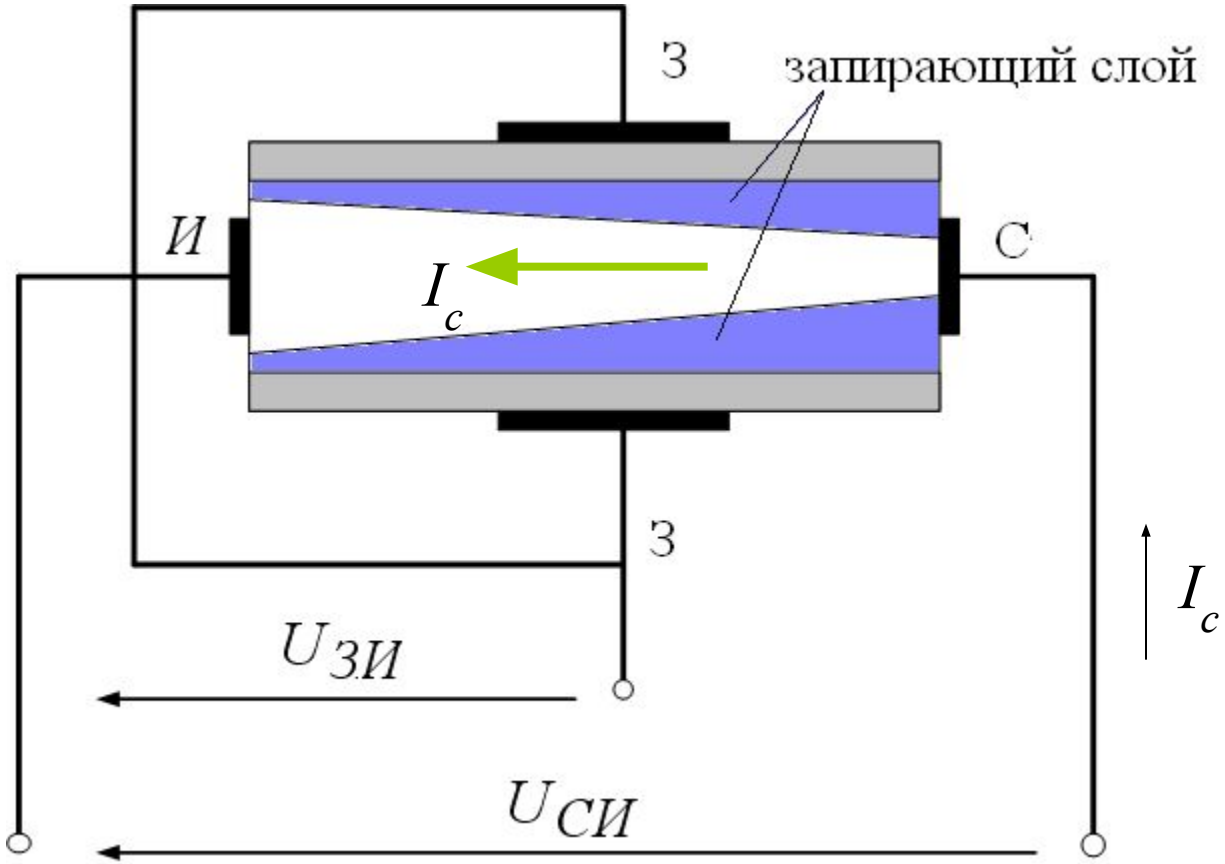
Подадим $U_{ЗИ} < 0$, чтобы закрыть p-n переходы и $U_{СИ} = 0$



Ширина n-канала уменьшилась, а его сопротивление выросло.

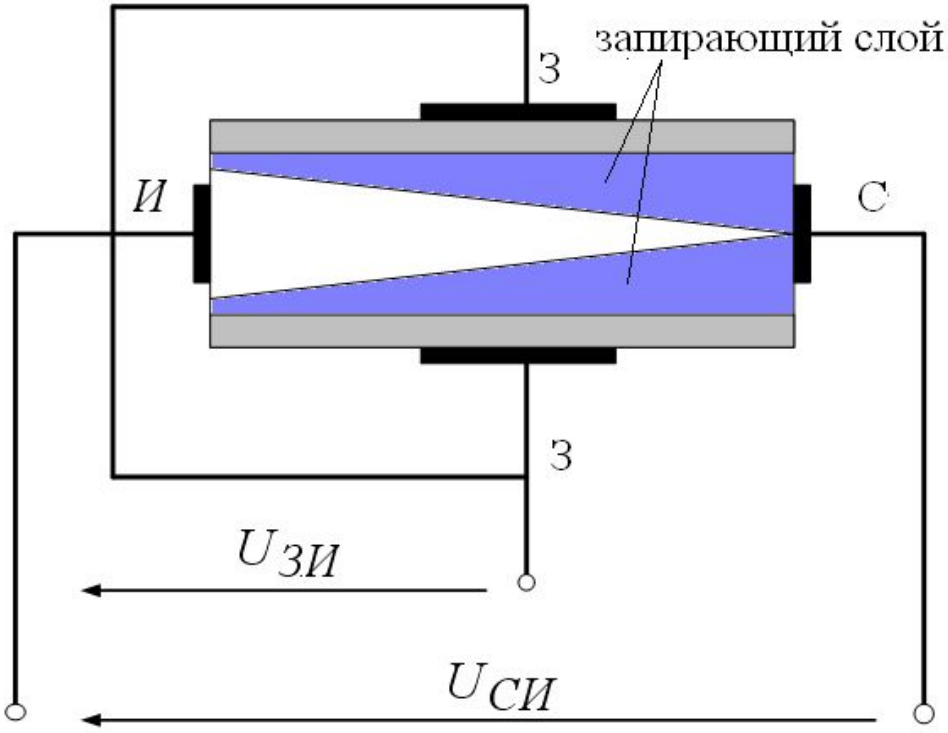
Полевые транзисторы

Теперь увеличим $U_{СИ} > 0$, появится ток в n-канале (ток стока)



Минимальная ширина канала определяется как $U_{ЗИ}$, так и $U_{СИ}$

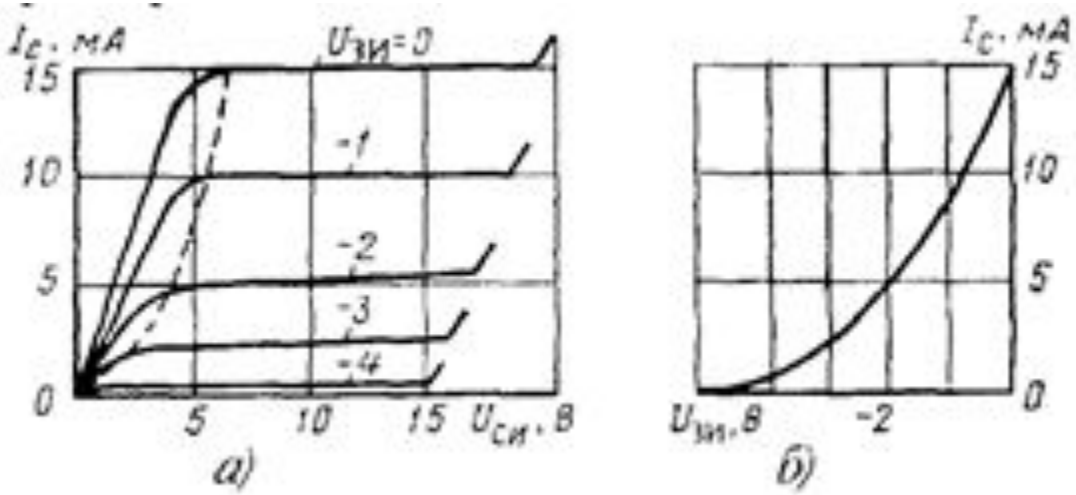
Существует такое $U_{СИ} = U_{зап}$, что сечение n-канала уменьшается до нуля, а электропроводность резко падает



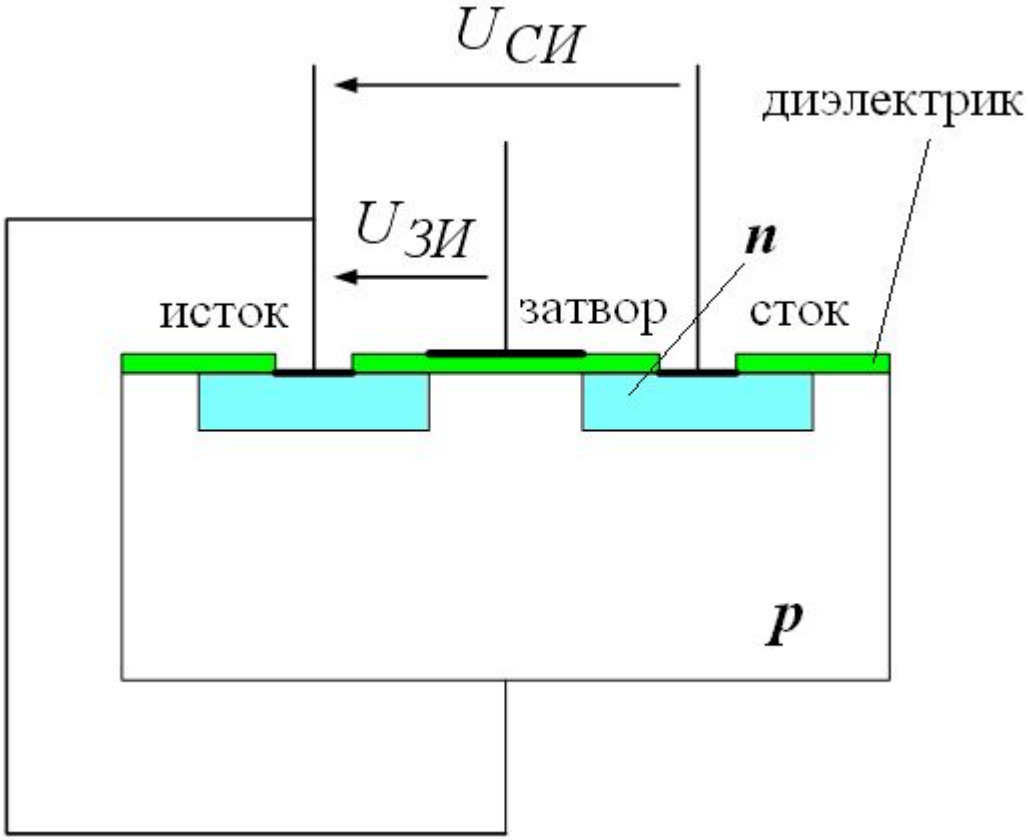
При дальнейшем увеличении $U_{си}$ ток стока меняться не будет

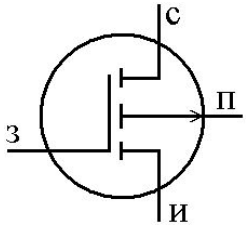
Полевые транзисторы

- При $U_{ЗИ} < U_{зап}$ ток стока сильно зависит от $U_{ЗИ}$.
- Величина $U_{зап}$ зависит от напряжения $U_{ЗИ}$. Чем меньше $U_{ЗИ}$, тем больше значения запирающего напряжения $U_{зап}$.

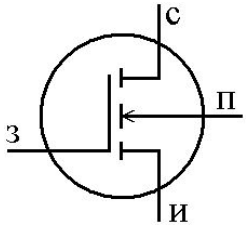


МДП-транзисторы (металл-диэлектрик-полупроводник)



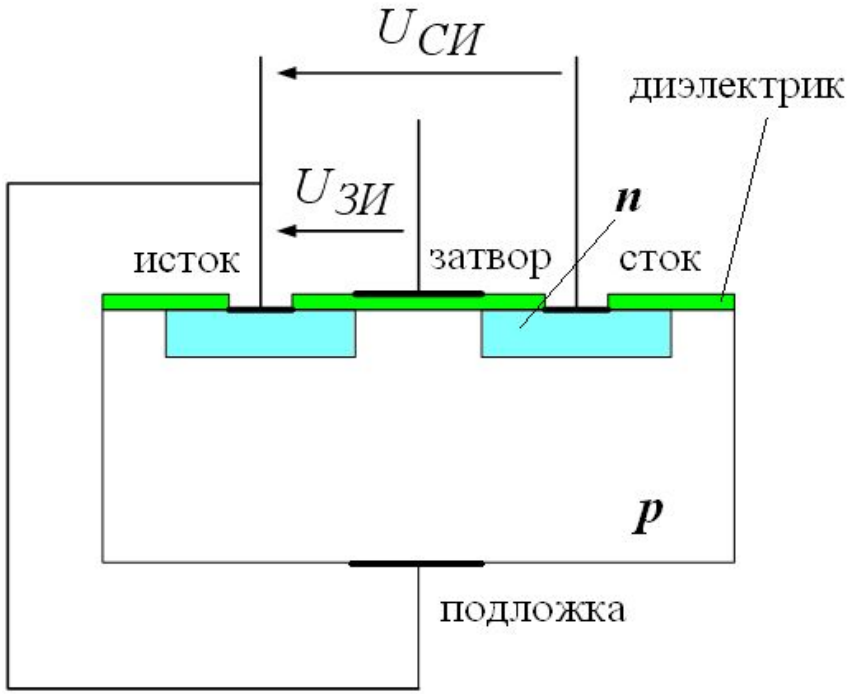


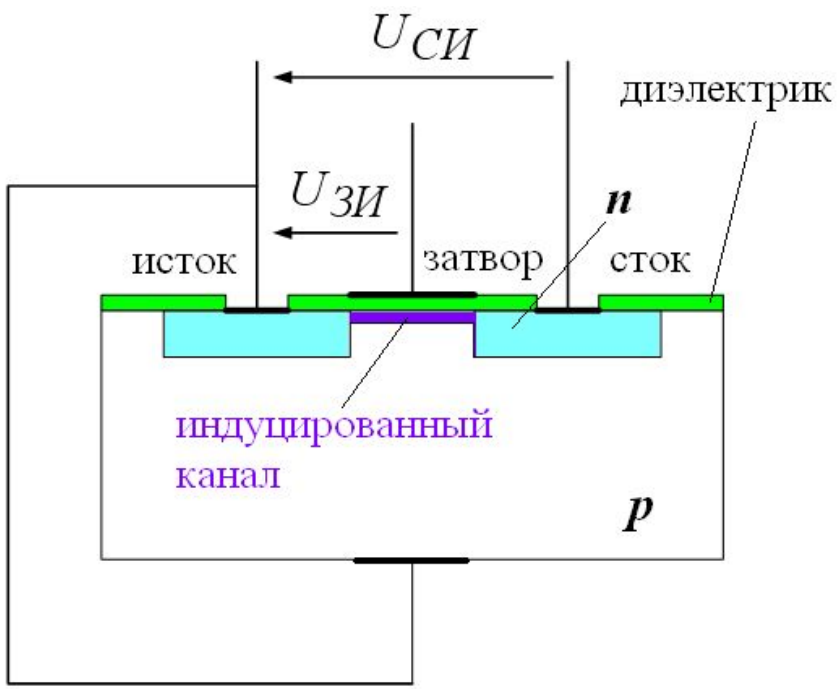
p – канал

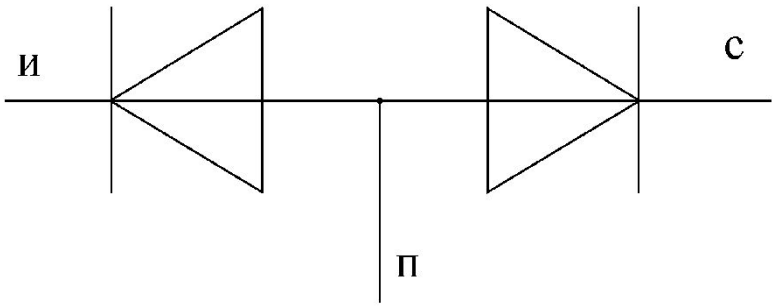


n – канал

МДП-транзисторы





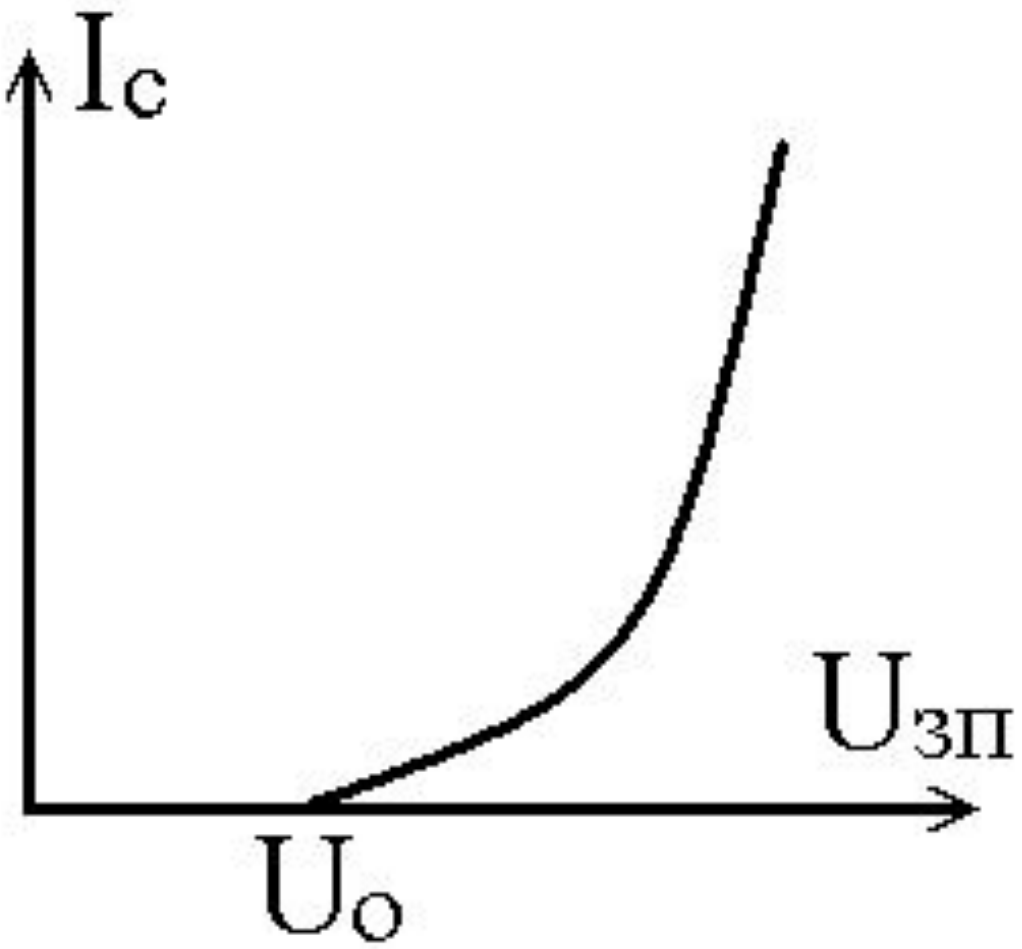


Дырки перемещаются от затвора к подложке, электроны – наоборот, около затвора формируется область, обогащенная электронами, возникает канал для тока стока.

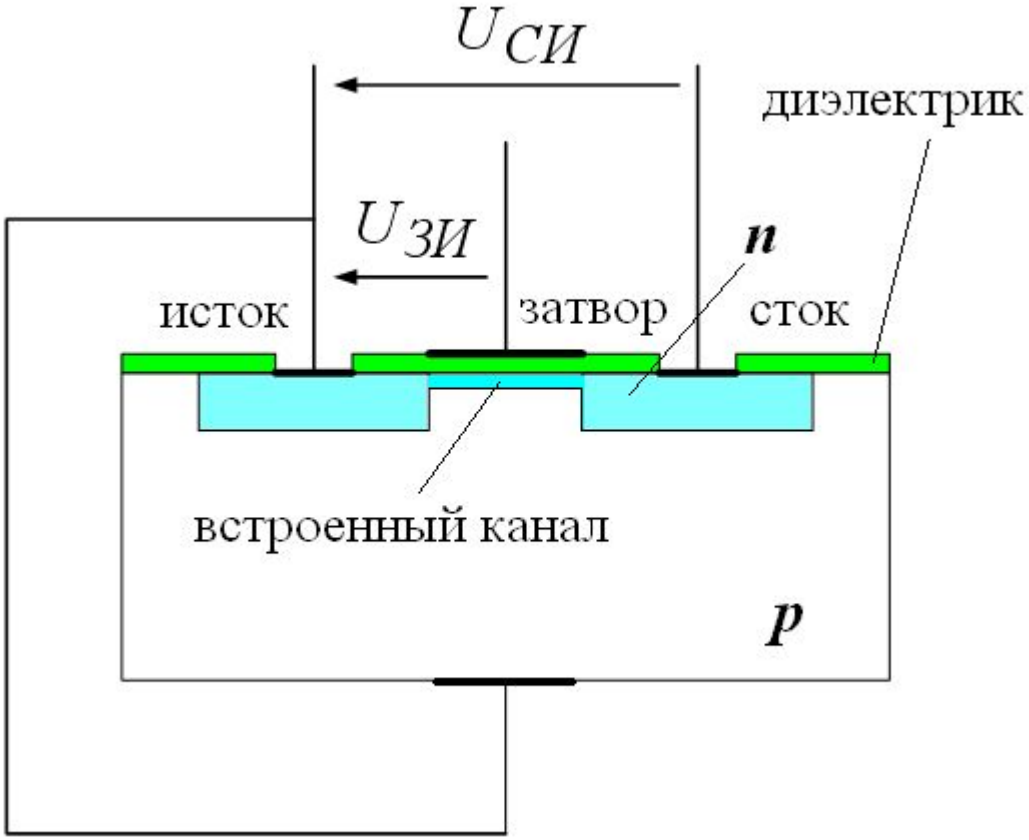
$U_{ЗИ} = 0$

$U_{ЗИ} > 0$

Сток - затворная характеристика

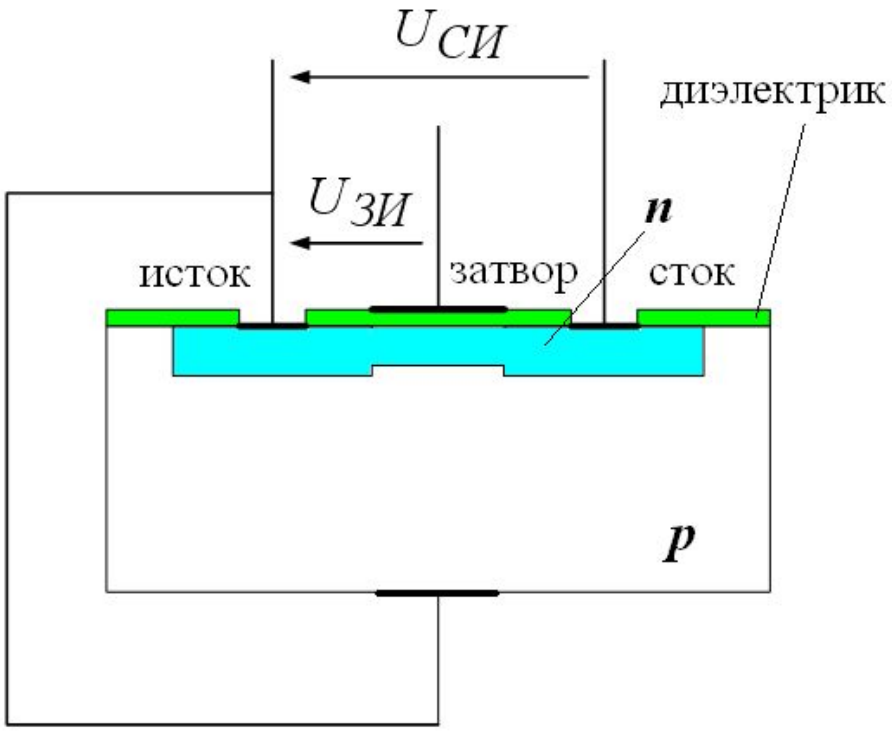


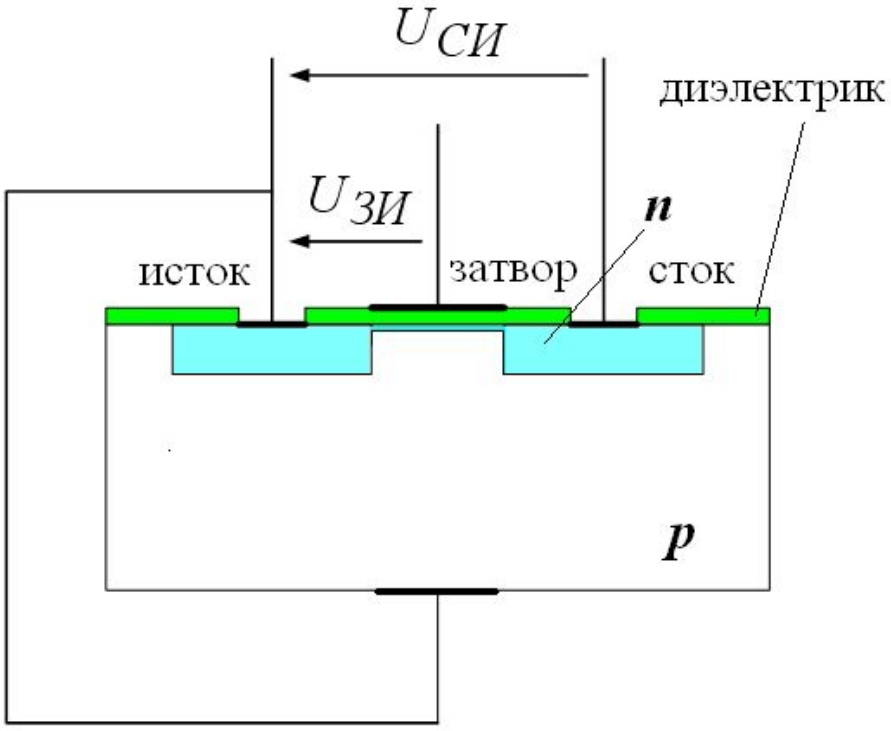
МОП-транзистор со встроенным каналом



Канал встроен в стурктуру. При $U_{ЗИ}$ = 0 ток стока существует

МОП-транзисторы





- $U_{ЗИ} > 0$

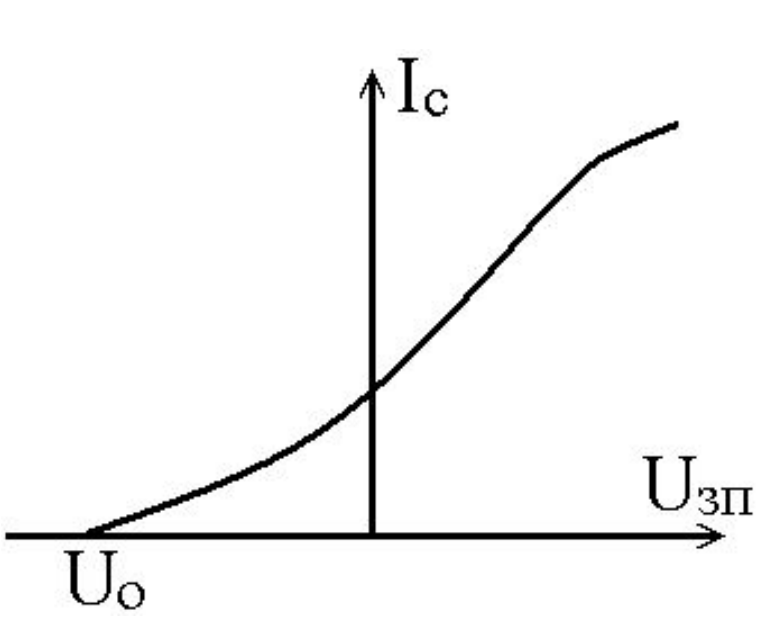
Сечение канала увеличивается, проводимость растет, увеличивается ток стока

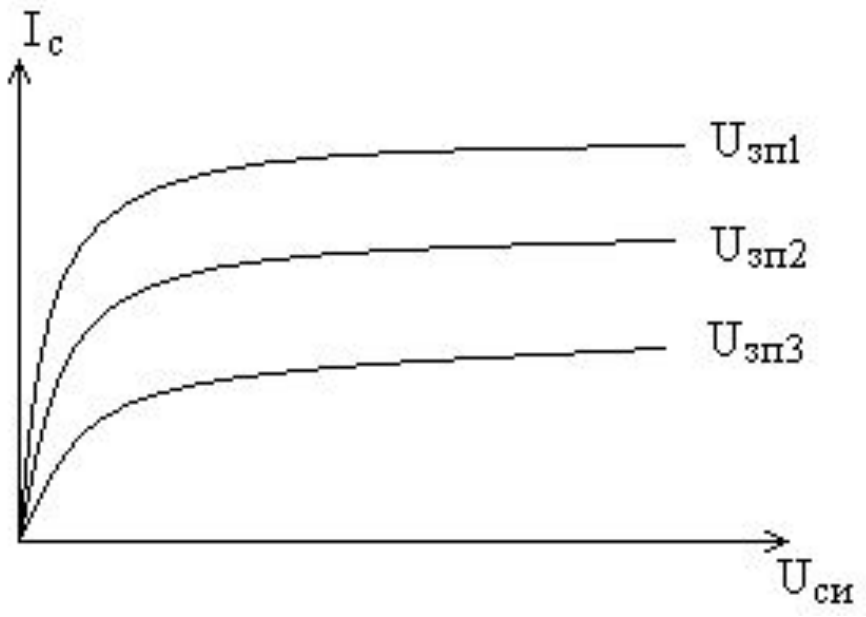
- $U_{ЗИ} < 0$

Сечение канала уменьшается, проводимость падает, снижается ток стока

МОП-транзисторы

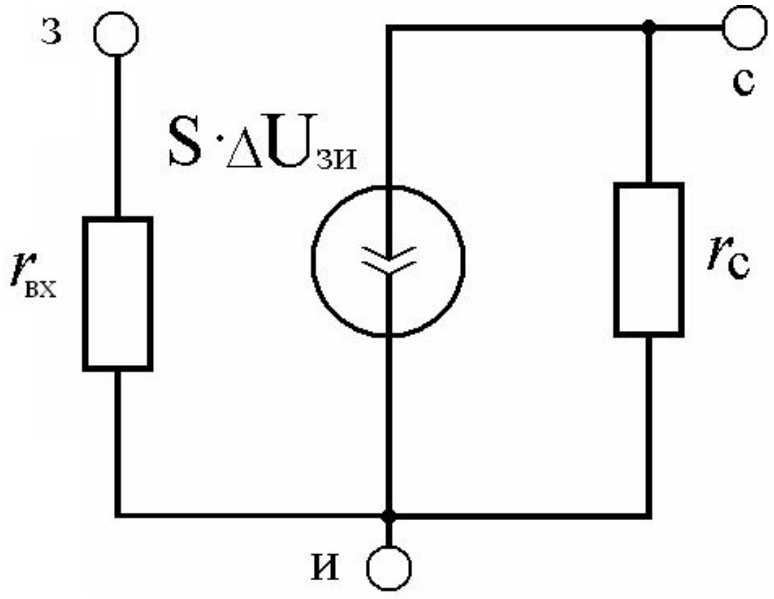
- Сток-затворная и выходная характеристики МОП-транзистора





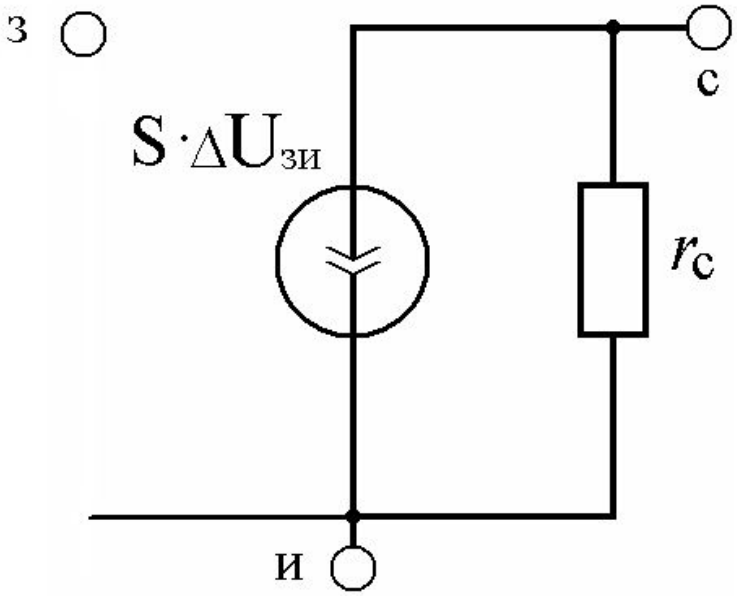
МДП-транзисторы управляются однополярным напряжением, МОП-транзисторы – двуполярным.

Схема замещения полевого транзистора в области средних частот



МДП-транзистор

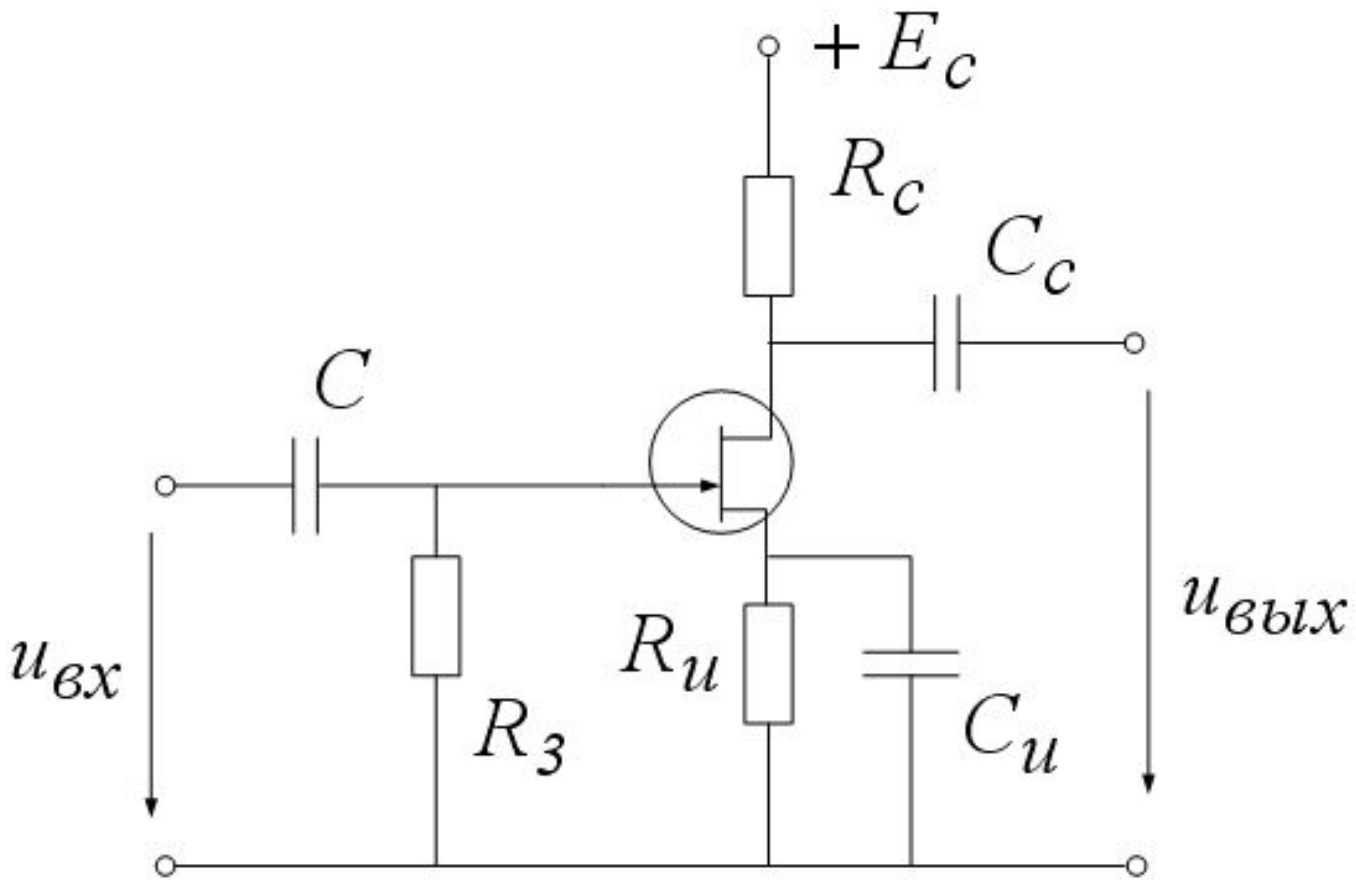
$R_{вх} \approx 10^9$ Ом



МОП-транзистор

$R_{вх} \approx \infty$

Полевые транзисторы

- Полевые транзисторы могут использоваться в тех же устройствах, что и биполярные транзисторы.
- БПТ управляется током базы, полевые транзисторы – напряжением между затвором и истоком
- Входная цепь полевого транзистора не потребляет ток (в отличие от БПТ)!!!

Усилитель на полевом транзисторе