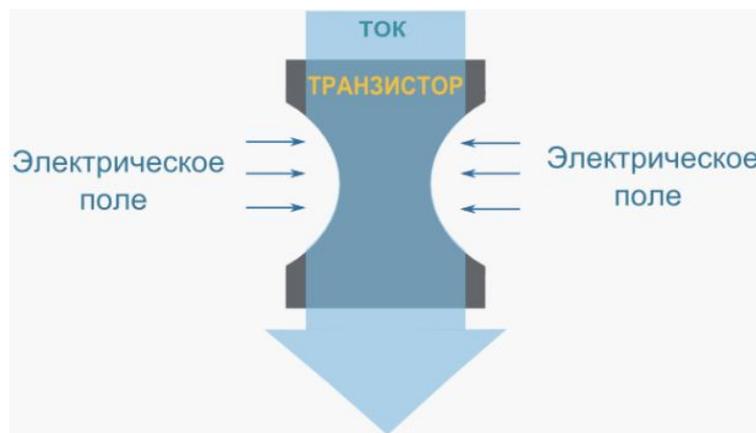


# Логические элементы на полевых транзисторах

**Полевой транзистор** – транзистор, в котором сила проходящего через него тока регулируется внешним электрическим полем, т. е. напряжением.

Это принципиальное различие между ним и биполярным транзистором, где сила основного тока регулируется управляющим током.



Принцип действия полевого транзистора

Поскольку у полевого транзистора нет управляющего тока, то у него очень высокое входное сопротивление, достигающее сотен ГигаОм и даже ТераОм (против сотен КилоОм у биполярного транзистора).

Полевые транзисторы иногда называют униполярными, поскольку носителями электрического заряда в нем выступают только электроны или только дырки.

В работе же биполярного транзистора, как следует из названия, участвует одновременно два типа носителей заряда – и электроны и дырки.

# Классификация полевых транзисторов

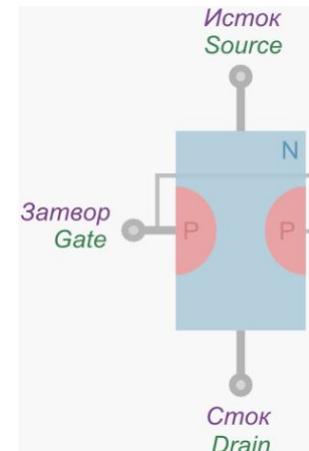
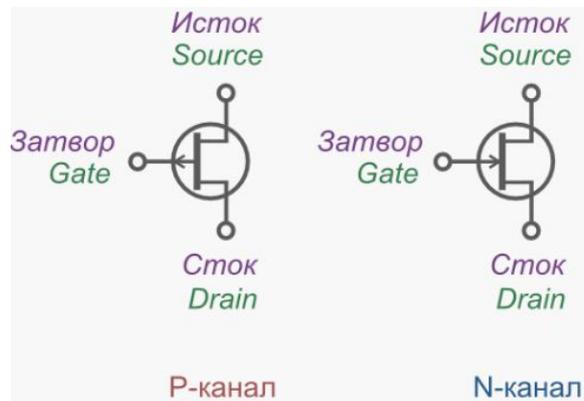
Полевые транзисторы (FET: Field-Effect-Transistors) разделяются на два типа:

- с управляющим PN-переходом (**JFET**: Junction-FET) и
- с изолированным затвором (**MOSFET**: Metal-Oxid-Semiconductor-FET).

Каждый из типов может быть как с N-каналом, так и с P-каналом.

В роли носителей электрического заряда выступают:

- у транзисторов с N-каналом – электроны.
- у транзисторов с P-каналом – дырки.

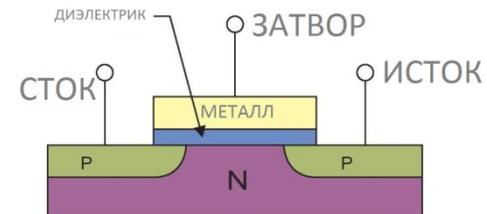


Обозначение JFET транзисторов на принципиальных схемах

# Полевой транзистор с изолированным затвором MOSFET

Полевой транзистор с изолированным затвором – это полевой транзистор, затвор которого электрически изолирован от проводящего канала полупроводника слоем диэлектрика. Благодаря этому, у транзистора очень высокое входное сопротивление (у некоторых моделей оно достигает  $10^{17}$  Ом).

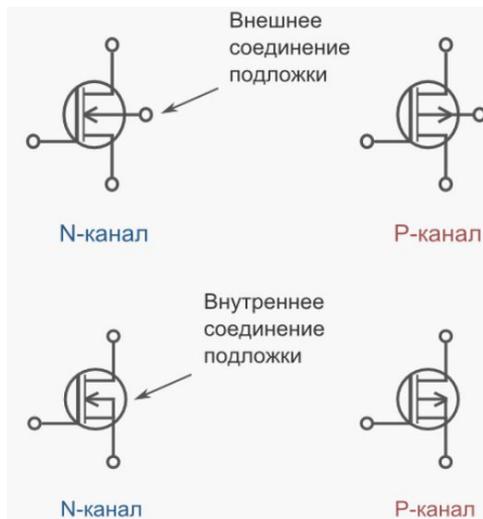
МОП-транзистор (Металл-Оксид-Полупроводник), или МДП-транзистор (Металл-Диэлектрик-Полупроводник). MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor)



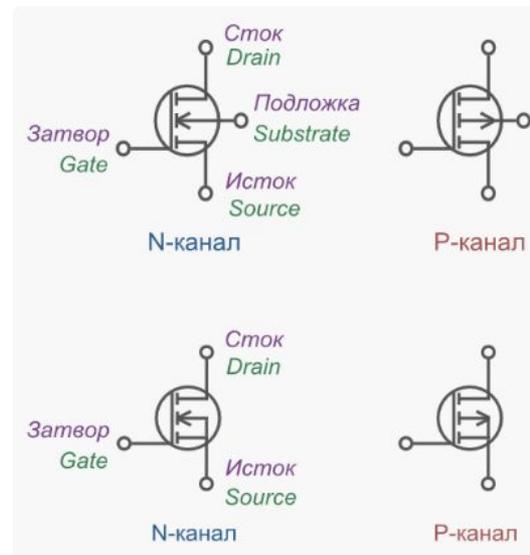
МДП-транзисторы делятся на два типа

- со встроенным каналом и
- с индуцированным каналом.

В каждом из типов есть транзисторы с N-каналом и P-каналом.

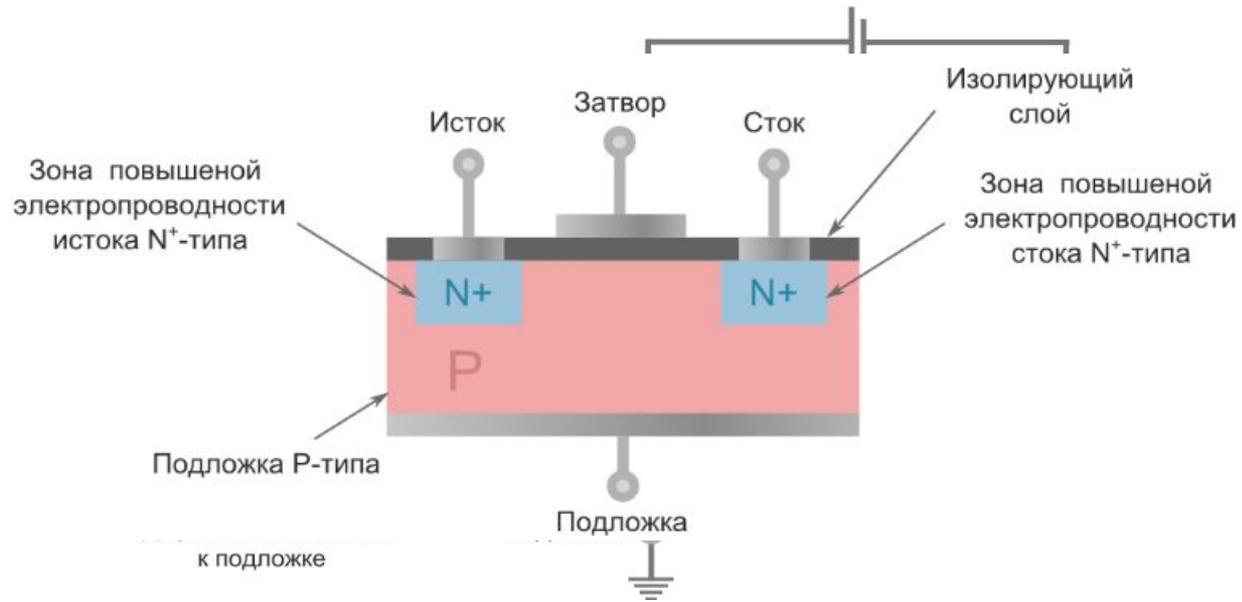


УГО МОП (MOSFET) транзистора со встроенным каналом

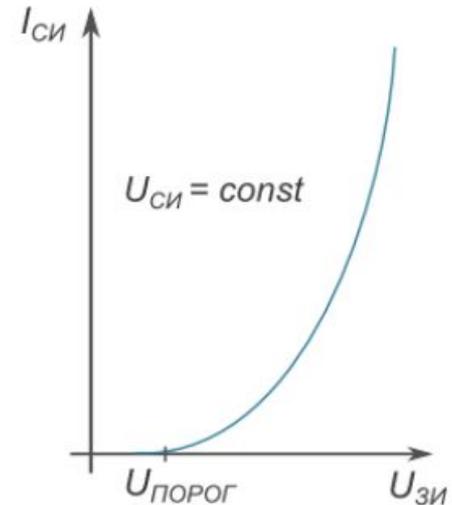


УГО МОП (MOSFET) транзистора с индуцированным каналом

# Работа n-МДП-транзистора с индуцированным каналом



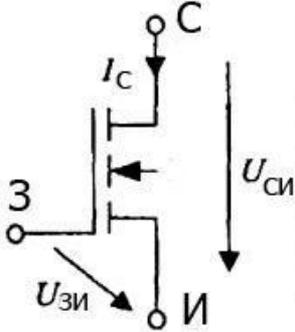
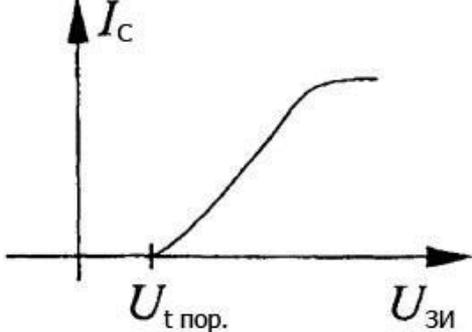
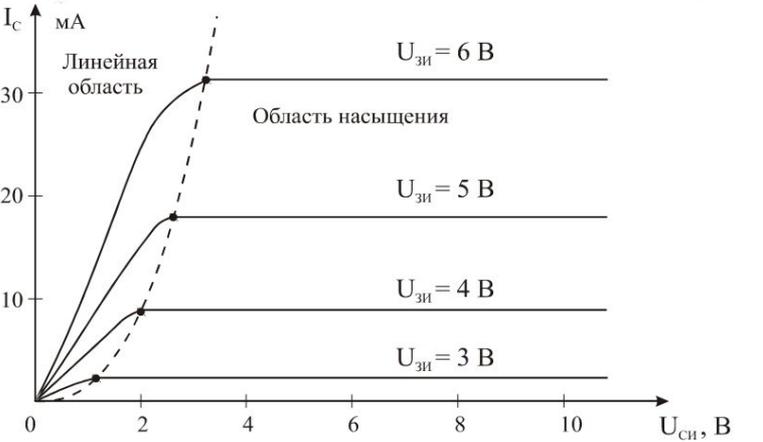
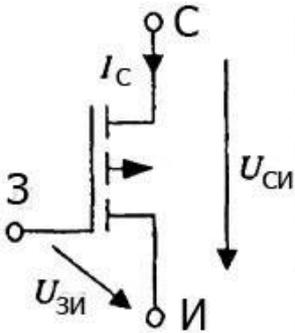
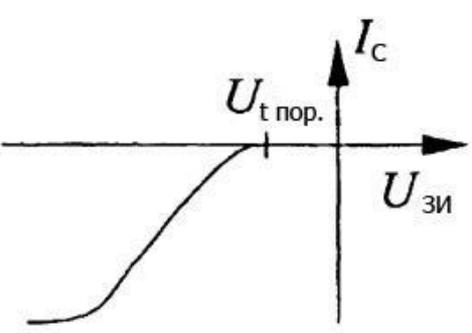
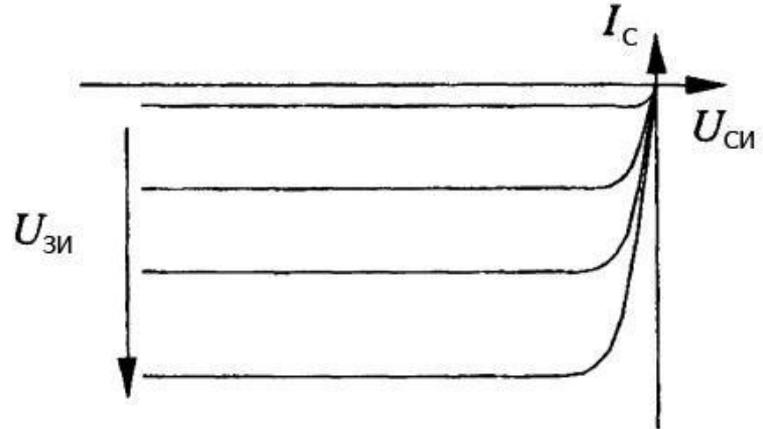
Выходные (стоковые) характеристики

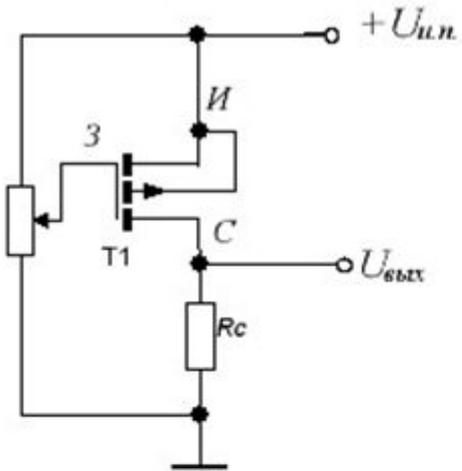


Сток-затворная характеристика

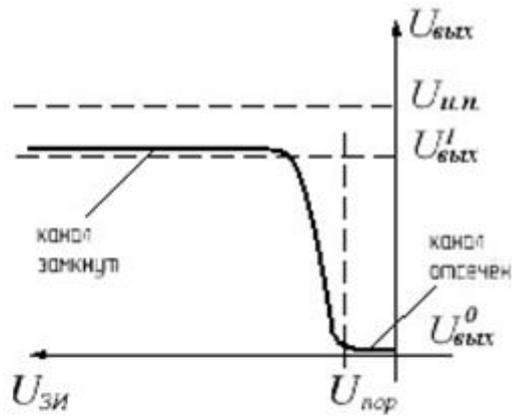
# Характеристики n-МОП и p-МОП транзисторов

Характеристики транзисторов p-типа имеют аналогичный вид, но отличаются напряжением на затворе и полярностью приложенных напряжений (зеркальное отображение в третьем квадранте).

Тип транзистора	Переходная характеристика	Выходная характеристика
<p>n-МОП</p> 		
<p>p-МОП</p> 		



р-МОП транзистор

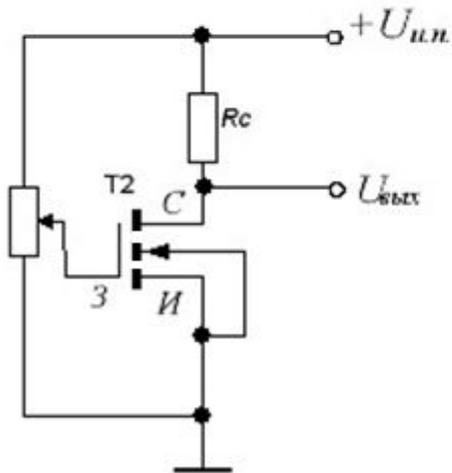


Передаточная характеристика

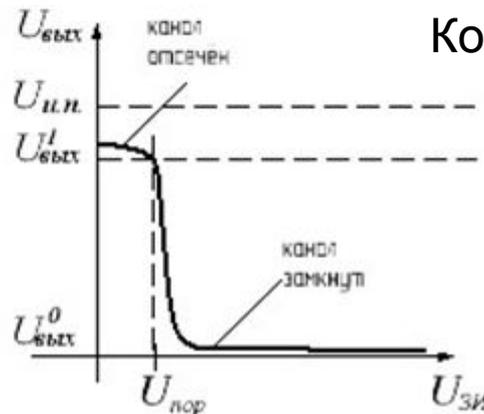
$$U_{вых}^1 = U_{И.П.} \frac{R_C}{(R_C + R_K)}$$

Крутизна передаточной характеристики:  
 $S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ}$  (при  $U_{СИ} = const$ )

Коэффициент усиления:  $K_U = SR_C$



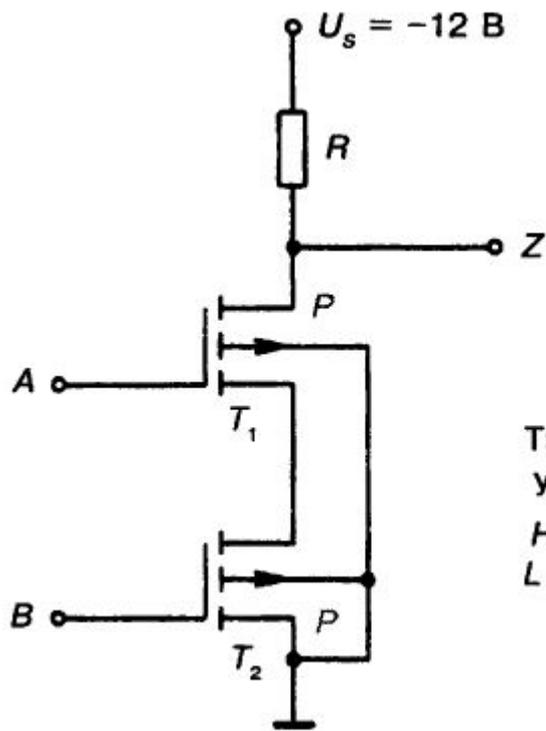
н-МОП транзистор



Передаточная характеристика

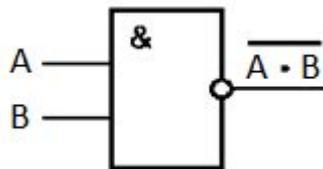
$$U_{вых}^0 = U_{И.П.} \frac{R_K}{(R_C + R_K)}$$

# Логические элементы на p-MOП транзисторах

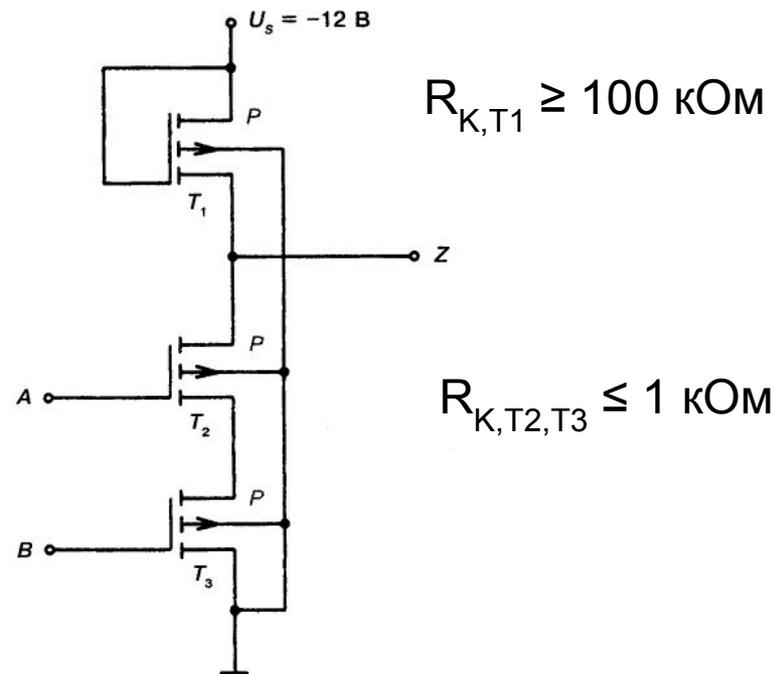


Типичный уровень:  
 $H = -1 \text{ В}$   
 $L = -11 \text{ В}$

p-MOП элемент И-НЕ



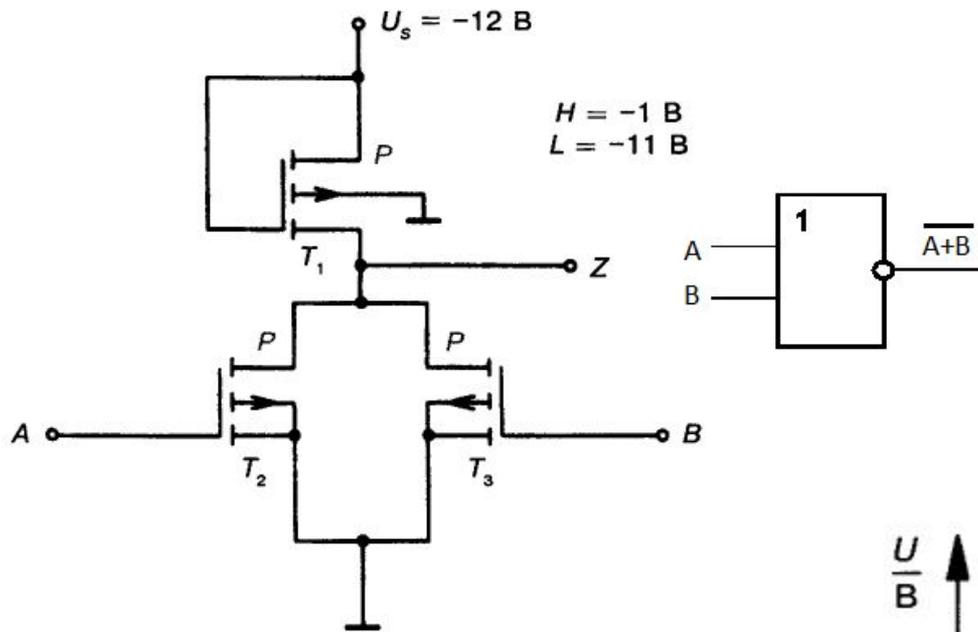
Вар.	B	A	Z	Вар.	B	A	Z
1	-11 В	-11 В	-1 В	1	L	L	H
2	-11 В	1 В	-1 В	2	L	H	H
3	-1 В	-11 В	-1 В	3	H	L	H
4	-1 В	-1 В	-11 В	4	H	H	L



$R_{K,T1} \geq 100 \text{ кОм}$

$R_{K,T2,T3} \leq 1 \text{ кОм}$

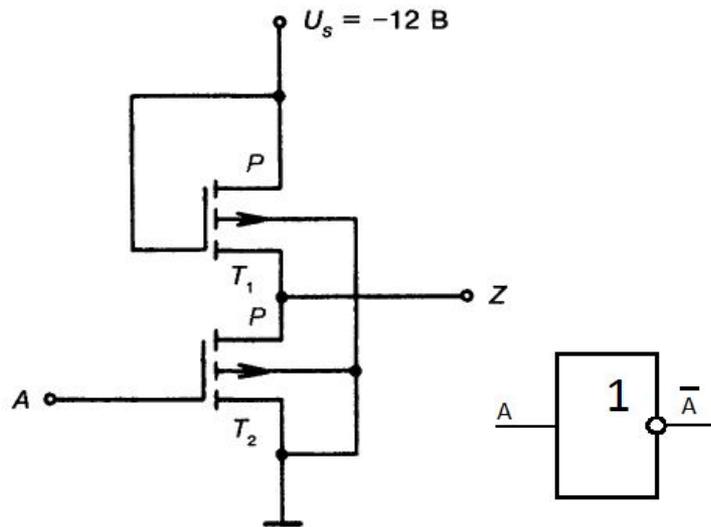
Реализация логического элемента И-НЕ в интегральной схеме



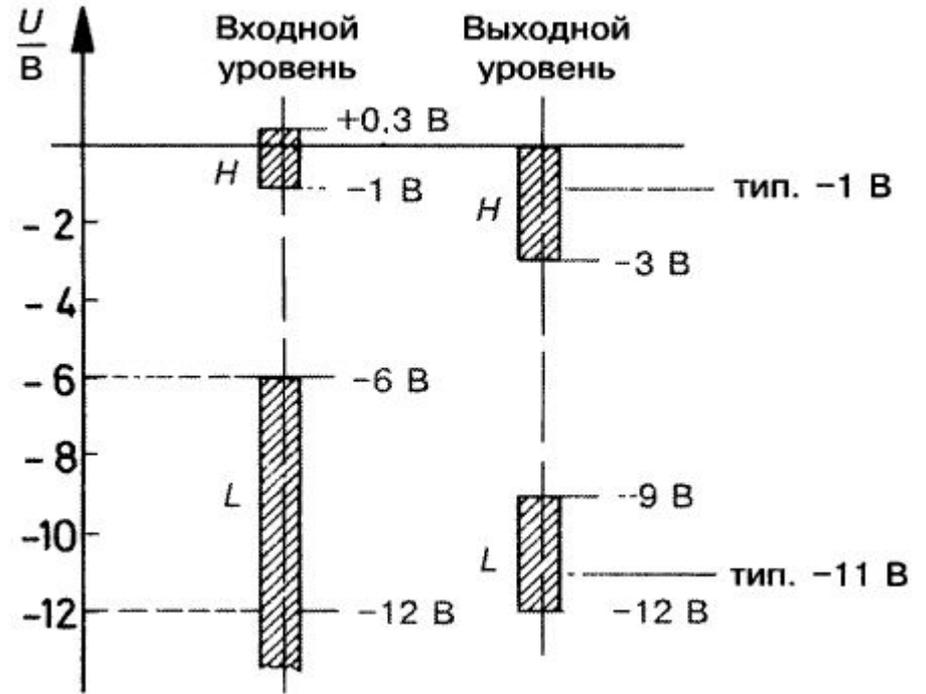
Вар.	B	A	Z
1	-11 В	-11 В	-1 В
2	-11 В	-1 В	-11 В
3	-1 В	-11 В	-11 В
4	-1 В	-1 В	-11 В

Вар.	B	A	Z
1	L	L	H
2	L	H	L
3	H	L	L
4	H	H	L

р-МОП элемент ИЛИ-НЕ



р-МОП элемент НЕ

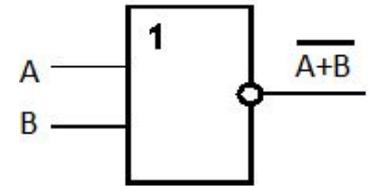
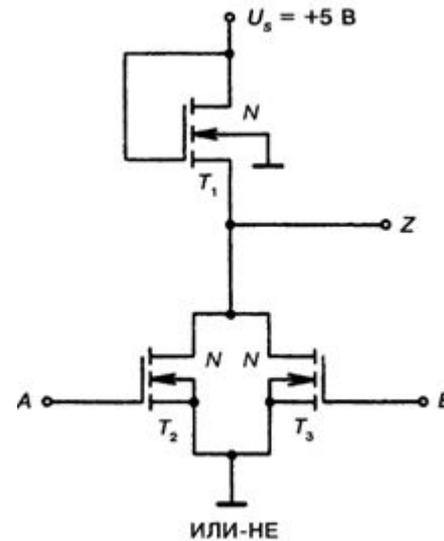
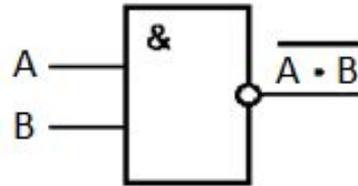
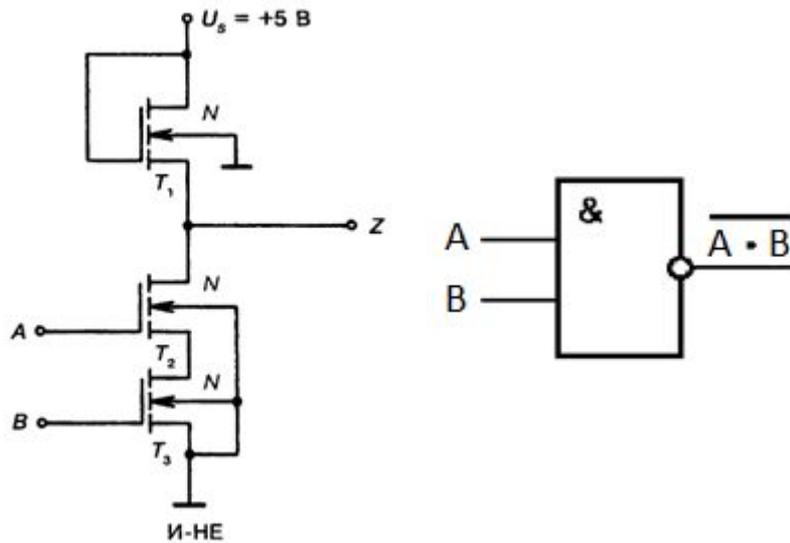


Диапазон напряжений

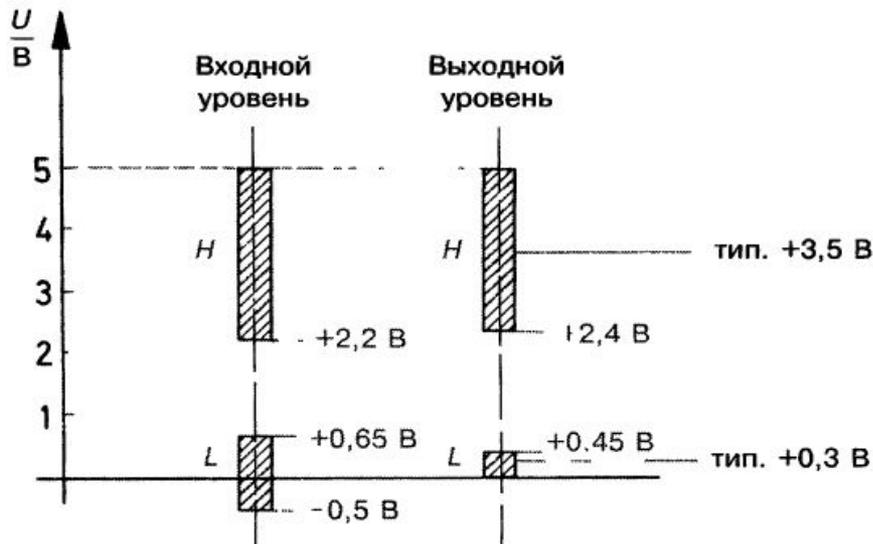
## Важнейшие параметры семейства р-МОП

1. Напряжение питания – -12В (от -9 В до -20 В)
  2. Энергопотребление на вентиль – 6 мВт при Н и 0 мВт при L
  3. Быстродействие – 400 нс.
  4. Частота переключения (макс.) – 2 МГц
  5. Зазор помехоустойчивости (типовой) – 5 В
- р-МОП логические элементы работают медленно, но устойчиво. Нуждаются в достаточно большом напряжении питания.
  - Применяются в схемах с низким быстродействием и высокой помехоустойчивостью.
  - Интегральные схемы обладают высокой плотностью упаковки элементов.

# Логические элементы на n-МОП транзисторах



n-МОП логические элементы



Диапазон напряжений

Напряжение питания – +5В

Энергопотребление – 2 мВт (L)

0 мВт (H)

Быстродействие – 50 нс

Максимальная частота – 20 МГц

Зазор помехоустойчивости – 2 В.

# Логические элементы на КМОП транзисторах

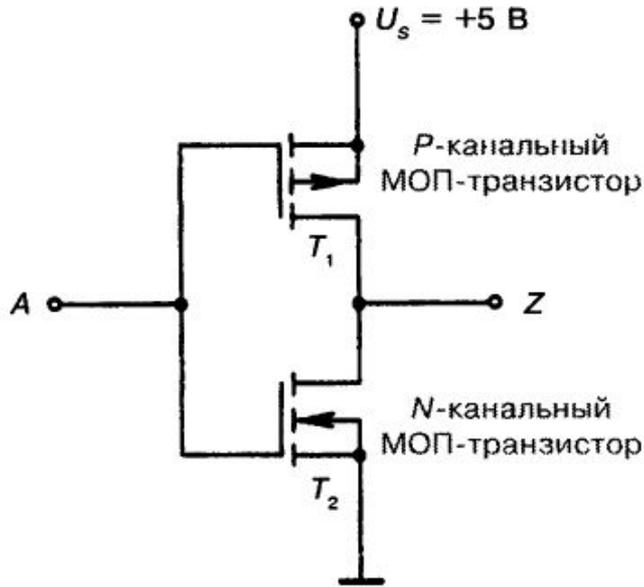
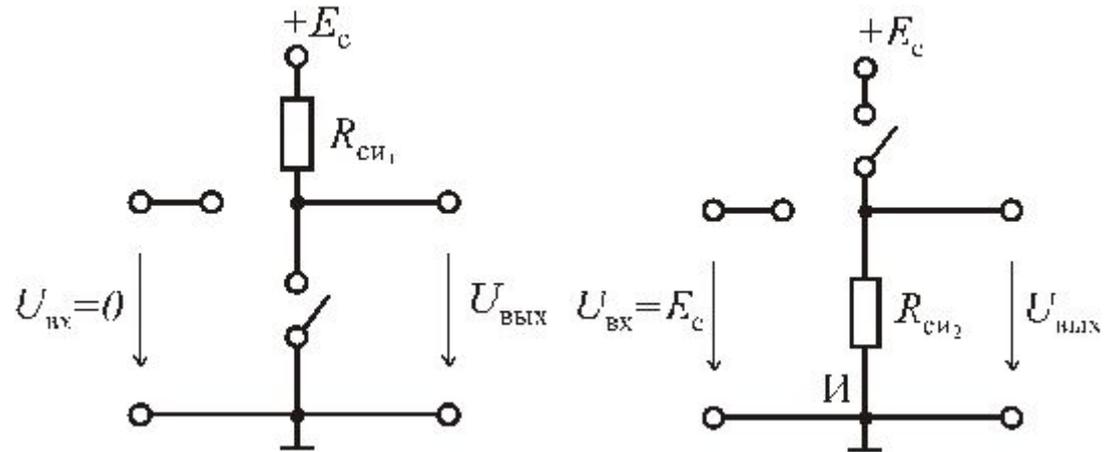


Схема КМОП НЕ-элемента



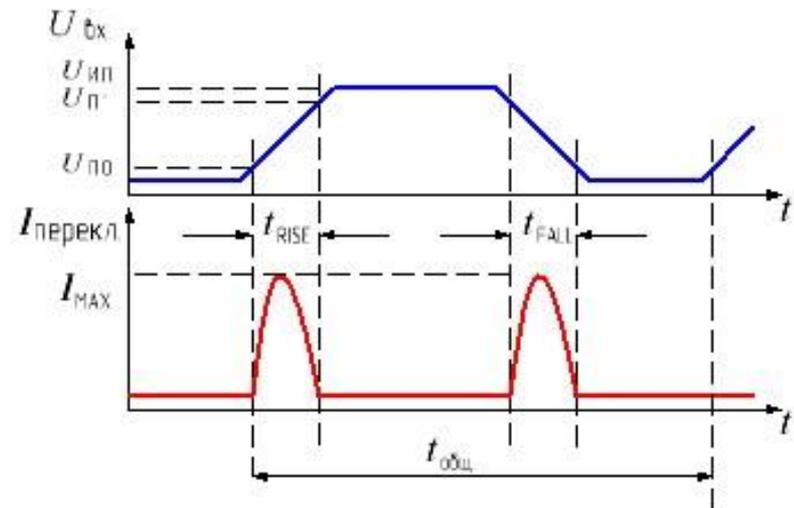
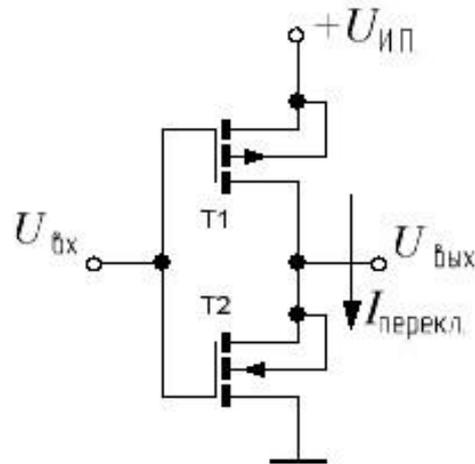
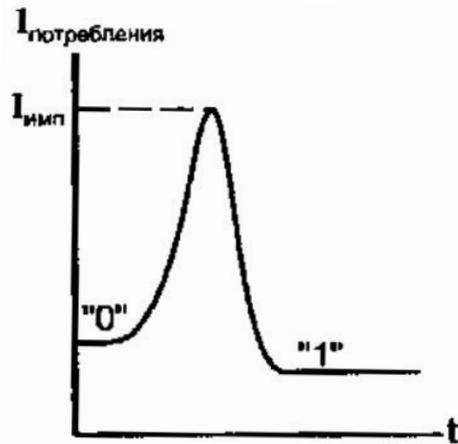
Принцип действия КМОП НЕ-элемента

Все КМОП-элементы устроены так, что в токовой ветви один транзистор всегда закрыт, а другой всегда открыт.

Энергопотребление КМОП-элементов крайне низко. Оно зависит в основном от количества переключений в секунду или частоты переключения.

Только во время переключения от источника питания потребляется небольшой ток, так как оба транзистора одновременно, но недолго открыты. Один из транзисторов переходит из открытого состояния в запертое и еще не полностью заперт, а другой — из запертого в открытое и еще не полностью открыт. Также должны перезарядиться транзисторные емкости.

## Мощность изменения энергопотребления ЛЭ КМОП



Изменение потребляемого тока в процессе переключения логического элемента КМОП

$$P = V_{CC} \cdot \frac{1}{2} \cdot I_{MAX} \cdot \frac{\text{время нарастания}}{\text{период}},$$

$$\frac{\text{время нарастания}}{\text{период}} = \frac{V_{CC} - 2V_T}{V_{CC}} \cdot \frac{t_{RISE} + t_{FALL}}{t_{общ.}}, \text{ где } \frac{1}{t_{общ.}} = f \text{ (Гц), тогда}$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot (V_{CC} - 2V_T) \cdot I_{MAX} \cdot (t_{RISE} + t_{FALL}) \cdot f.$$

# Базовые логические элементы КМОП

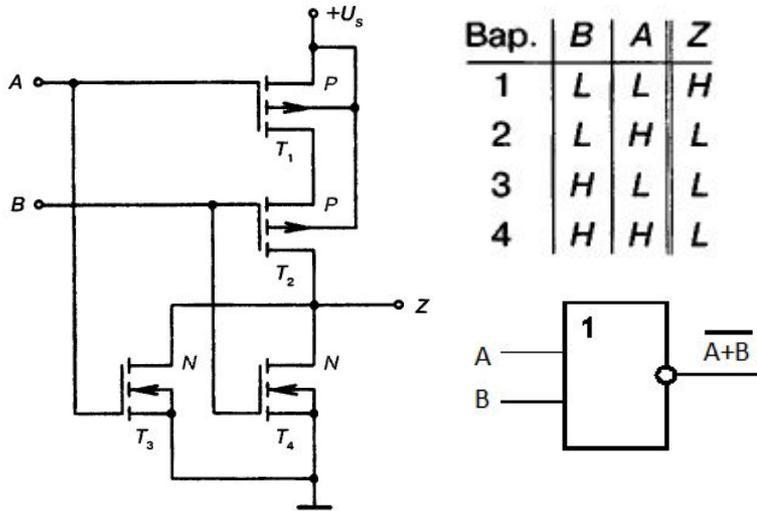


Схема КМОП ИЛИ-НЕ-элемента

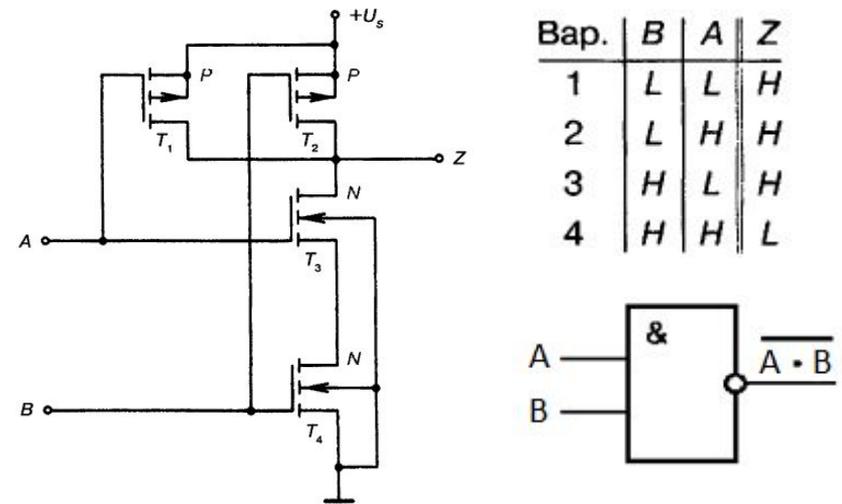
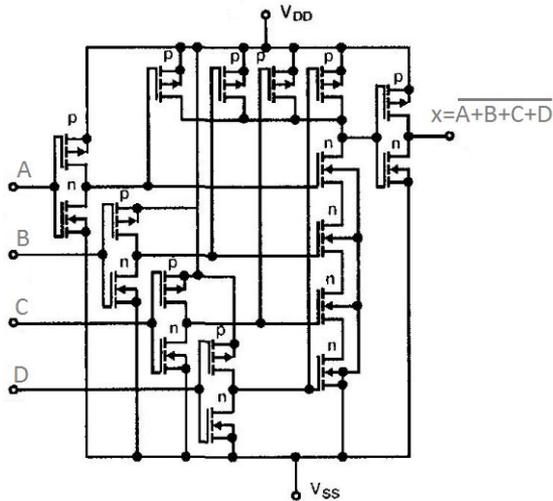
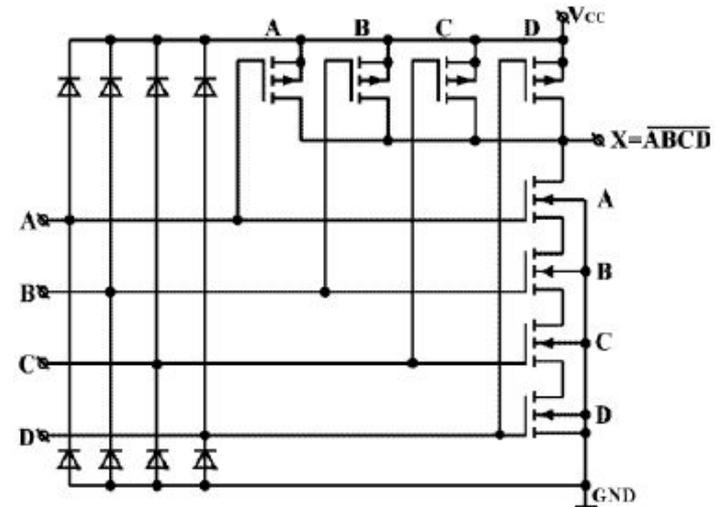


Схема КМОП И-НЕ-элемента



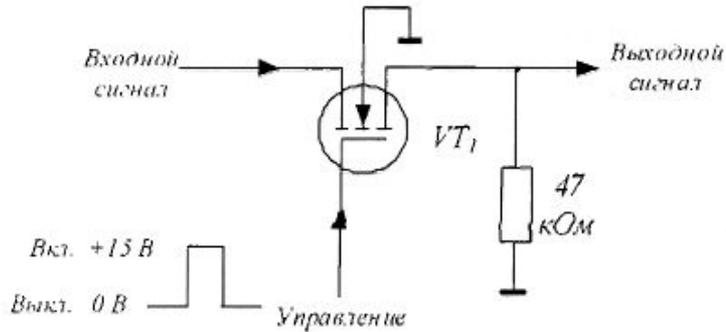
Логический элемент 4ИЛИ-НЕ,  
входящий в состав микросхемы  
КР1561ЛЕ6



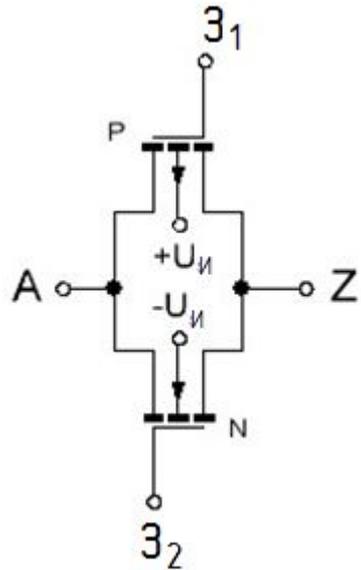
Логический элемент 4И-НЕ,  
входящий в состав микросхемы  
КР1561ЛА1

# Передаточный логический элемент КМОП

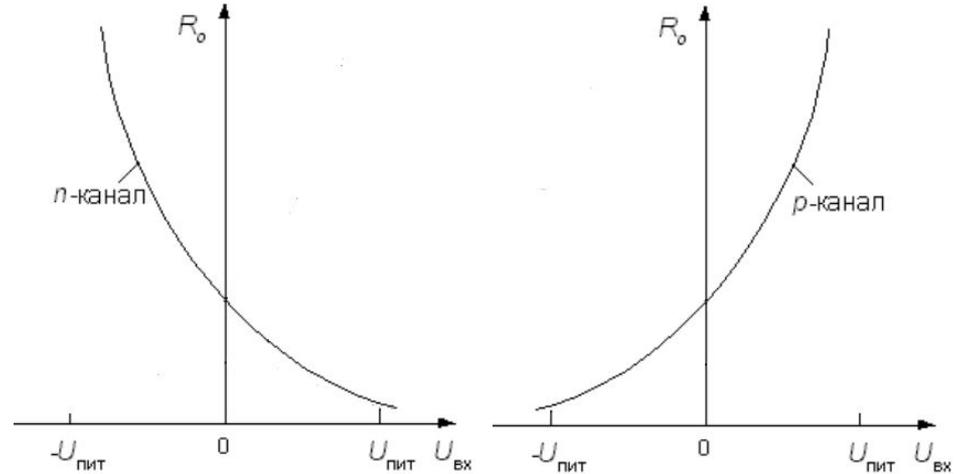
(электронный ключ, переключатель)



Ключ на n-канальном МОП-транзисторе с индуцированным каналом



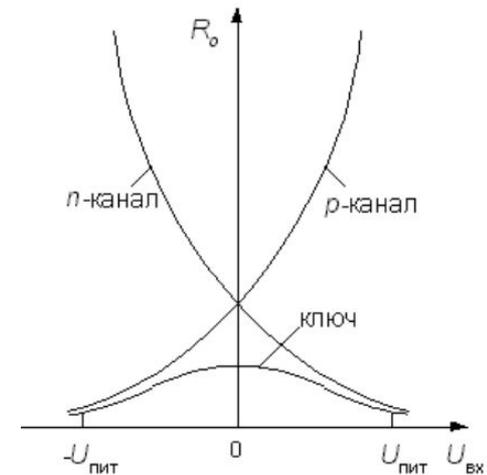
Принципиальная схема передаточного логического элемента



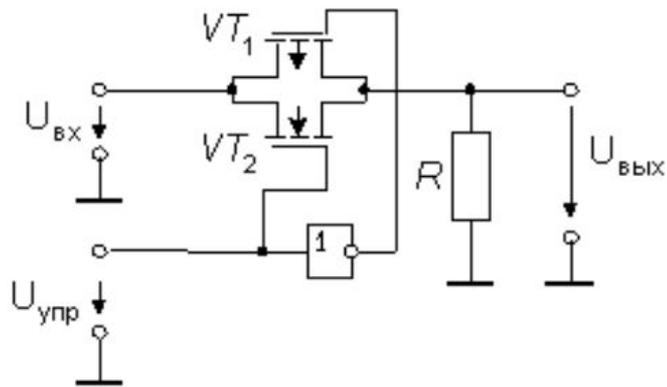
Зависимость сопротивления канала n-МОП и p-МОП ключа от  $U_{вх}$

Рабочая таблица передаточного логического элемента

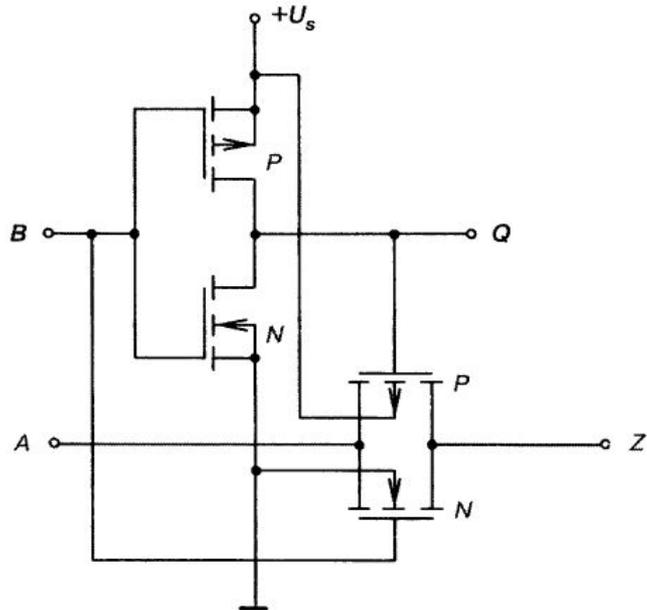
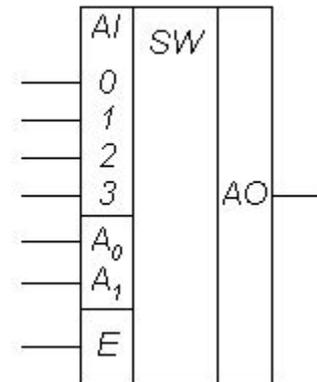
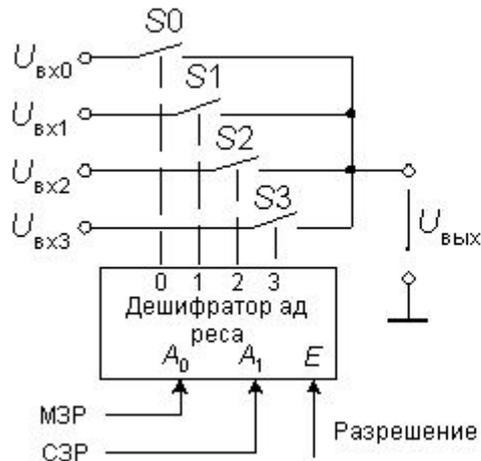
№	$Z_2$	$Z_1$	$L \approx 0 \text{ В}, H \approx +5 \text{ В}$
1	L	H	$R_{AZ}$ - высокоомный
2	H	L	$R_{AZ}$ - низкоомный



Передаточный элемент работает как переключатель.



Принципиальная схема



Передаточный логический элемент с управляющим элементом НЕ

Для того чтобы перевести **коммутатор** в состояние **включено**, нужно приложить к затвору нормально открытого МОП-транзистора  $VT_1$  положительное управляющее напряжение  $U_{упр}$ , равное, по меньшей мере  $2U_{омс'}$ , а к затвору транзистора  $VT_2$  – такое же напряжение, но противоположное по знаку.

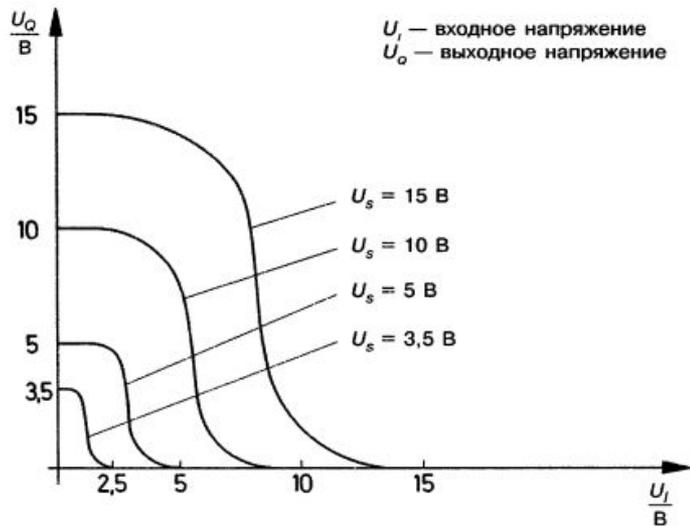
При малых величинах входного напряжения  $U_{вх}$  оба МОП-транзистора будут открыты.

При отрицательных значениях входного напряжения транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  меняются ролями.

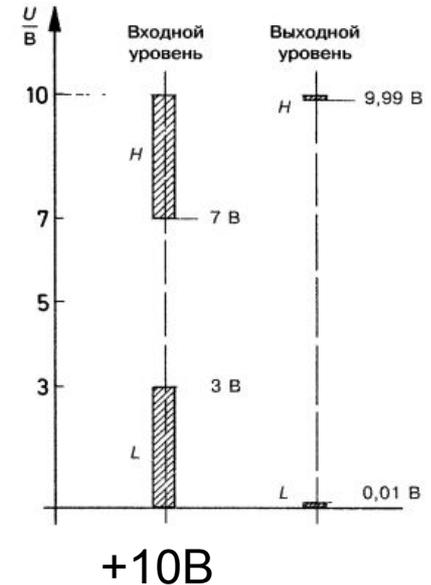
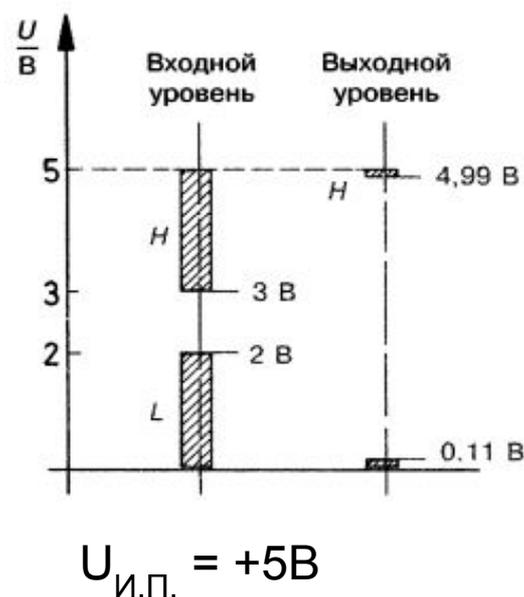
Для того чтобы перевести коммутатор в состояние **выключено**, необходимо изменить полярность управляющего напряжения.

# Важнейшие электрические параметры семейства КМОП

Напряжение питания	например +5 В до 15 Вольт)
Энергопотребление (на вентиль)	от 5 до 10 нВт (в зависимости от частоты переключения)
Быстродействие	8 нс
Максимальная частота переключения	50 МГц
Типичный зазор между уровнями	2 В (30÷40% от $U_{и.п.}$ )
Входное сопротивление	$10^{12}$ Ом
Выходное сопротивление	
При $H$ -уровне	500 Ом
При $L$ -уровне	200 Ом
Коэффициент разветвления	> 50
Входной ток	10 пА (максимально)



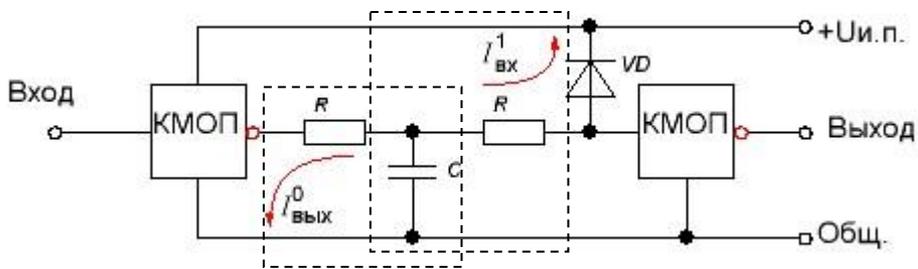
Передаточные характеристики КМОП



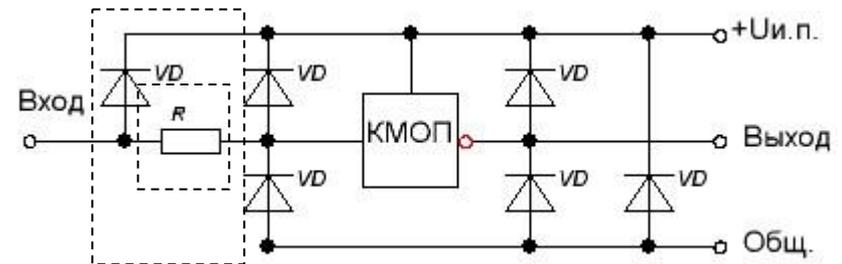
# Особенности микросхем КМОП структуры

Специфические особенности микросхем КМОП структуры: чувствительность к статическим зарядам, диодно-резистивная охранная цепочка и малая токовая отдача требуют **соблюдения правил предосторожности** в применении и обращении.

**Емкость на выходе и входе.** Если на выходе инвертора присутствует конденсатор, в моменты переключений через открытые транзисторы протекают токи заряда и разряда. При больших значениях ёмкости, открытый транзистор работает в режиме близком к короткому замыканию. В обычных условиях емкостная нагрузка не должна превышать 500 пФ. Если ёмкость больше, то надо использовать разрядный резистор  $R$  для ограничения тока, чтобы был не более  $1 \div 2$  мА.



Включение ограничивающих резисторов



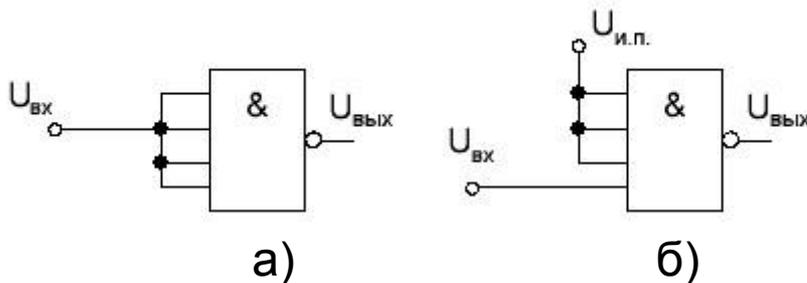
Диодно-резистивная охранная цепочка

## Защита входов от перегрузок.

Входное напряжение микросхем КМОП с охранной диодно-резистивной цепочкой на входе для предотвращения отпираания входных диодов в прямом направлении не должно выходить за пределы  $-0,7\text{В} \leq U_{\text{вх}} \leq U_{\text{и.п.}} + 0,7\text{В}$ . Иначе также надо использовать токоограничивающий резистор для ограничения тока уровнем  $1 \div 2$  мА.

**Неиспользуемые входы КМОП.** Их надлежит включать определённым образом, так, чтобы не нарушились условия работы микросхемы в целом.

Так же как и в ТТЛ свободные входы объединяют с  $+U_{\text{и.п.}}$  или общим проводом в зависимости от функции элемента либо объединяют их с другими, задействованными входами.



В случае варианта б) за счёт постоянного смещения отпирающие n-канальные транзисторы открываются раньше и общее пороговое напряжение становится меньше, чем в случае а). Поэтому вариант а) более эффективен применительно к помехам, возникающим **в общей шине**, а вариант б) в отношении защиты от помех, возникающих **в шине питания**.

**Входы КМОП микросхем** (в отличие от ТТЛ) **оставлять свободными недопустимо.**

Если какой-нибудь **вход** окажется **неподсоединённым**, на нём могут возникнуть **непредсказуемые напряжения** за счёт наводок и связей через паразитные ёмкости. Следствием этого **может быть** не только **неверное действие** микросхемы, но и её **повреждение**.

# Правила обращения с микросхемами КМОП

Микросхемы КМОП структуры **нуждаются** в сравнении с микросхемами других семейств, например, ТТЛ, ЭСЛ в более **бережном отношении**. Это касается как условий монтажа микросхем на платах, так и правил их хранения и эксплуатации в аппаратуре.

При обращении с микросхемами КМОП следует соблюдать следующие меры предосторожности:

- В процессе хранения и транспортировки отдельных микросхем выводы их должны быть соединены между собой;
- Нельзя производить смену микросхем при включённом напряжении питания;
- Допустимый электростатический потенциал на входах – не более 100В;
- Плату со смонтированными микросхемами следует брать за торцы, не касаясь разъёмов;
- При монтаже тело монтажника должно быть заземлено с помощью проводящего браслета, соединённого с контуром заземления через резистор 500 кОм или вначале коснуться общего провода питания;
- Необходимо избегать одежды из синтетических материалов;
- Микросхему следует устанавливать на плату после выполнения всех остальных соединений;
- Пайку выводов следует вести в последовательности: «общий». «питание», остальные контакты.