

Лекция 16

Краткое содержание

1. **Ключ на полевом транзисторе с резистивной нагрузкой:**
 - статический режим;
 - передаточная характеристика;
 - переходные процессы.
2. **Ключ на полевом транзисторе с нелинейной нагрузкой (n -МОП технология):**
 - статический режим;
 - передаточная характеристика.
3. **Ключ на полевом транзисторе с нелинейной нагрузкой (КМОП технология):**
 - статический режим;
 - передаточная характеристика;
 - переходные процессы.

1. Ключи на полевых транзисторах

Ключи на полевых транзисторах используются для коммутации как аналоговых, так и цифровых сигналов. Для коммутации аналоговых сигналов используются полевые транзисторы с управляющим $p-n$ – переходом или МОП транзисторы с индуцированным каналом. В цифровых схемах используют МОП с индуцированным каналом.

Достоинства электронных ключей на ПТ:

- ✓ малое напряжение на ключе в открытом состоянии;
- ✓ большое входное сопротивление в закрытом состоянии;
- ✓ малая потребляемая мощность от источника управляющего напряжения;
- ✓ возможность коммутации электрических сигналов очень малого уровня (порядка мкВ).

Технологически производится меньше операций при изготовлении; меньше площадь логической схемы на кристалле; меньше стоимость изделия.

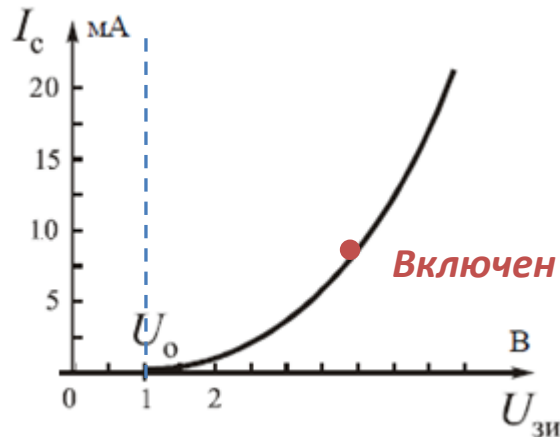
Ключи на полевых транзисторах

Недостатки электронных ключей на ПТ:

- ✓ Остаточное напряжение во включенном состоянии больше, чем у биполярных транзисторов, поскольку сопротивление канала $r_{си}$ больше аналогичного $r_{кэ}$ биполярного транзистора;
- ✓ по быстродействию уступают ключам на БТ; так как ток полевого транзистора определяется только движением основных для полупроводника носителей заряда, то при его переключении отсутствуют процессы, связанные с изменением объемного заряда неосновных носителей; переходные процессы в ключах на полевых транзисторах обусловлены в основном перезарядом межэлектродных емкостей, емкостей нагрузки и монтажа.
- ✓ наблюдается проникновение в коммутирующую цепь дополнительных импульсов, параметры которых зависят от управляющего сигнала, причиной их появления являются емкости транзистора $C_{зс}$ и $C_{зи}$.

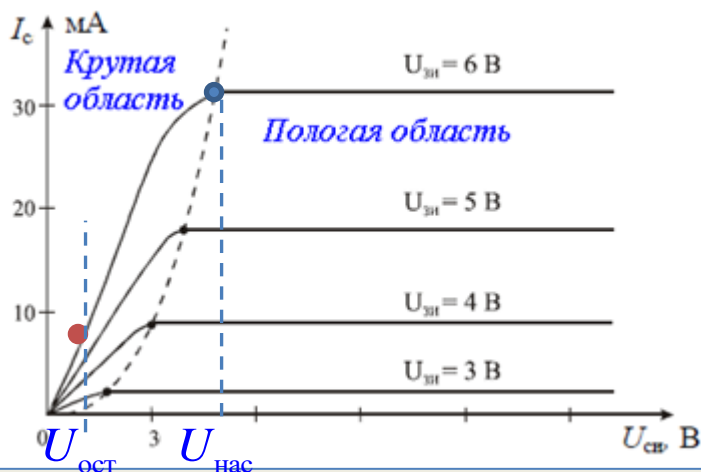
Характеристики МДП - транзистора

Выключен



Напряжение затвора, при котором появляется заметный ток стока, называют **пороговым** и обозначают U_o . Пороговое напряжение МДП - транзистора с индуцированным каналом n -типа положительно. Его величина зависит от технологии изготовления и составляет для современных интегральных МДП - транзисторов 0,5...1,0 В.

Стоко - затворная характеристика



На выходных характеристиках можно выделить крутую и пологую область и область отсечки.

В режиме отсечки $U_{зи} < U_o$, $I_c = 0$. Область отсечки расположена ниже ветви выходной характеристики, соответствующей напряжению $U_{зи} = U_o$.

Крутая область: $U_{си} \leq U_{зи} - U_o = U_{нас}$

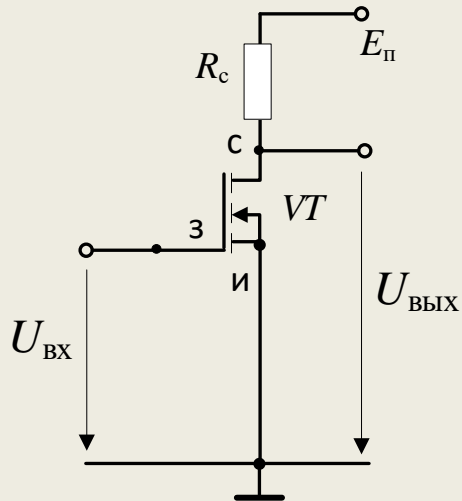
$$I_c = b \left[2(U_{зи} - U_o)U_{си} - U_{си}^2 \right]$$

Пологая область: $I_c = b(U_{зи} - U_o)^2$

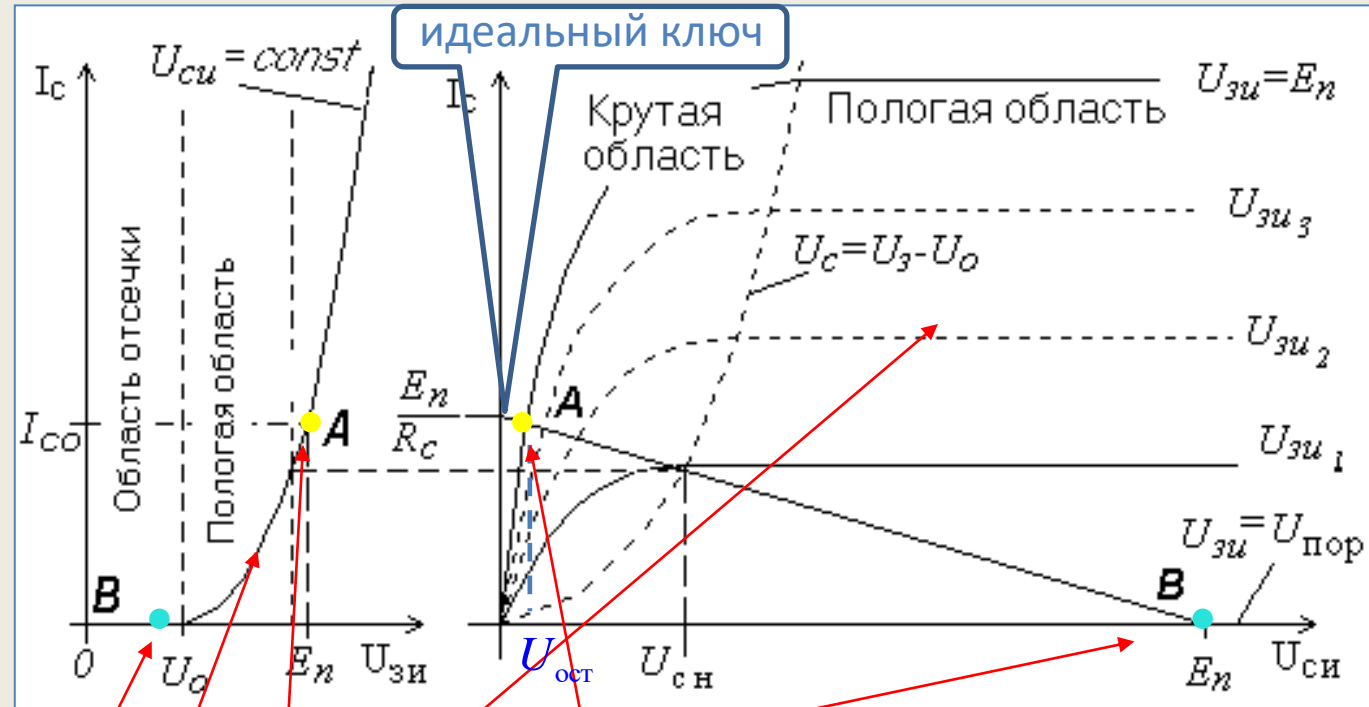
$$U_{си} \geq U_{нас}$$

Выходные характеристики

Инвертор на полевых транзисторах с резистивной (линейной) нагрузкой



**В статическом состоянии
в цепи управления (цепь
затвора) нет тока
($\sim 10^{-9} \dots 10^{-10}$ А)**



Область отсечки, соответствующая режиму закрытого транзистора

Активная область, соответствующая пологой области ВАХ

Крутая область ВАХ и максимальная проводимость канала. Режим открытого транзистора

Передаточная характеристика

При $U_{вх}=0$ транзистор закрыт (ключ выключен), сопротивление канала велико, $I_c \approx 0$ и $U_{си} \approx E_n$.

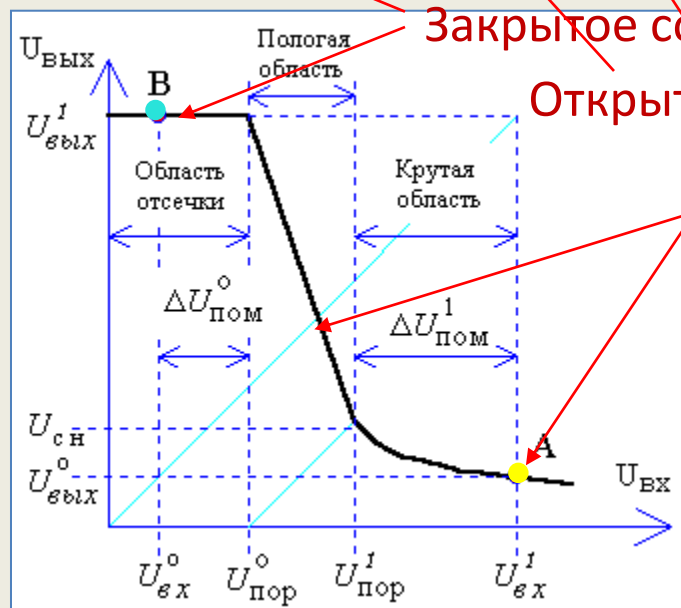
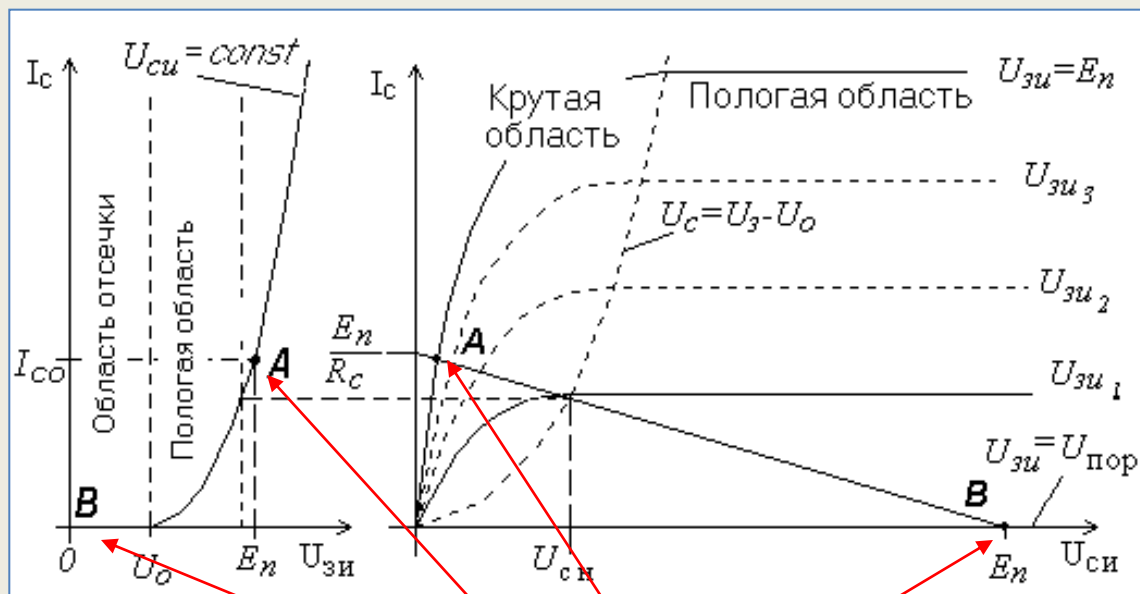
Включение ключа

осуществляется подачей напряжения отпирающей полярности на затвор величиной $U_{вх} > U_o$.

При этом сопротивление канала $r_{си}$ уменьшается, чем больше $U_{зи} = U_{вх}$, тем меньше $r_{си}$ и больше ток I_c .

Выключение ключа

осуществляется подачей напряжения $U_{вх} \leq U_o$ на затвор.

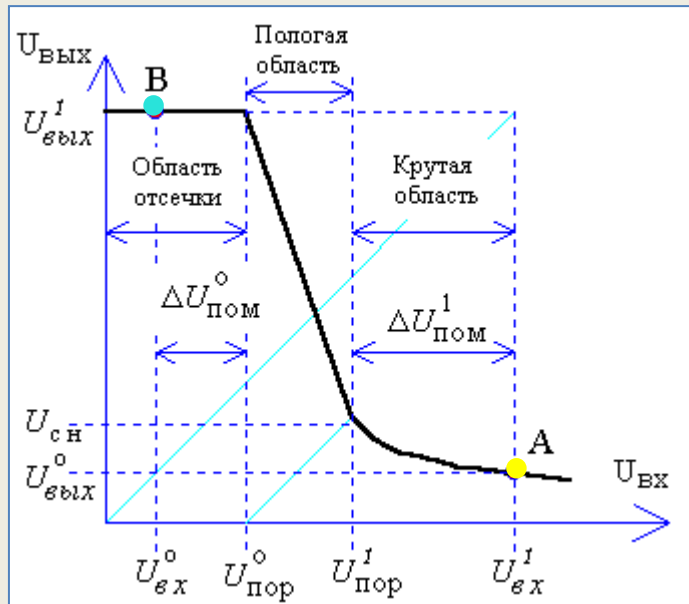
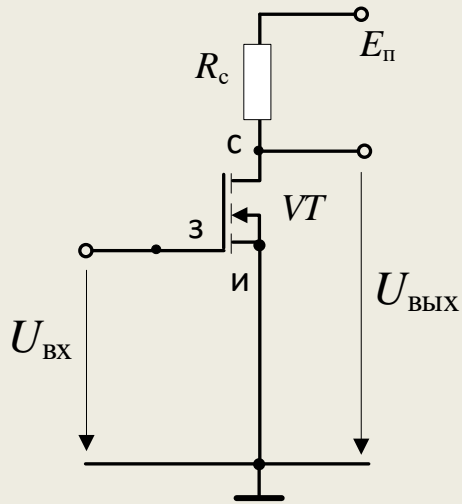


Закрытое состояние

Открытое состояние

$$K_u = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} = -SR_c$$

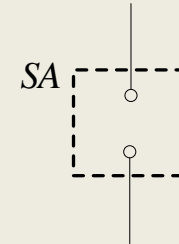
Передаточная характеристика



Ключ закрыт $I_c = 0$

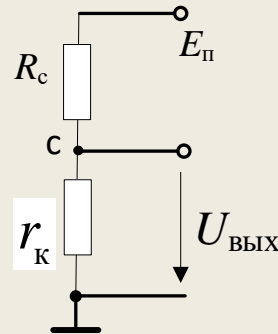
$$U_{ВХ} < U_{ПОР}^0 = U_o$$

$$U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ}^1 = E_{П}$$



Ключ открыт $I_c = b[2(U_{ЗИ} - U_o)U_{СИ} - U_{СИ}^2]$

$$U_{ВХ} > U_{ПОР}^1 \quad U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ}^0 = I_c r_c = I_c r_k$$

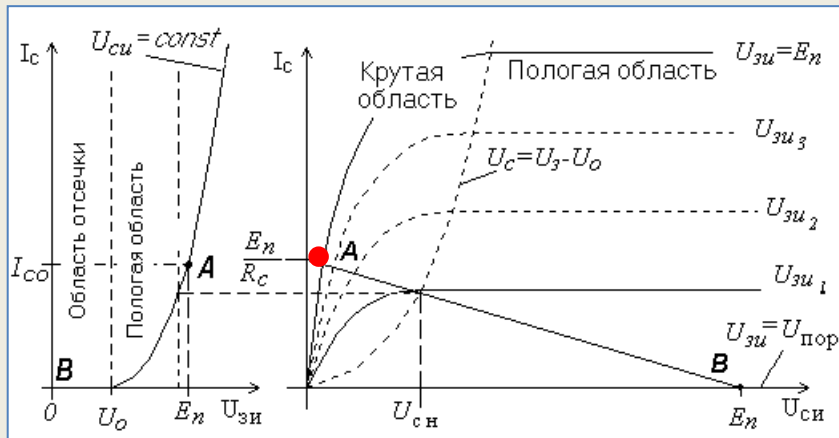


$$U_{ВЫХ}^0 = E_{П} \frac{r_k}{r_k + R_c}$$

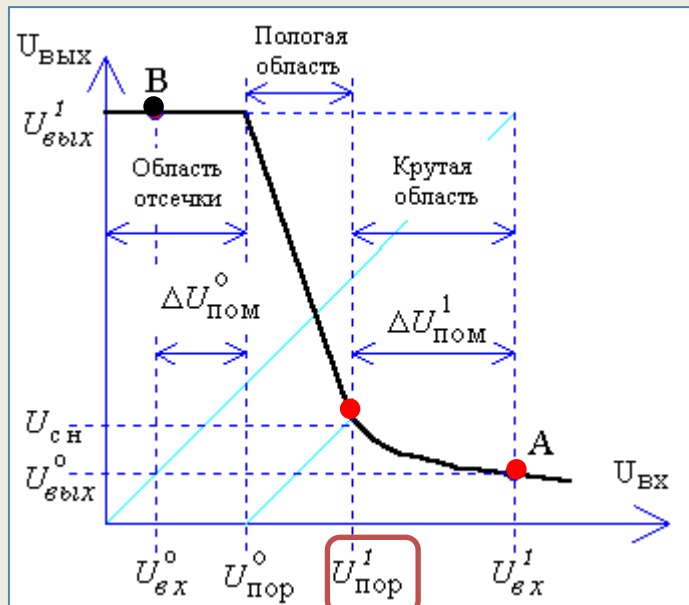
$$R_c \gg r_k \quad r_k \cong \frac{1}{2b(U_{ВХ} - U_o)}$$

Нестабильность питающего напряжения, нелинейность зависимости тока от напряжения приводят к нестабильности и нелинейности сопротивления канала в открытом состоянии и **нестабильности выходного (остаточного) напряжения**.

Характеристики ключа



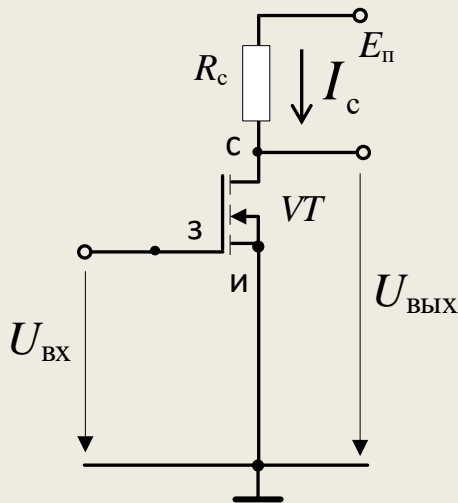
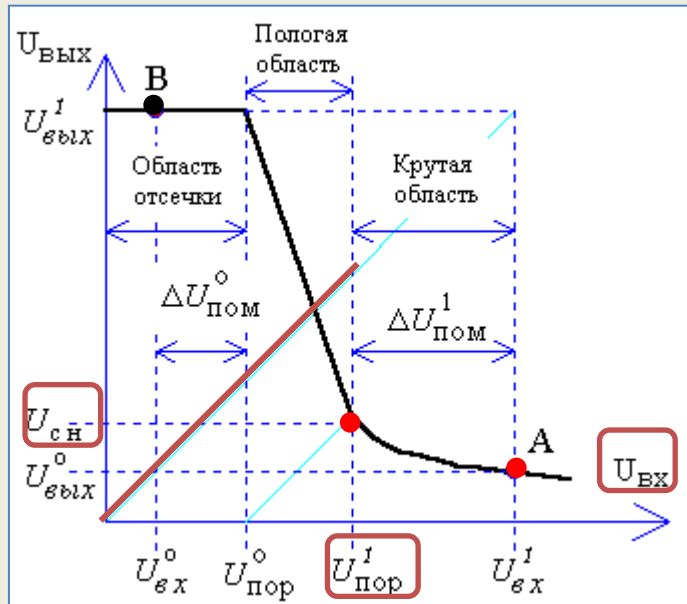
Остаточное напряжение на включенном полевом транзисторе сильно зависит от значения управляющего напряжения. Для биполярного транзистора, находящегося в режиме насыщения, такая зависимость полностью отсутствует и равна $U_{кэ\text{ нас}}$. Уменьшить остаточное напряжение можно, если увеличить сопротивление нагрузки, но в таком случае **увеличиваются размеры изделия (площадь) и потребляемая мощность**.



Насколько можно изменить входное (управляющее) напряжение, чтобы состояние ключа считалось открытым? При увеличении $U_{вх\text{ макс}} = U_{зи\text{ макс}}$, амплитуда входного напряжения не должна превышать предельного (максимального) $U_{зи\text{ макс}}$, указываемого в справочнике.

Уменьшение входного напряжения возможно до входа на пологий участок; при этом остаточное напряжение достигнет значения $U_{с\text{ нас}}$.

Расчет $U_{1пор}$



$$U_{с\text{ нас}} = U_{зи} - U_o \Rightarrow U_{вых} = U_{вх} - U_o$$

$$I_c = \frac{(E_{\Pi} - U_{с\text{ нас}})}{R_c} = \frac{(E_{\Pi} - U_{вых})}{R_c}$$

$$I_c = b(U_{зи} - U_o)^2 \quad \text{по характеристике}$$

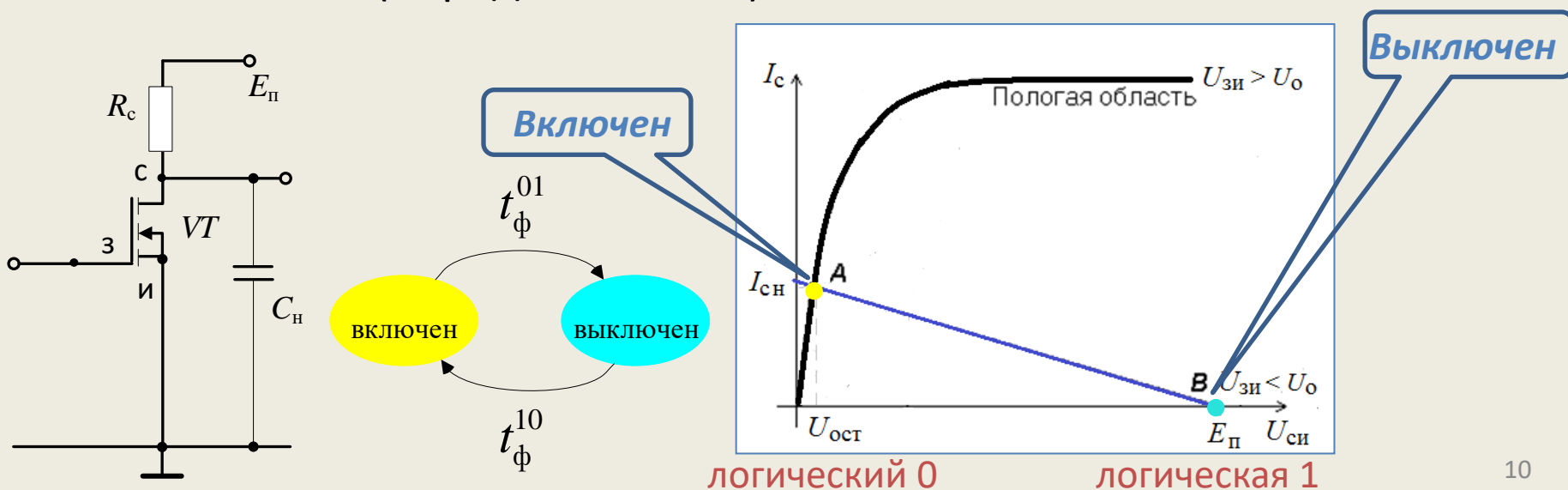
$$I_c = \frac{(E_{\Pi} - U_{вых})}{R_c} = \frac{(E_{\Pi} - (U_{вх} - U_o))}{R_c}$$

$$b(U_{пор}^1 - U_o)^2 = \frac{(E_{\Pi} - (U_{пор}^1 - U_o))}{R_c}$$

$$(E_{\Pi} - U_{пор}^1 + U_o) = R_c b (U_{пор}^1 - U_o)^2$$

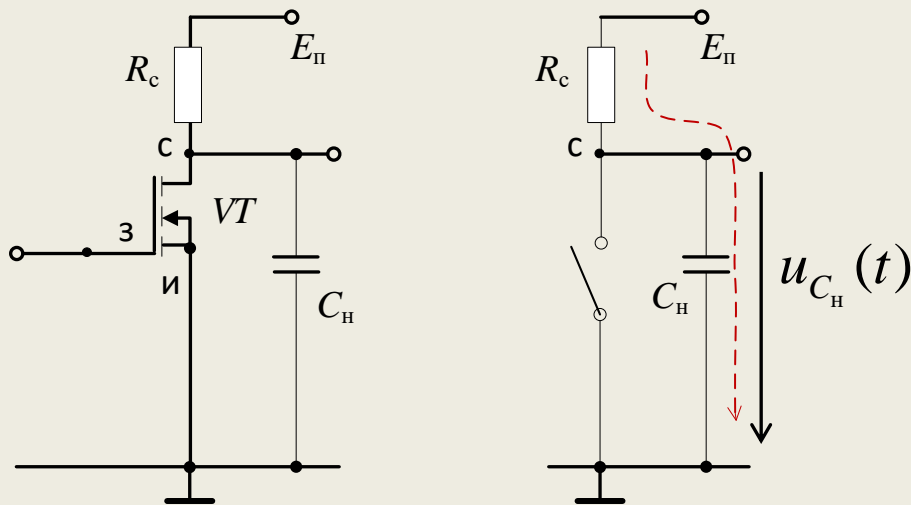
Переходные процессы

Инерционность МДП - транзисторных ключей обусловлена главным образом перезарядом емкостей, входящих в состав комплексной нагрузки и межэлектродных емкостей: емкость затвор-канал (определяет принцип действия МДП –транзистора – величину удельной крутизны); емкость сток-подложка (барьерная емкость стокового p - n перехода); емкости затвора относительно областей стока и истока; паразитная емкость монтажных соединений относительно подложки. Суммарная емкость C_n включает все эти компоненты (порядка 1... 3 пФ).



Переходной процесс при выключении (закрытии)

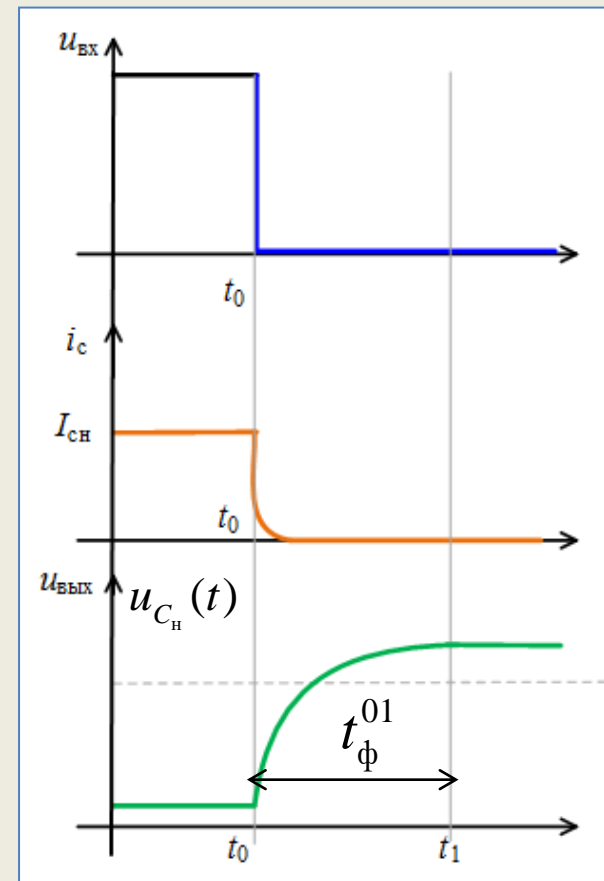
Пусть в исходном состоянии ключ открыт (на выходе низкий уровень напряжения, логический 0). При подаче в момент $t=t_0$ запирающего напряжения ток в транзисторе уменьшается до нуля практически мгновенно. **После закрытия ключа** переходной процесс определяется зарядкой емкости от источника питания через резистор R_c .



$$u_{C_H}(t) = E_{\Pi} (1 - e^{-\frac{t}{R_c C_H}})$$
$$t_{\phi}^{01} = 2,2 R_c C_H$$

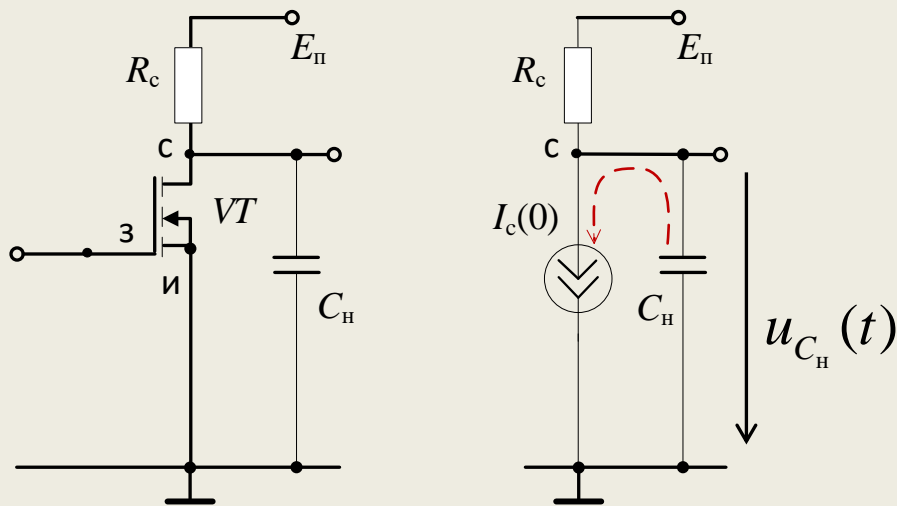
$$R_c = 50 \text{ кОм}; C_H = 3 \text{ пФ}$$

$$t_{\phi}^{01} = 330 \text{ нс}$$



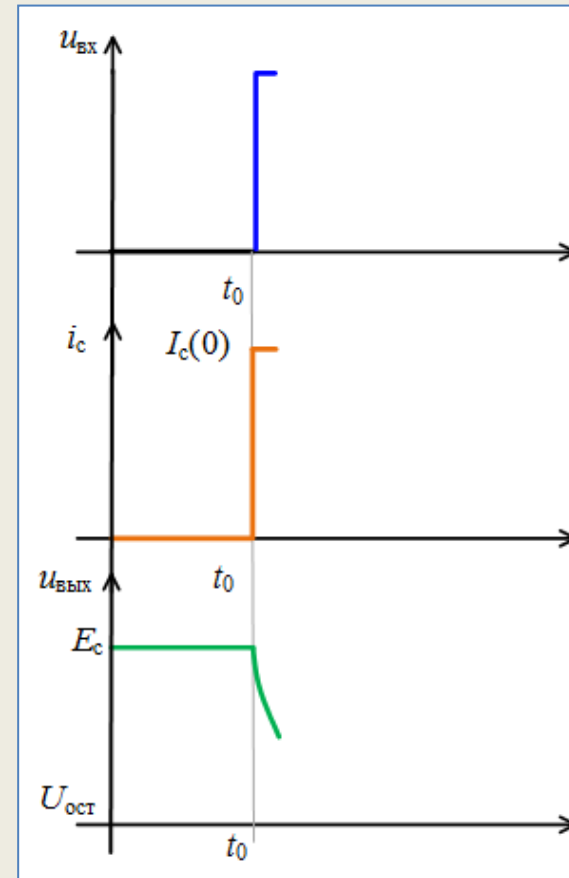
Переходной процесс при включении (открытии)

Открытие ключа и формирование фронта импульса напряжения на выходе протекают несколько сложнее, чем при закрывании. После подачи отпирающего входного напряжения практически мгновенно достигает значения $I_c = b(U_{зи} - U_o)^2$. Емкость C_H начинает разряжаться; пока выходное напряжение, равное напряжению на конденсаторе, $U_{си} \geq U_{нас}$ транзистор работает в пологой области, ток не меняет своего значения.



$$I_c(0) = b(U_{зи} - U_o)^2 = b(U_{вх} - U_o)^2$$

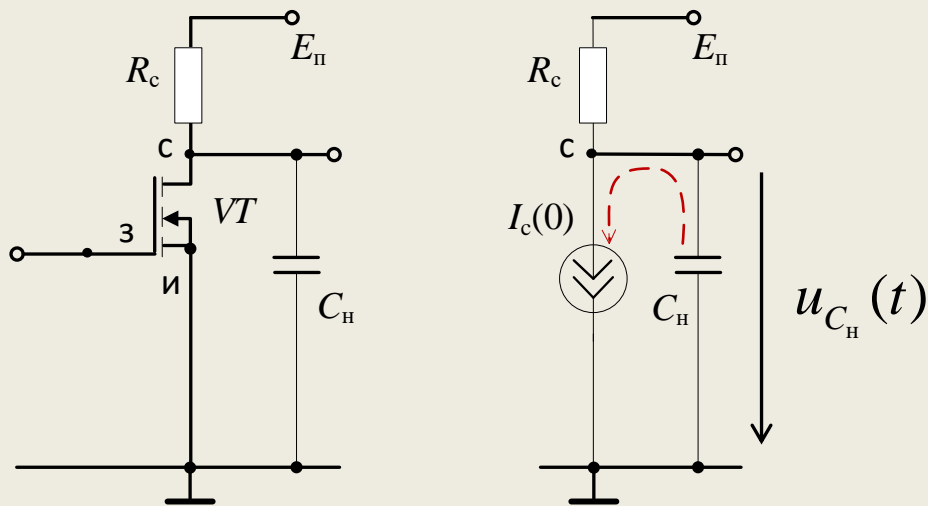
$$U_{си} = U_{вых} \geq U_{нас}$$



Переходной процесс при включении (открытии)

Как только $U_{\text{си}} \leq U_{\text{нас}}$ ток I_c начинает уменьшаться, в пределе $I_c(\infty) = I_{\text{сн}}$.

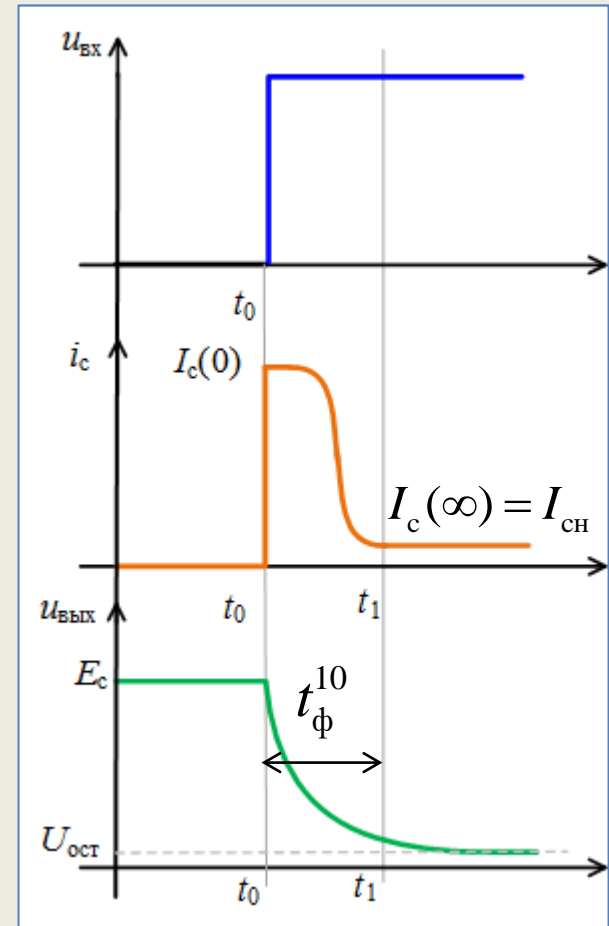
Зависимость $I_c(U_c)$ на этом этапе нелинейная, при расчете длительности фронта используют приближенную формулу. Напряжение на выходе определяется остаточным напряжением.



$$t_{\phi}^{10} \approx 1,5 E_{\Pi} C_{\text{H}} / I_c(0)$$

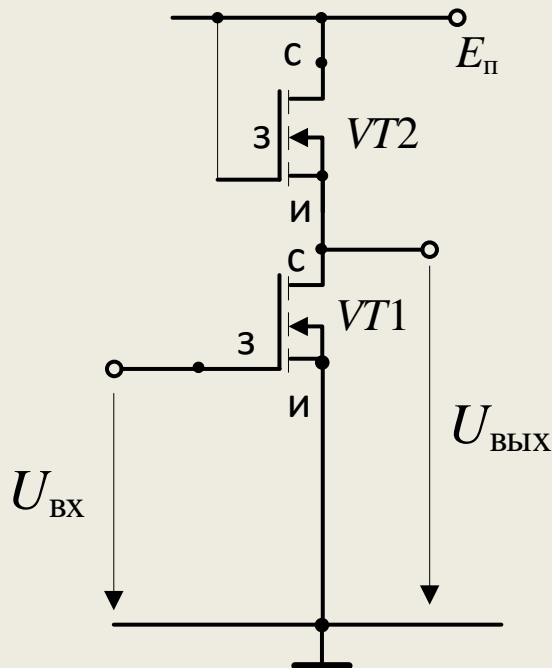
Так как $I_c(0) \gg I_{\text{сн}}$

$$t_{\phi}^{10} \ll t_{\phi}^{01}$$



Инвертор на полевых транзисторах с нелинейной нагрузкой (п-МОП технология)

Роль нелинейной нагрузки выполняет транзистор, у которого затвор соединен со стоком. В схеме с динамической нагрузкой транзистор VT2 называют **нагрузочным**, а транзистор VT1 – **активным**.

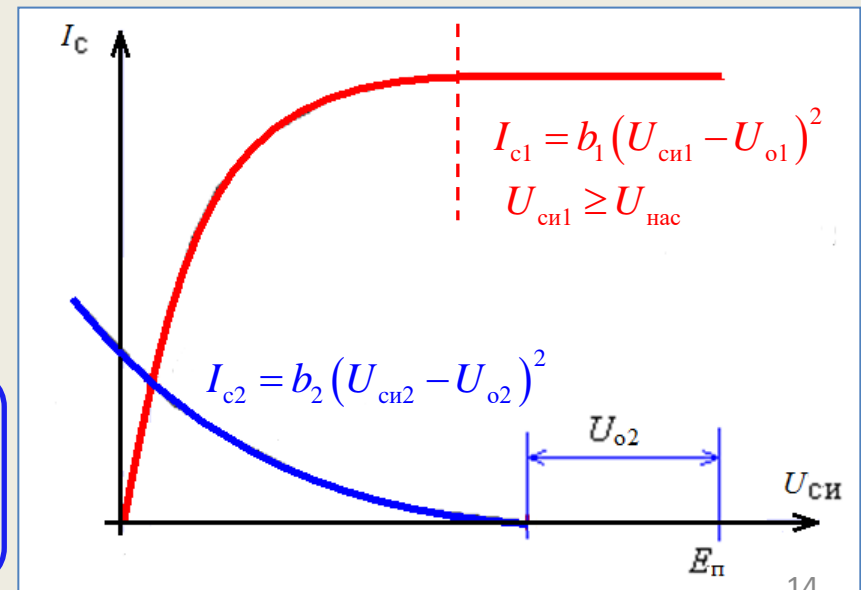


Затвор и сток VT2 соединены, поэтому $U_{зи2} = U_{си2}$, следовательно выполняется неравенство $U_{зи2} - U_o \leq U_{си2}$, транзистор VT2 работает на **пологом участке характеристики**: $I_{c2} = b_2 (U_{зи2} - U_{o2})^2 = b_2 (U_{си2} - U_{o2})^2$. Вых VT2 нелинейная (параболическая).

$$U_{си1} = U_{вых}$$

$$U_{зи2} = U_{си2} = E_{\Pi} - U_{вых}$$

$$I_{c2} = b_2 (E_{\Pi} - U_{вых} - U_{o2})^2$$



Инвертор на полевых транзисторах с нелинейной нагрузкой (п-МОП технология)

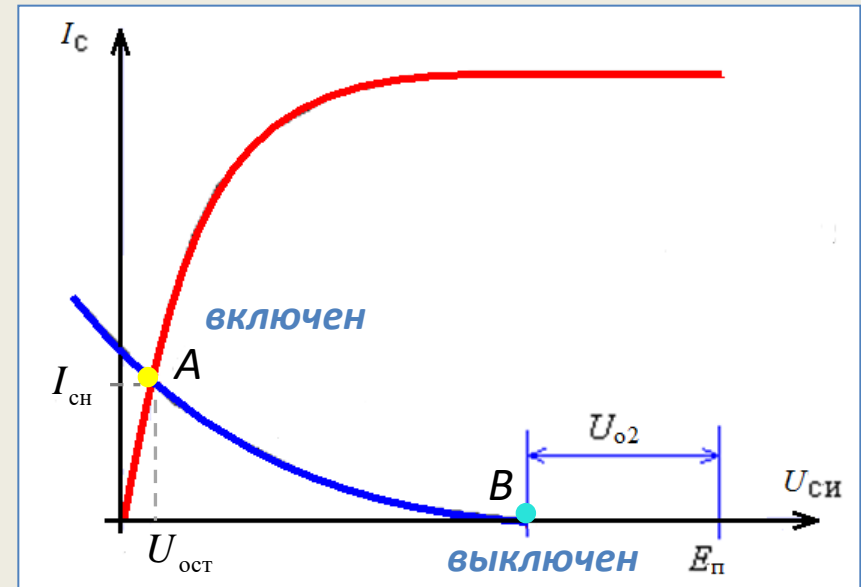
Если на вход подано напряжение

$U_{\text{ВХ}} < U_{\text{о1}}$, то выходное напряжение

$U_{\text{ВЫХ}} \approx E_{\text{П}} - U_{\text{о2}}$ (точка В), высокий уровень выходного напряжения, **логическая 1**.

Если на вход подано напряжение

$U_{\text{ВХ}} > U_{\text{о1}}$, то рабочая точка А определяется на пересечении двух характеристик; низкий уровень выходного напряжения, **логический 0**.



Точка лежит на крутом участке

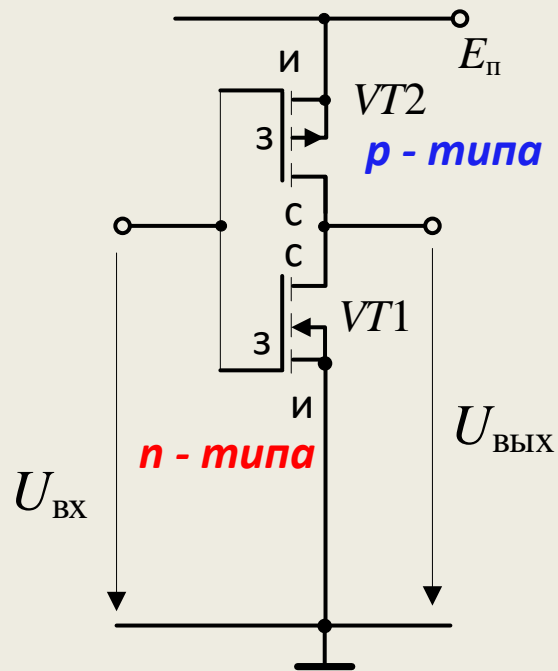
характеристики VT1: $I_{c1} = b_1 [2(U_{\text{зи1}} - U_{\text{о1}})U_{\text{си1}} - U_{\text{си1}}^2] = b_1 [2(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{о1}})U_{\text{ост}} - U_{\text{ост}}^2]$

$$I_{c2} = b_2 (E_{\text{П}} - U_{\text{ост}} - U_{\text{о2}})^2 \quad I_{c2} = I_{c1} = I_{\text{сн}}$$

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{ВЫХ}}^0 \approx \frac{b_2 (E_{\text{П}} - U_{\text{о2}})^2}{2b_1 (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{о1}})}$$

На практике всегда $U_{\text{ВХ}} \leq E_{\text{П}}$, поэтому $b_2 \ll b_1$, транзисторы должны быть существенно различными (если $b_1/b_2 = 50 \dots 100$, то $U_{\text{ВЫХ}}^0 \approx 50 \dots 100 \text{ мВ}$).

Инвертор на полевых транзисторах с нелинейной нагрузкой (КМОП технология)



Инвертор с минимальным потреблением мощности можно реализовать на комплементарной (дополняющей) паре полевых транзисторов. В такой схеме используются два МОП - транзистора с индуцированными каналами *n*- и *p*-типов. Подложки обоих транзисторов соединены с истоками.

КМОП - инвертор является практически идеальным логическим инвертором. Его быстродействие оказывается значительно выше, чем у других типов инверторов. Совершенствование технологии производства КМОП - интегральных схем привело к тому, что в настоящее время они стали доминирующими при производстве цифровых схем не только высокой, но и средней степени интеграции.

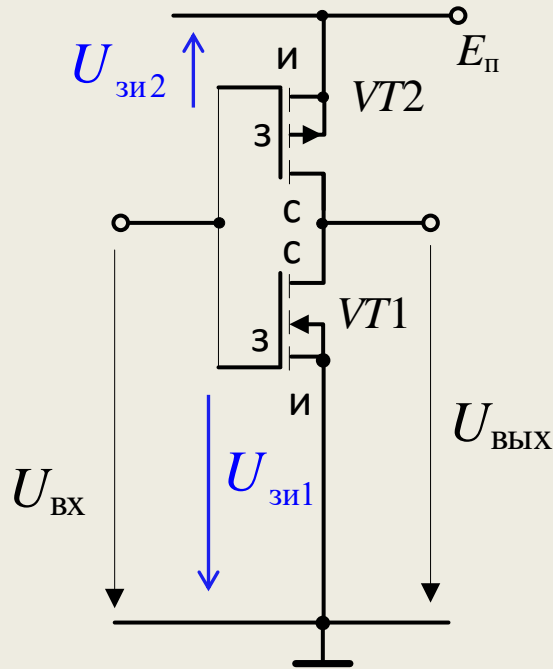
Статический режим КМОП - инвертора

В статическом состоянии на входе может быть нулевое напряжение; может быть высокий уровень напряжения $U_{\text{ВХ}} \approx E_{\text{П}}$. Рассмотрим состояние транзисторов и уровень выходного напряжения для этих вариантов.

Пусть на входе нулевое напряжение $U_{\text{ВХ}} = 0$.

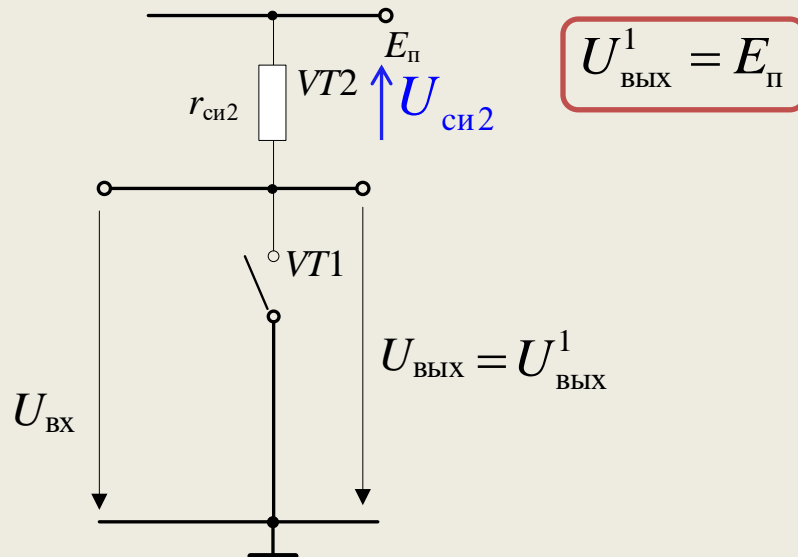
Тогда $U_{\text{зи1}} = 0$ $U_{\text{зи2}} = -E_{\text{П}}$; $E_{\text{П}} > |U_{\text{о2}}|$

В таком случае *n*-канальный транзистор *VT1* заперт, а *p*-канальный транзистор *VT2* открыт и работает на крутом участке характеристики. Эквивалентная схема замещения имеет вид:



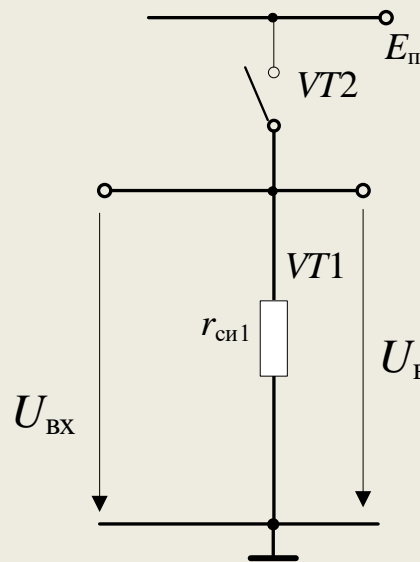
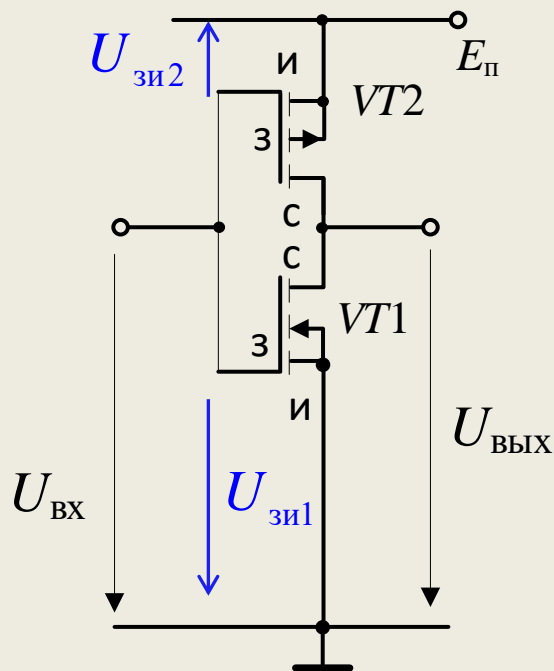
Для реальных транзисторов
 $I_{\text{от1}} \approx 10^{-9} \text{ А}$ $U_{\text{си2}} \approx 0,1 \dots 1 \text{ мВ}$

$$U_{\text{ВЫХ}}^1 \approx E_{\text{П}}$$



Статический режим КМОП - инвертора

Пусть на входе управляющее напряжение $U_{\text{ВХ}} \approx E_{\text{П}}$. Тогда n -канальный транзистор $VT1$ открыт и работает на крутом участке характеристики, а p -канальный транзистор $VT2$ закрыт. Эквивалентная схема замещения имеет вид:



$$U_{\text{ВХ}} = E_{\text{П}}; E_{\text{П}} > U_{\text{o2}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^0 = 0$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^0$$

Для реальных транзисторов

$$I_{\text{ост2}} \approx 10^{-9} \text{ А} \quad U_{\text{ВЫХ}}^0 \approx 0,1 \dots 1 \text{ мВ}$$

Важнейшей особенностью комплементарных ключей является то, что они практически не потребляют мощности в обоих вариантах и имеют малое остаточное напряжение в открытом состоянии транзистора $VT1$.

Статический режим КМОП - инвертора

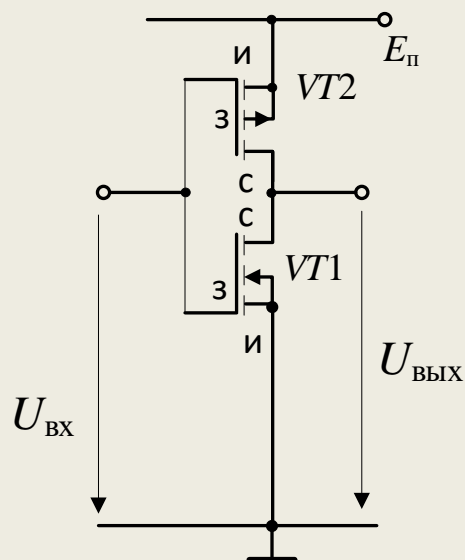
В обоих статических состояниях выход схемы подключен к общей шине или источнику питания через небольшие сопротивления каналов открытых транзисторов. Поэтому выходное напряжение равно нулю или напряжению питания и почти не зависит от параметров транзисторов.

Если напряжение питания превышает сумму пороговых напряжений обоих транзисторов, то в интервале $U_{o1} \leq U_{вх} \leq E_{п} - |U_{o2}|$ оба транзистора открыты и ток в цепи может иметь достаточно большое значение, поэтому для КМОП – инверторов характерны низкие напряжения источника питания.

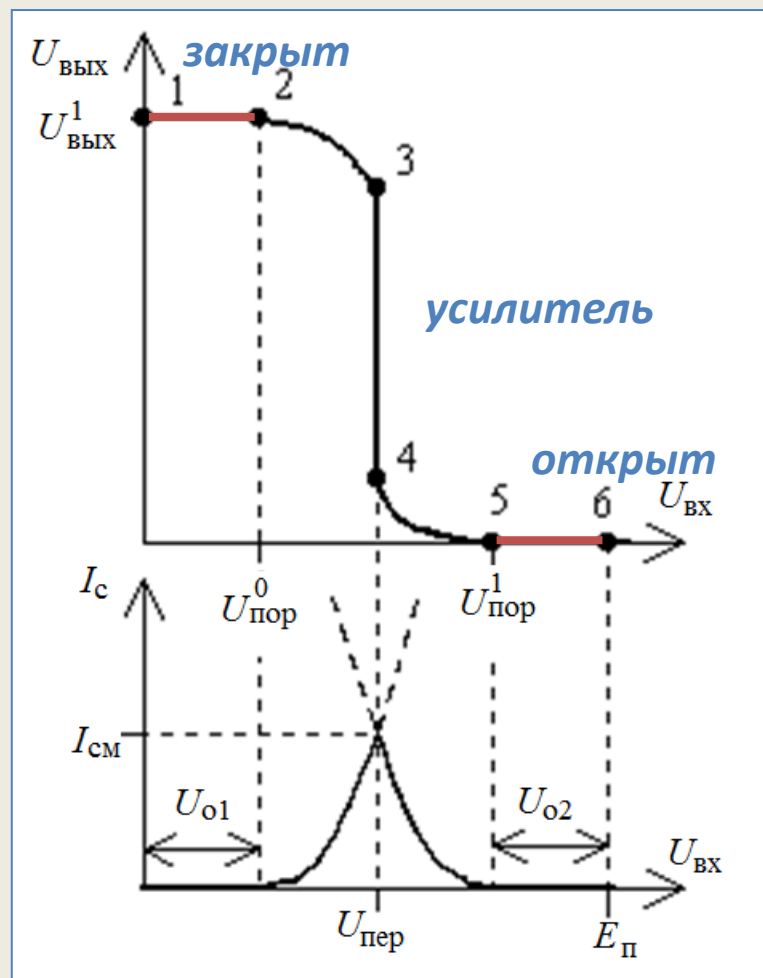
Разность выходных напряжений инвертора в закрытом и открытом состояниях максимальна (близка к величине $E_{п}$). Это обеспечивает высокую помехоустойчивость схемы.

КМОП - инверторы обладают значительно большей нагрузочной способностью, чем инверторы на биполярных транзисторах. Входное сопротивление МОП - транзистора бесконечно велико. Поэтому к его выходу можно подключить большое число аналогичных инверторов. При этом уровень выходного напряжения практически не изменится. Однако каждый дополнительный инвертор увеличивает емкость нагрузки, что приводит к замедлению переключения инвертора из одного логического состояния в другое.

Передаточная характеристика КМОП - инвертора

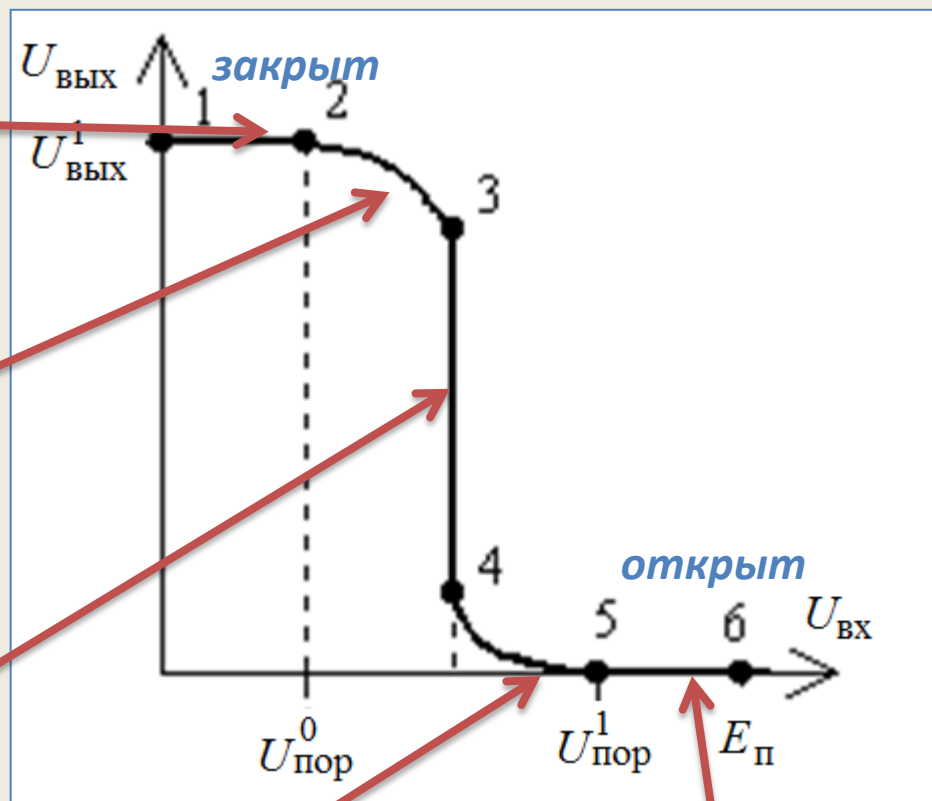
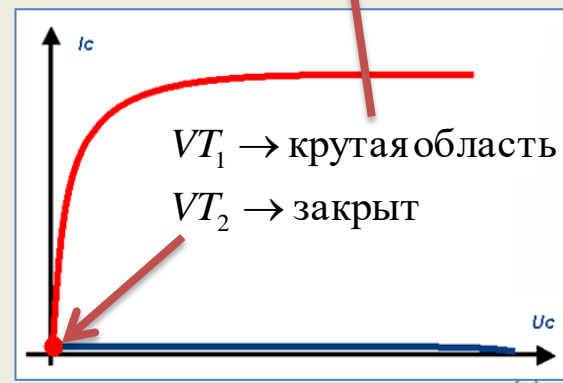
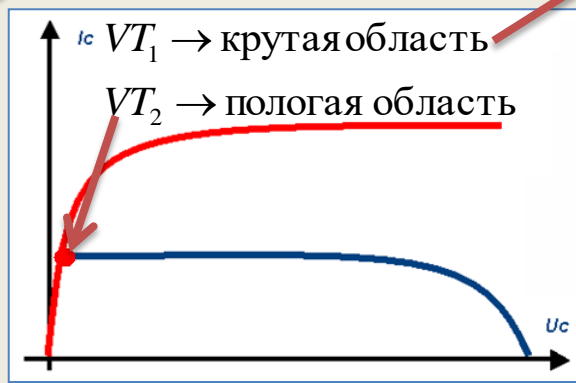
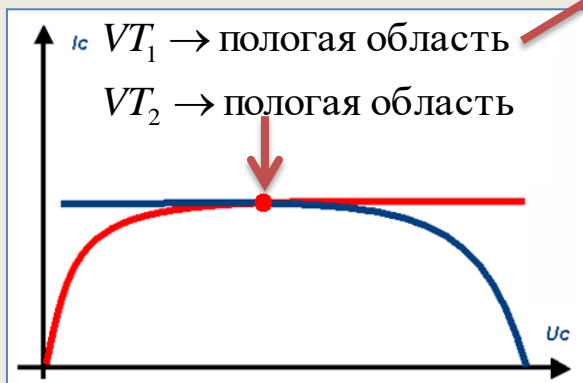
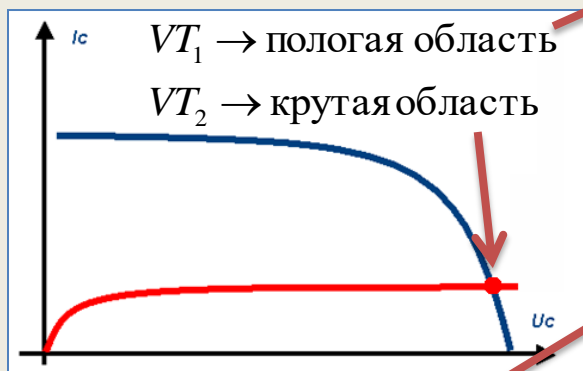
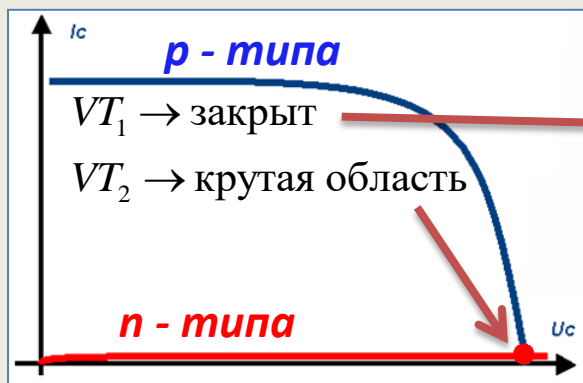


Участок	VT1	VT2
1-2	Закрыт	Крутая область
2-3	Пологая область	Крутая область
3-4	Пологая область	Пологая область
4-5	Крутая область	Пологая область
5-6	Крутая область	Закрыт



$$U_{\text{пер}} \approx \frac{E_{\text{п}}}{2} \quad \text{напряжение переключения (для одинаковых транзисторов)}$$

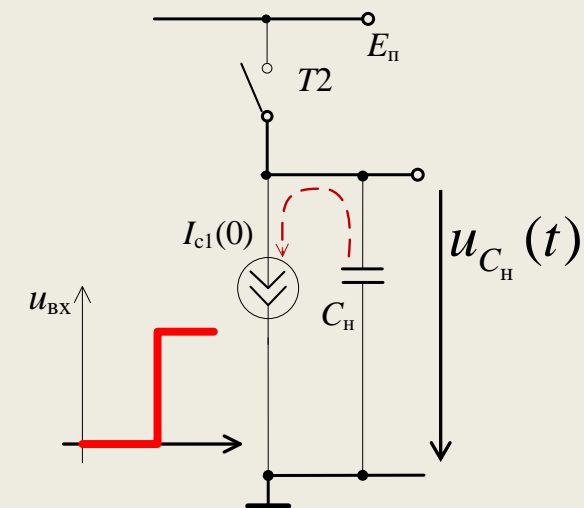
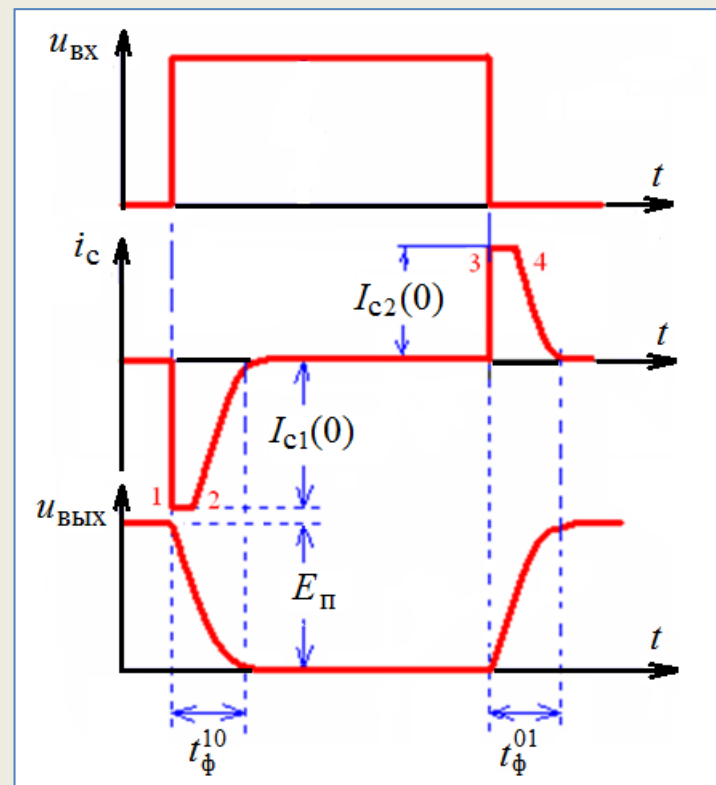
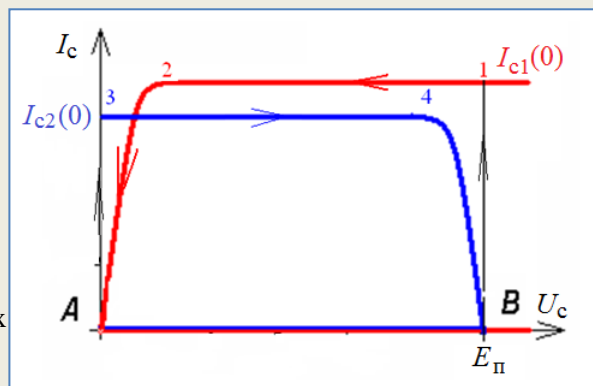
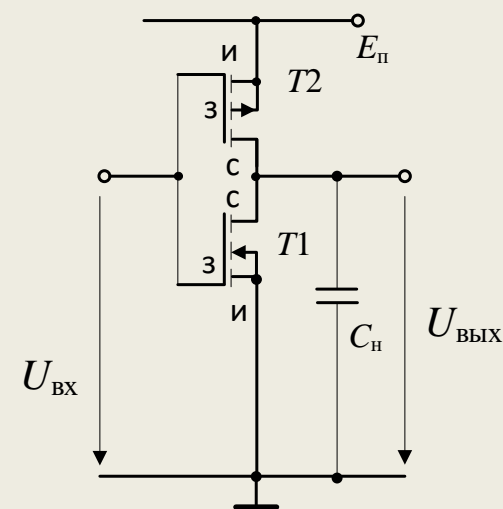
Передаточная характеристика КМОП - инвертора



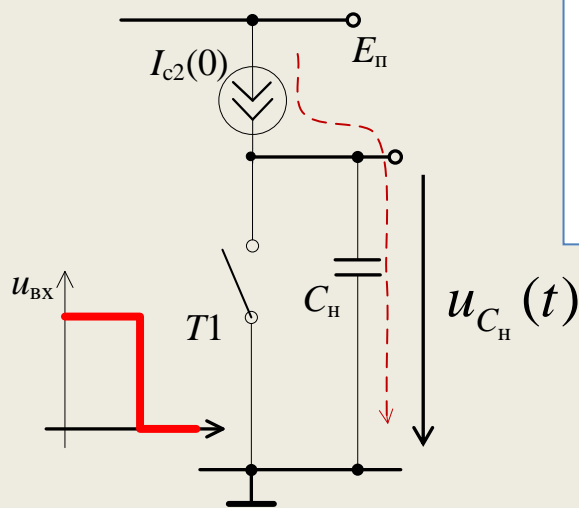
Переходной процесс в КМОП - инверторе

В комплементарном ключе переходные процессы характерны тем, что заряд и разряд нагрузочной емкости C_n происходит примерно в одинаковых условиях из-за симметрии схемы по отношению к запирающему и отпирающему управляющему сигналу. Заряд емкости происходит через открытый транзистор VT_2 при закрытом транзисторе VT_1 , а разряд – через открытый транзистор VT_1 при закрытом транзисторе VT_2 . В обоих случаях транзистор, открывшийся после переключения, находится в режиме насыщения со сравнительно большим током $I_{c(0)}$ и ток начинает уменьшаться после того, как напряжение на стоке уменьшается до значения $U_{нас}$. Механизм обоих процессов (заряда и разряда) подобен процессу разряда в ключе с резистивной нагрузкой.

Переходной процесс в КМОП - инверторе



разряд



зарядка

$$t_{\phi}^{10} \approx 1,5 E_{\Pi} C_{\text{H}} / I_{\text{c1}}(0)$$

$$t_{\phi}^{01} \approx 1,5 E_{\Pi} C_{\text{H}} / I_{\text{c2}}(0)$$