

Электронные ключи

Электронный ключ – устройство, коммутирующее различные электрические цепи бесконтактным способом.



Электронный ключ – аналог механического ключа.

В основе любого электронного ключа лежит применение активного элемента с ярко выраженными нелинейными свойствами – диод, тиристор, транзистор, лампа и др. Кроме того, в состав ключа входят пассивные компоненты, источники питающих и смещающих напряжений.

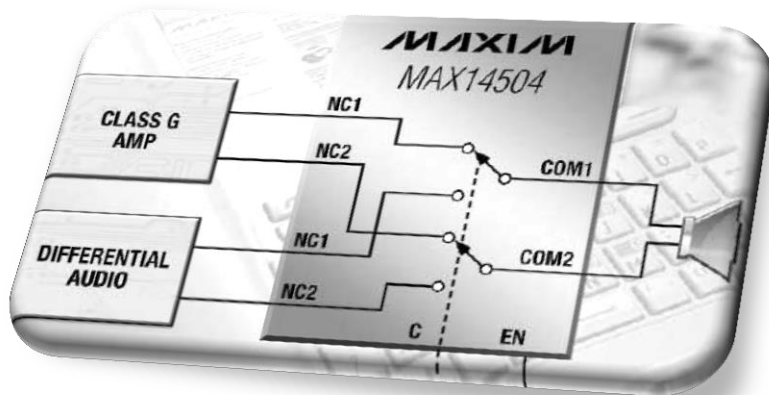


Примеры механического ключа

Классификация

В зависимости от назначения различают:

- **цифровые ключи** коммутируют напряжения или токи источника питания, т.о. формируют прямоугольные импульсы – сигналы двух уровней. Маломощные ключи.
- **аналоговые ключи** осуществляют подключение или отключение источников аналоговых информационных сигналов произвольной формы. Маломощные ключи.
- **силовые (мощные) ключи** осуществляют коммутацию токов в (сильноточных) цепях большой мощности и используются в устройствах энергетической электроники (выпрямители, инверторы, стабилизаторы, источники питания, формирователи импульсов и др.). Примеры силовых ключей: диоды, транзисторы, тиристоры, IGBT-транзисторы и др.



Сдвоенный аналоговый ключ
компании MAXIM



International Rectifier Транзисторные модули Trench IGBT шестого поколения

Толщина кристалла не более 70 мкм
Рабочая частота до 30 кГц
Низкий уровень электромагнитных помех
Максимальное напряжение «коллектор-эмиттер» 600 В

600V IGBT

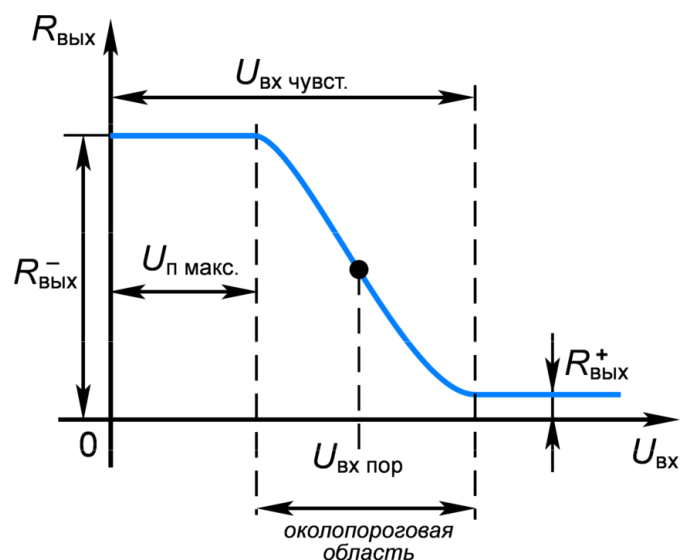
Общие сведения

Электронный ключ (как и любой механический ключ) характеризуется двумя состояниями:

- **включен (замкнут);**
- **выключен (разомкнут).**

Смена каждого состояния происходит под действием внешнего запускающего (управляющего) сигнала.

Электронный ключ можно представить в виде 4-х-полюсника, выходное сопротивление которого резко меняется при достижении внешним входным сигналом порогового значения.



Передающая характеристика
электронного ключа

Основной характеристикой электронного ключа является передаточная характеристика $R_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, представляющая собой область значений $U_{\text{ВХ}}$, в окрестностях которой наблюдается резкое изменение выходного сопротивления. Составляет на практике несколько десятых В.

Область обусловлена наличием паразитных емкостей, влиянием дестабилизирующих факторов, инерционностью носителей заряда.

Включенному ключу соответствует весьма малое выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}^+ \rightarrow 0$, а выключенному – весьма большое $R_{\text{ВЫХ}}^- \rightarrow \infty$.

В состав ключа также входят пассивные компоненты, источники питающих и смещающих напряжений

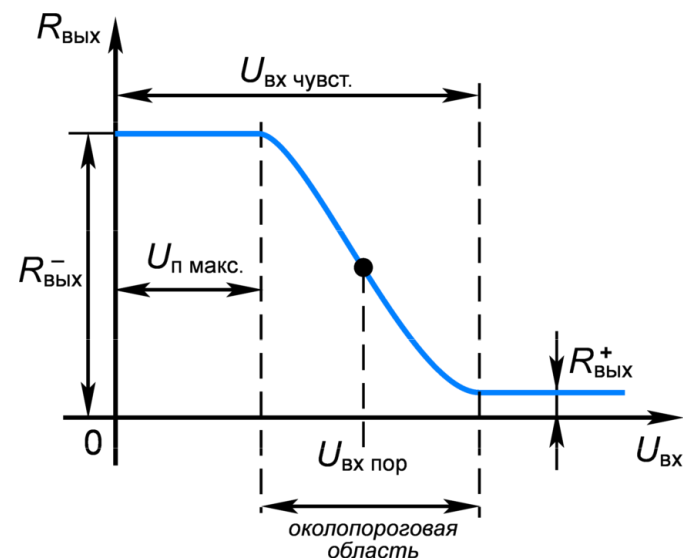
Параметры электронного ключа (важные на практике)

Качество ключа определяется его параметрами:

1. **Сопротивление ключа** во включенном выключенном состояниях;
2. **Остаточные параметры: остаточный ток** (ток утечки) в выключенном состоянии и **остаточное напряжение** на ключе во включенном состоянии;
3. **Пороговое напряжение** ($U_{\text{вх пор}}$), в окрестностях которого сопротивление ключа резко меняется (околопороговая область);
4. **Быстродействие** характеризуется временем переключения ключа из одного состояния в другое;

5. Чувствительность ключа ($U_{\text{вх чувст.}}$) – минимальное значение входного сигнала, при котором ключ бесперебойно переключается (с заданным значением надёжности);

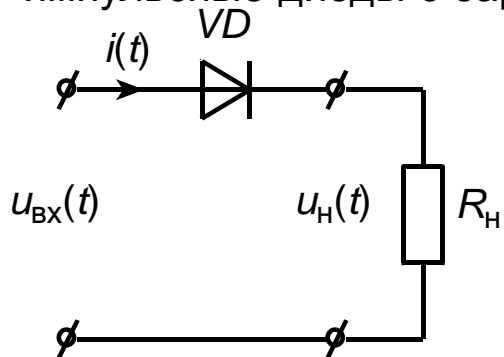
6. Помехоустойчивость ($U_{\text{п макс}}$) – максимальное значение напряжения помехи на входе, при котором ключ сохраняет выключенное состояние без переключения с заданной степенью надёжности.



Передаточная характеристика
электронного ключа

Диодные ключи

В диодных электронных ключах используются полупроводниковые диоды, что обусловлено их ярко выраженными вентиляльными свойствами. В качестве ключей применяются импульсные диоды с барьерной емкостью $C_{бар} \leq 2\text{пФ}$.



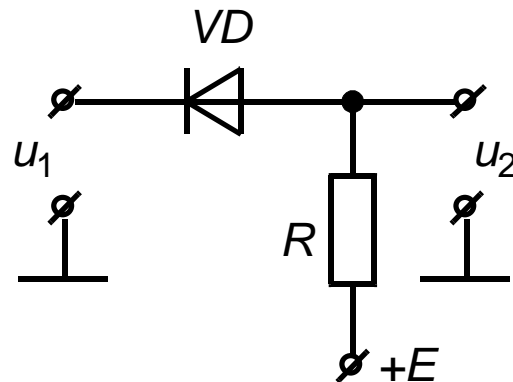
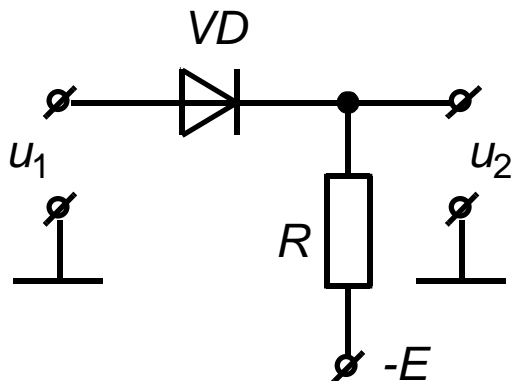
Простейший диодный ключ

При $U_{вх} > 0$ диод открыт (закоротка) нагрузка подключена ко входному источнику.

При $U_{вх} < 0$ диод заперт (разрыв) нагрузка отсоединена от входного источника.

Простейшими примерами диодных ключей являются схемы амплитудных ограничителей на диодах, изученные ранее в курсе «Электроника 1.2». Статические режимы работы таких ключей также были подробно рассмотрены в том же курсе.

Примеры диодных ключей с заданным порогом переключения (амплитудные ограничители)



Быстродействие диодных ключей

Быстродействие диодного ключа определяется быстродействием используемых диодов. Быстродействие диода определяется **инерционностью** $p-n$ -перехода диода.

Под инерционностью понимают запаздывание реакции $p-n$ -перехода на электрическое воздействие.

Пример 1. Воздействие - изменение во времени приложенного напряжения, тогда реакция – изменение тока через $p-n$ -переход.

Пример 2. Воздействие – изменение во времени заданного тока через $p-n$ -переход, тогда реакция – изменение напряжения на переходе.

Инерционность $p-n$ -перехода проявляется в виде кратковременной потери односторонней проводимости при быстрых изменениях во времени (или высокой частоте) входного воздействия.

Физические причины инерционности:

1. Конечное время движения основных носителей через переход;
2. Конечное время перезаряда **паразитных емкостей** $p-n$ -перехода, обусловленных физическими процессами в переходе.

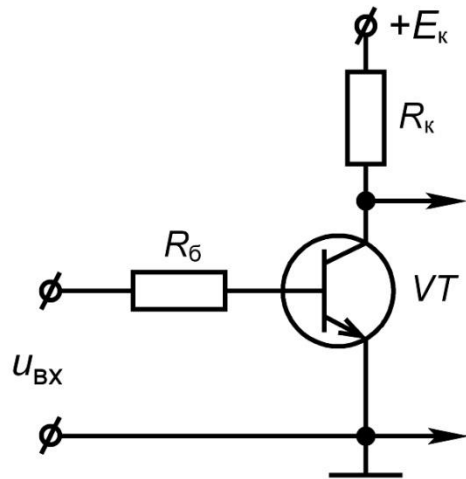
Паразитными эти емкости называют потому, что они возникают помимо воли разработчиков-технологов.

Вспомним, что паразитными считаются барьерная $C_{\text{бар}}$ и диффузионная $C_{\text{диф}}$ емкости $p-n$ -перехода.

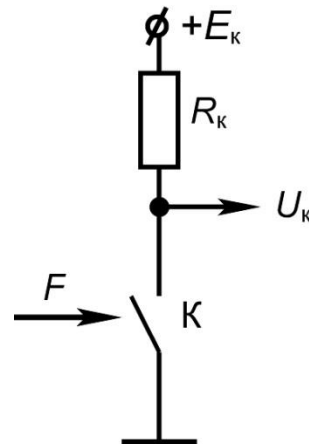
Первой причиной чаще всего пренебрегают из-за малых геометрических размеров перехода, поэтому определяющей быстродействие становится вторая. 6

Электронные ключи

Ключевой режим работы биполярных транзисторов



электронный ключ на биполярном транзисторе



механический ключ – аналог электронного ключа

Назначение элементов:

- $E_{\text{к}}$ – источник питания;
- $R_{\text{к}}$ – нагрузка;
- $VT, К$ – ключевой элемент;
- $U_{\text{вх}}$ – входной управляющий сигнал;
- F – внешняя сила;
- $U_{\text{вх}}, R_{\text{б}}$ – задают базовый ток (аналог F).

Транзистор работает в режиме большого сигнала и имеет два статических состояния:

включен – режим насыщения;

выключен – режим отсечки.

В активном режиме он находится при смене состояний.

насыщенный ключ – транзистор работает с заходом в область насыщения. Уровни выходного напряжения $U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$ в статических состояниях стабильны.

ненасыщенный ключ – транзистор работает во включенном состоянии в активной области вблизи границы насыщения. В ненасыщенных ключах принимаются специальные меры для стабилизации напряжения $U_{\text{кэ}}$ открытого транзистора.

В **режиме глубокой отсечки** токи электродов транзистора имеют наименьшие значения, что соответствует разомкнутому состоянию ключа.

В **режиме неглубокой отсечки** токи электродов несколько больше, чем в режиме глубокой отсечки, и их значения существенно зависят от приложенного напряжения.

В **режиме насыщения** токи электродов максимальны, транзистор открыт, что соответствует замкнутому состоянию ключа.

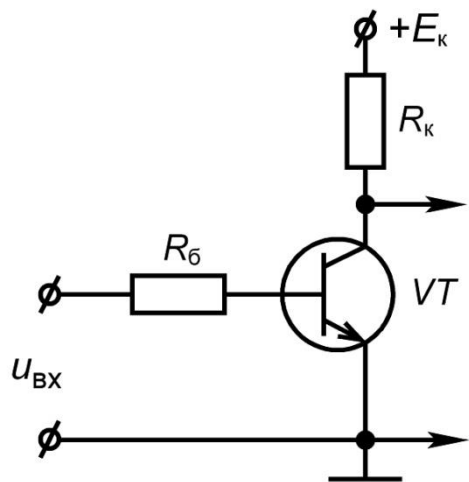
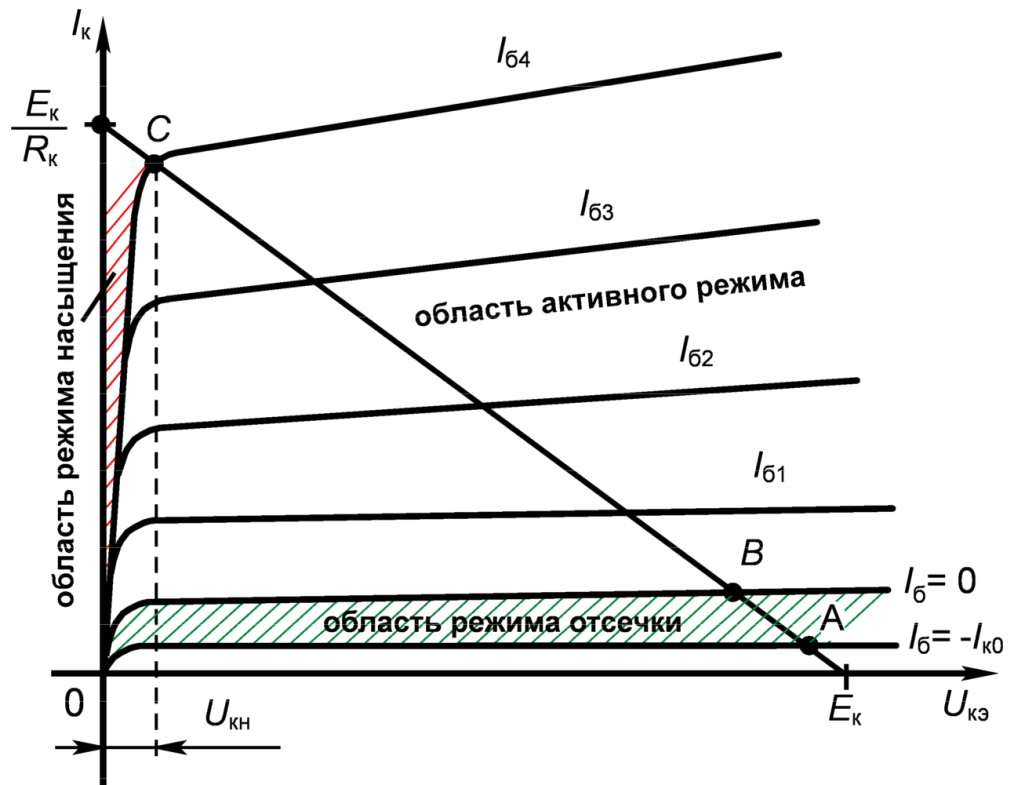


Схема ключа на биполярном транзисторе



- т. А – режим глубокой отсечки (активное запираение) – рекомендуемый режим запираения;
- т. В – режим неглубокой отсечки (пассивное запираение);
- т. С – режим насыщения;
- т. В – т. С – активный режим.

Статические режимы работы ключей на биполярных транзисторах

Статические режимы ключа: режим отсечки, режим насыщения. В активном режиме транзисторы находятся очень короткое время при переключении из одного состояния в другое.

Условия насыщения и запираания биполярного транзистора

Для включения транзистора (ключа) на эмиттерный переход подается напряжение отпирающей полярности. Ток базы должен удовлетворять условию насыщения (токовый критерий):

$$I_{\bar{б}} \geq I_{\bar{бн}}$$

Для выключения транзистора (ключа) на эмиттерный переход подается напряжение запирающей полярности:

$$U_{\bar{бэ}} \geq 0 \quad - \text{ для } p-n-p$$

$$U_{\bar{бэ}} \leq 0 \quad - \text{ для } n-p-n$$

$I_{\bar{бн}} = I_{\text{кн}} / \beta$ – значение тока, при котором транзистор полностью открыт, т.е. через транзистор протекает максимальный ток коллектора $I_{\text{кн}}$

При рассмотрении статики ключей используют схемы замещения транзистора, изученные ранее в курсе «Электроника 1.2».

Статические режимы работы ключей на биполярных транзисторах

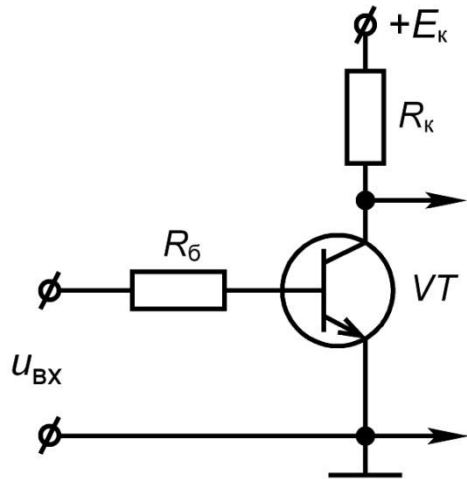


Схема ключа на биполярном транзисторе

Получение условий работоспособности ключей

Раздел находится в разработке

Быстродействие ключей на биполярных транзисторах

Быстродействие ключа определяется временем переключения транзистора из одного статического состояния в другое.

Факторы, определяющие быстродействие ключей на биполярных транзисторах:

1. Инерционность носителей заряда (решающий фактор, т.к. скорость переключения транзистора определяется скоростью изменения количества неосновных носителей в базе прибора).
2. Влияние паразитных емкостей.

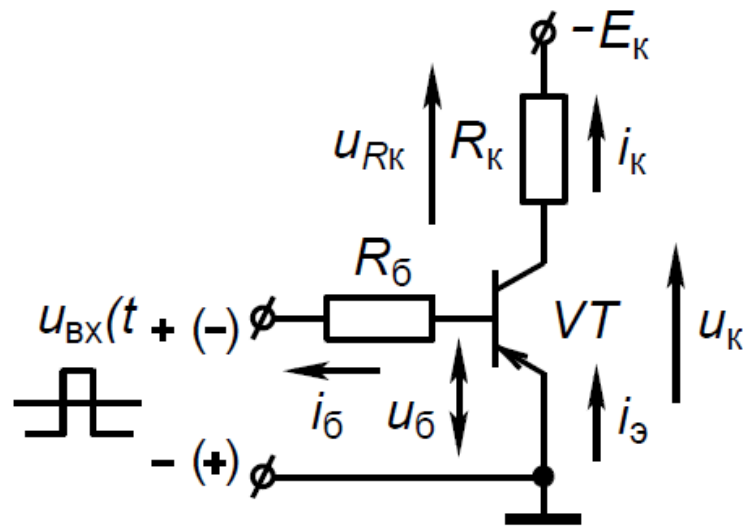


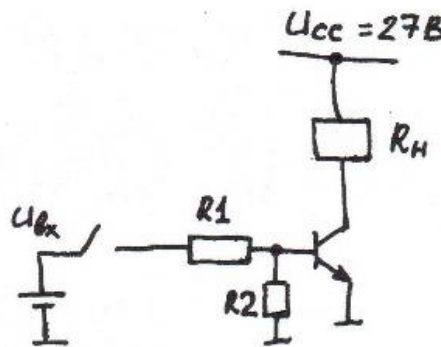
Схема ключа на биполярном транзисторе

Недостатки ключей на биполярных транзисторах

Ключи на биполярных транзисторах имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение:

1. Ограниченное быстродействие, вызванное конечной скоростью рассасывания неосновных носителей в базе.
2. Значительная мощность, потребляемая цепями управления в статическом режиме.
3. Термическая неустойчивость, определяемая ростом тока при увеличении температуры.

Далее транзисторный ключ при пассивном запирании.



Электронные ключи

Ключевой режим работы полевых транзисторов

Ключи на полевых транзисторах, как и на биполярных, могут быть использованы для коммутации источника однополярного (ключи постоянного тока) или разнополярного (ключи переменного тока) напряжения.

В сравнении с ключами на биполярных транзисторах ключи на полевых транзисторах имеют ряд преимуществ:

- входной ток ничтожно мал, => нет потребления статической мощности по управлению;
- быстрое включение и выключение, т.к. отсутствуют процессы накопления и рассасывания избыточного заряда;
- повышенная термоустойчивость (термостабильность), т.к. с ростом температуры ток стока уменьшается.

Остаточное напряжение во включенном состоянии больше, чем у биполярных транзисторов, поскольку сопротивление канала $R_{си}$ больше аналогичного $R_{кэ}$ биполярного транзистора.

Быстродействие ключей на полевых транзисторах почти не хуже, чем у биполярных транзисторов. Но у них наблюдается проникновение в коммутируемую цепь дополнительных импульсов, параметры которых зависят от управляющего сигнала. Причиной их появления являются емкости транзистора $C_{зс}$ и $C_{зи}$.

Переходные процессы в ключах на полевых транзисторах обусловлены переносом носителей через канал и перезарядом межэлектродных емкостей, емкостей нагрузки и монтажа.

Ключ на полевых транзисторах

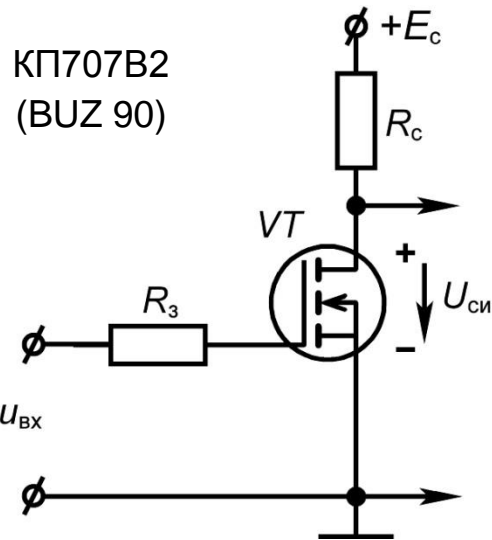


Схема ключа МОП-транзисторе с резистивной нагрузкой

Особенность – в статическом состоянии по цепи управления (по затвору) ток не потребляется!

Выходное напряжение $U_{си\text{ отк}}$ (в открытом состоянии – остаточное напряжение) зависит от сопротивления нагрузки $R_c = R_H$ и при больших R_H может быть меньше, чем биполярных транзисторов.

Назначение элементов:

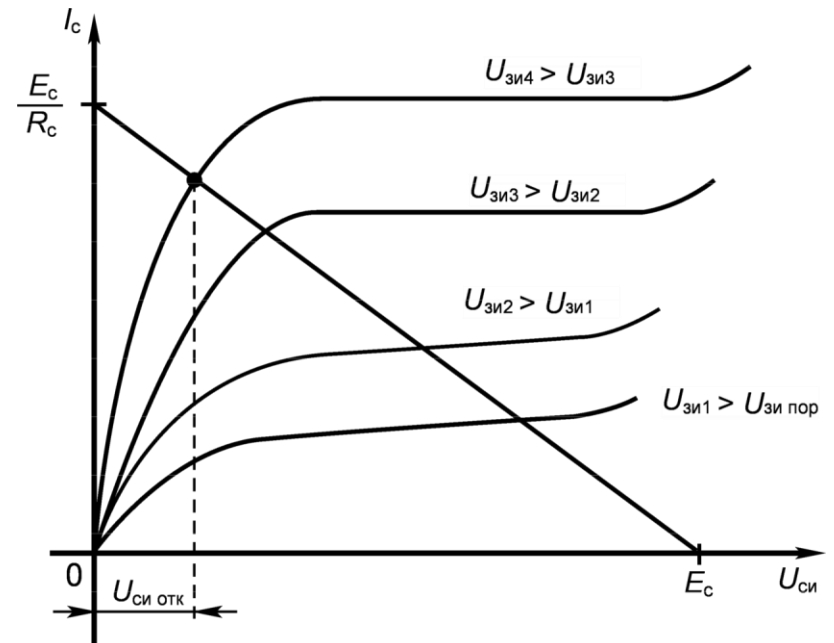
E_c – источник питания;

$R_c = R_H$ – нагрузка;

VT – ключевой элемент;

$U_{вх}$ – входной управляющий сигнал;

$U_{вх}$, $R_з$ – задают ток заряда и разряда $C_{зи}$.



ВАХ МОП-транзистора с индуцированным каналом с нагрузочной линией

КП707В2
(BUZ 90)

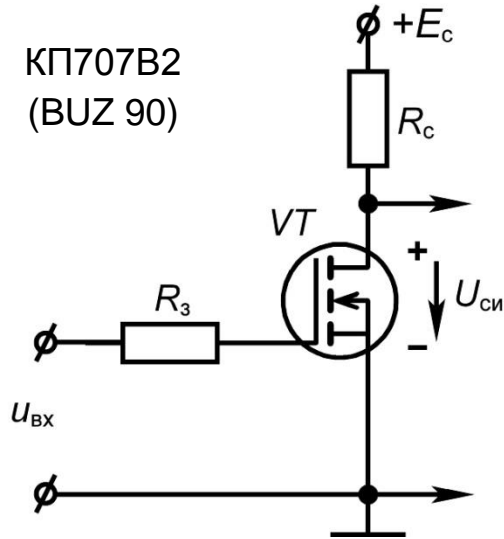


Схема ключа МОП-транзисторе с резистивной нагрузкой

При $U_{вх}=0$ транзистор заперт (ключ выключен), сопротивление канала велико, $\Rightarrow I_c=0$ и $U_{си} \cong E_c$.

Включение ключа осуществляется подачей напряжения отпирающей полярности на затвор величиной

$$U_{вх} > U_{зи\ отс}$$

При этом сопротивление канала $R_{си}$ уменьшается.

Тенденция: чем больше $U_{зи} = U_{вх}$, тем меньше $R_{си}$ и тем больше ток I_c .

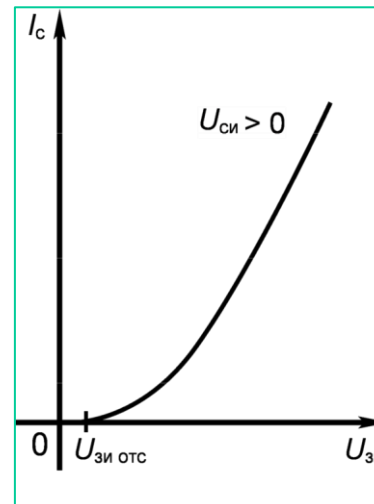
Однако должно быть:

$$U_{вх\ m} < U_{зи\ max}$$

т.е. амплитуда входного напряжения не должна превышать предельного (максимального) $U_{зи\ max}$, указываемого в справочнике или datasheet.

Ток ключа определяется:

$$I_c = \frac{E_c}{R_c + R_{си}} = \left| R_c \gg R_{си} \right| \cong \frac{E_c}{R_c}$$



ВАХ МОП-транзистора с индуцированным каналом

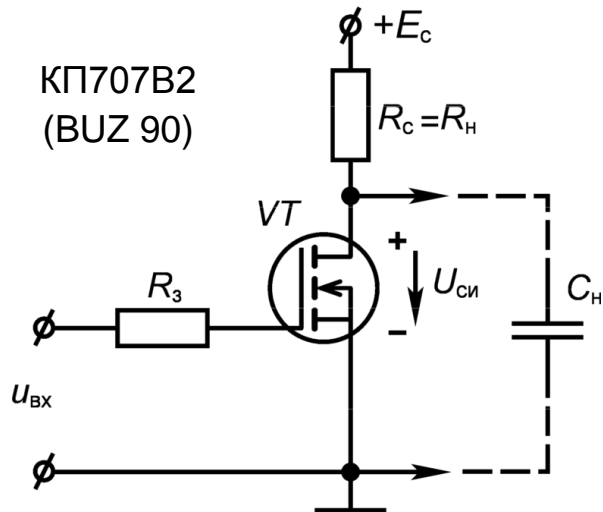


Схема ключа МОП-транзисторе с резистивной нагрузкой

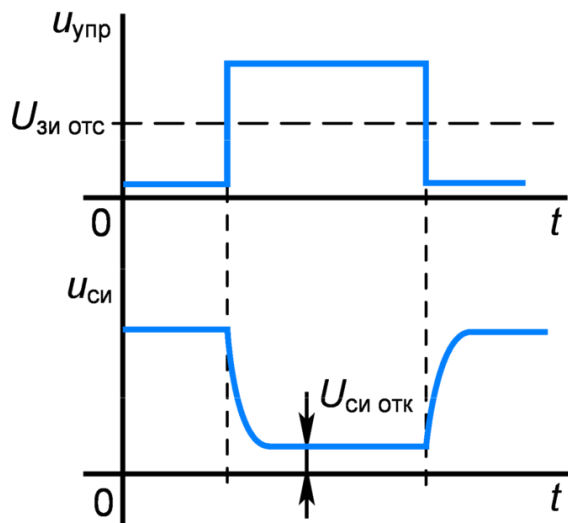
Выключение.

Запирание транзистора может осуществляться как подачей $U_{BX} < U_{зи\ отс}$, так и в некоторых случаях допускается подача отрицательного для данного типа транзистора напряжения $U_{зи}$.

Для запирания ключей, выполненных на полевых транзисторах с управляющим переходом и с технологически встроенным каналом, к их затворам нужно приложить запирающее напряжение:

$$U_{зап} \geq [U_{зи\ отс} + (1 \div 3)\text{В}].$$

Рассмотрим динамику работы ключа на примере цифрового ключа на МОП-транзисторе.



В схему добавим емкость нагрузки, моделирующая емкость устройств, подключенных к транзисторному ключу.

Как видно из диаграмм напряжение $U_{си}$ меняется не мгновенно, а в течение некоторого времени.

Затягивание включения и выключения ключа обусловлено влиянием паразитных емкостей C_H и емкостей транзистора.

На рисунке масштаб на этапах включения и выключения транзистора для удобства увеличен.

Электронные ключи

Аналоговые ключи на полевых транзисторах

В отличие от биполярных полевые транзисторы широко применяются для построения аналоговых ключей (коммутаторов).

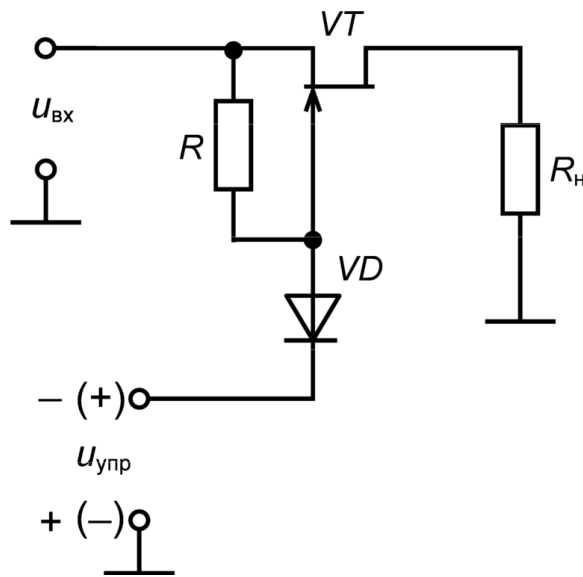
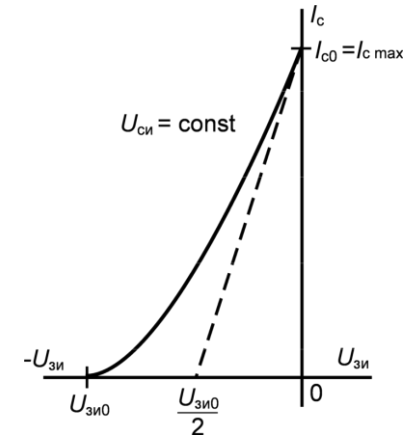


Схема коммутатора с ПТ с управляющим p-n-переходом

Н.В.

При $U_{зи} = 0$, ток стока $I_c = \max \Rightarrow VT$ открыт.
При $U_{зи} < 0$, ток стока $I_c \rightarrow 0$ VT заперт.

Для того, чтобы транзистор был закрыт, между затвором и истоком должно быть отрицательное напряжение, по модулю большее, чем напряжение отсечки $U_{зи0}$.



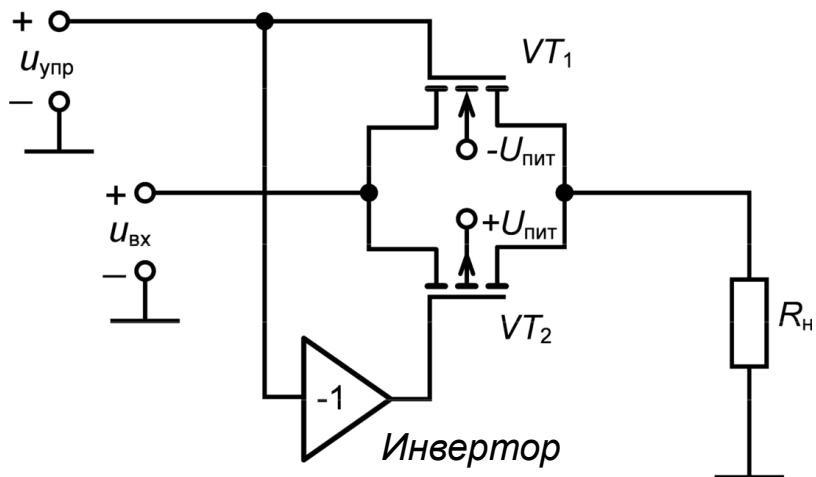
Принцип работы аналогового ключа

Для выключения ключа должно быть $U_{упр} < 0$ (полярность показана без скобок), диод VD открыт, через R протекает ток, создающий на нём необходимое запирающее транзистор напряжение $U_{зи} = U_R \Rightarrow I_c \approx 0 \Rightarrow U_{Rн} \approx 0$. Ключ выключен.

Для включения ключа должно быть $U_{упр} > 0$ (полярность в скобках) $U_{вх \max} < U_{упр} \Rightarrow$ диод VD заперт, ток через R не протекает $\Rightarrow U_{зи} = U_R = 0 \Rightarrow$ ключ проводит $\Rightarrow U_{вх} \approx U_{Rн}$. Ключ включен.

Аналоговые ключи на полевых транзисторах

Одной из проблем, возникающих при создании аналоговых ключей является **нелинейная зависимость** сопротивления ключа от напряжения (тока) на информационном и управляющем входах, что приводит к **возникновению погрешностей** при передаче информационного сигнала.



Упрощённая схема коммутатора на полевых транзисторах

Решение – использовать **транзисторы с разным типом** проводимости, что позволяет обеспечить почти постоянное сопротивление коммутатора, независящее от величины и знака информационного входного (коммутируемого) напряжения.

Принцип работы

Для обеспечения большого диапазона коммутируемого напряжения как в положительной, так и в отрицательной области, используются **комплементарные полевые транзисторы**.

Управляющее напряжение $U_{упр}$ для транзисторов должно быть **противофазным**. Это обеспечивает инвертор напряжения.

Для перевода коммутатора в **состояние включен** необходимо на затвор VT_1 подать положительное, а на затвор VT_2 - отрицательное напряжение управления. В этом случае:

$$U_{зиVT1} = U_{упр} - U_{вх};$$

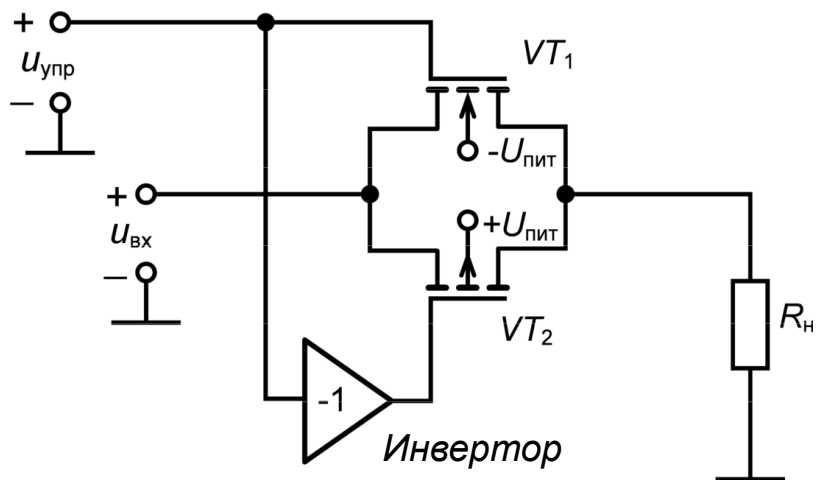
$$U_{зиVT2} = -U_{упр} - U_{вх}.$$

$$U_{зиVT1} = U_{упр} - U_{вх};$$

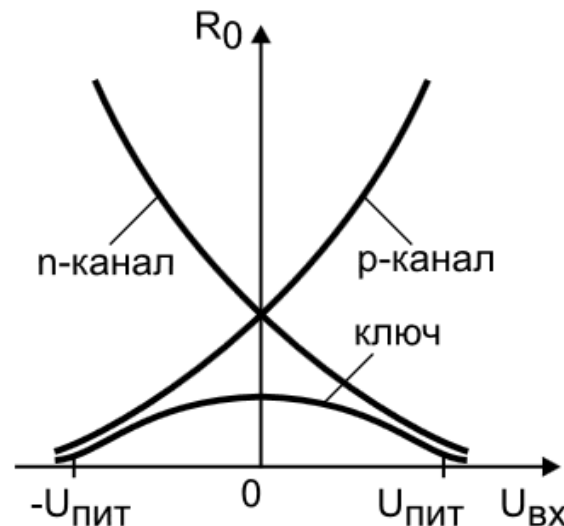
$$U_{зиVT2} = -U_{упр} - U_{вх}.$$

При увеличении $U_{вх}$ уменьшается $U_{зиVT1}$ (сопротивление канала увеличивается). При этом увеличивается (по модулю) $U_{зиVT2}$ (сопротивление канала уменьшается), а общее результирующее сопротивление коммутатора остаётся почти неизменным.

Для выключения коммутатора необходимо **сменить полярность** управляющего напряжения, но и в этом случае $U_{вх}$ должно быть не больше $U_{упр}$.



Упрощённая схема коммутатора на полевых транзисторах



Зависимость сопротивлений каналов транзисторов КМОП-ключа от $U_{вх}$

Аналоговые ключи выпускаются в виде отдельных ИМС 547КП1, К190КТ1, КР590КН1-КР590КН9 и др.

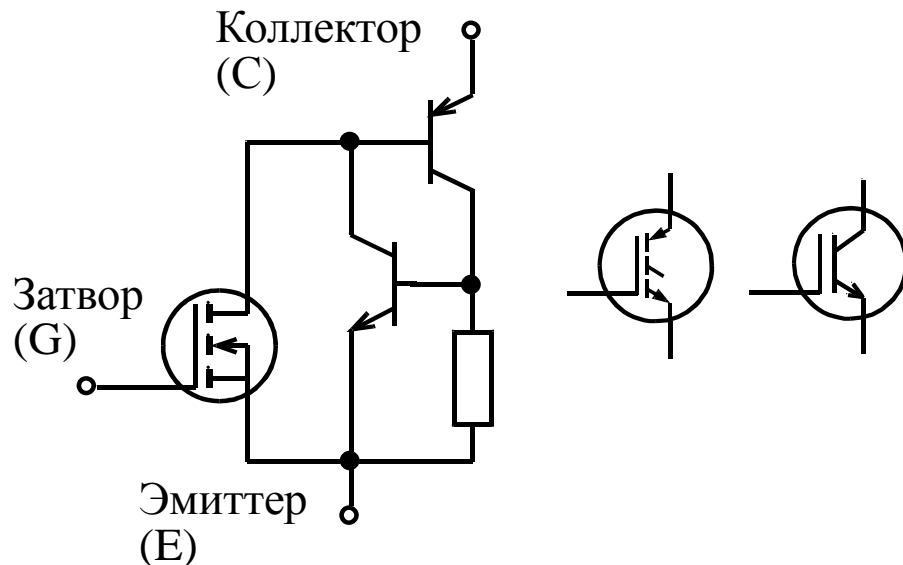
Мощные ключи на биполярных транзисторах с изолированным затвором

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) в зарубежных источниках известны как **Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)**.

IGBT представляет собой комбинацию двух типов полупроводниковых приборов: **полевого транзистора по входу и биполярного транзистора по выходу.**

Поэтому IGBT обладает достоинствами двух основных типов транзисторов:

- высокое входное сопротивление, низкий уровень мощности управления (от ПТ);
- низкое значение остаточного напряжения во включенном состоянии (от БТ).



Слева направо.

Упрощённая эквивалентная схема IGBT,
УГО в иностранной литературе,
УГО в отечественной литературе

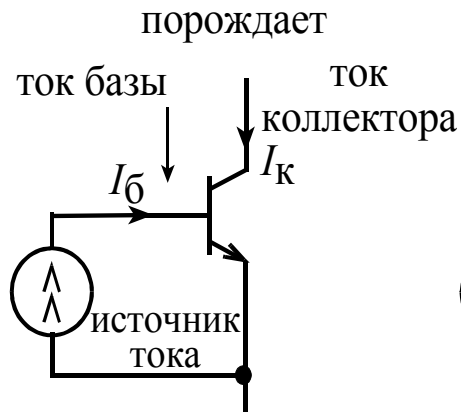
IGBT применяются:

- от десятков до 1200А по току стока,
- от сотен до 3500В по напряжению КЭ.

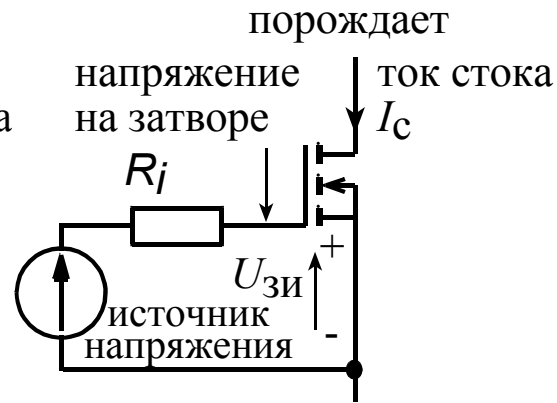
Справочные параметры на импортные компоненты приводятся производителями в так называемых datasheets - аналогов справочника или руководящих тех. материалов (РТМ).

IGBT применяются в преобразователях электроэнергии, в частности, инверторах электропривода, мощных импульсных стабилизаторах напряжения, источниках вторичного электропитания с бестрансформаторным входом и т.д.

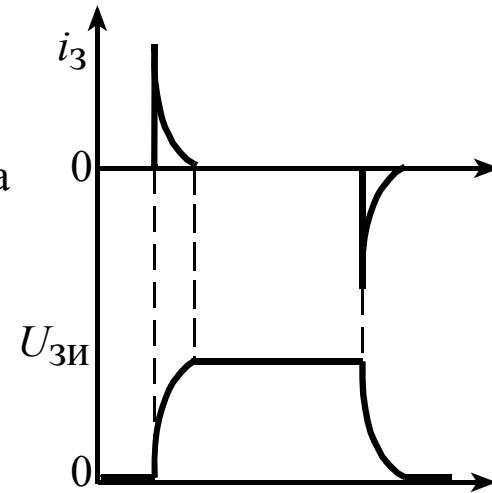
Управление силовыми *MOSFET*-, *IGBT*-транзисторами



а



б



в

*Биполярный транзистор управляется током (а),
полевой транзистор – напряжением (б, в)*

Для включения или выключения IGBT на затвор необходимо подать положительное отпирающее (+15В) или, соответственно, отрицательной (-8В) напряжение. Обычно напряжение на затворе не должно превышать $\pm 20\text{В}$.

Ссылки

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Альянс, 2008. – 496 с.: ил.
2. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 703, [1] с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.: ил.
4. http://www.platan.ru/shem/pdf/an_comm.pdf
5. Фомичев Ю.М., Сергеев В.М. Электроника. Элементная база, аналоговые и цифровые функциональные устройства [Электронный ресурс] : учебное пособие; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2012/m59.pdf>