

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.

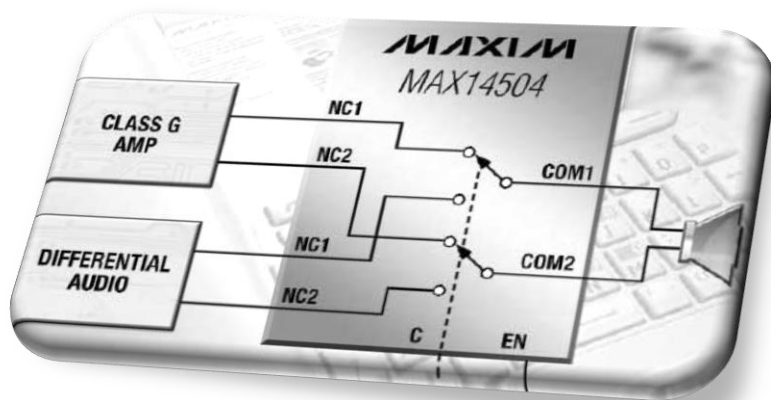


Примеры механического ключа

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

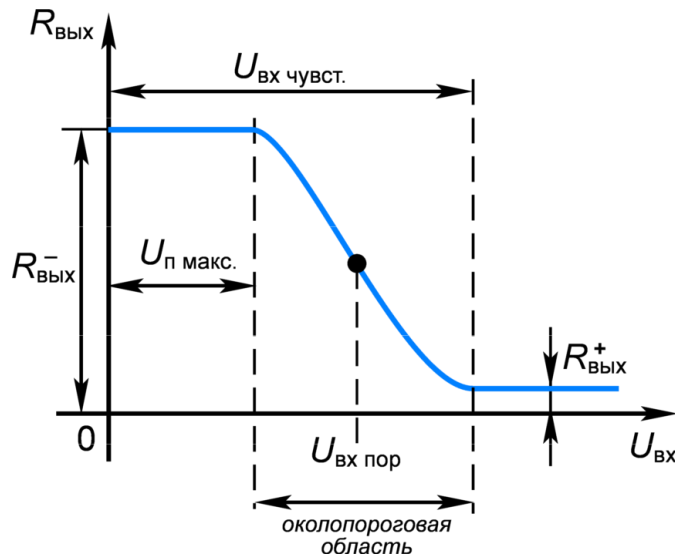
Общие сведения

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 $R_{\text{вых}}^- \rightarrow 0$.

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

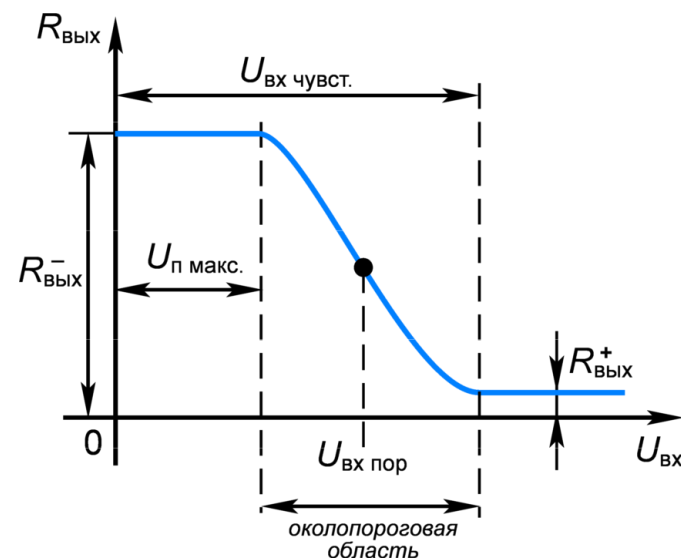
Параметры электронного ключа (важные на практике)

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);

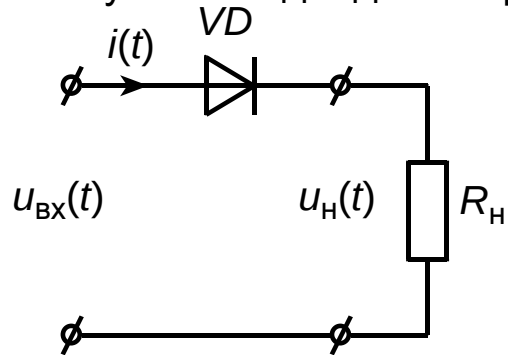
6. Помехоустойчивость ($U_{\text{п макс}}$) – максимальное значение напряжения помехи на входе, при котором ключ сохраняет выключенное состояние без переключения с заданной степенью надёжности.



Передаточная характеристика
электронного ключа

Диодные ключи

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



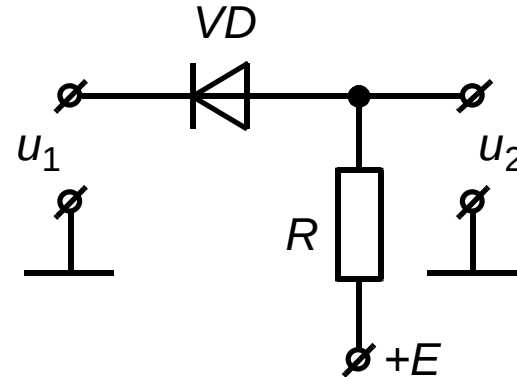
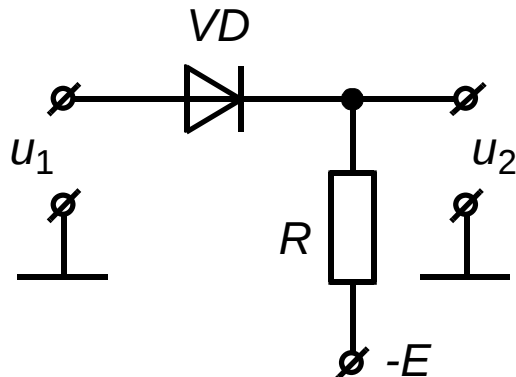
Простейший диодный ключ

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

При $U_{BX} < 0$ 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.

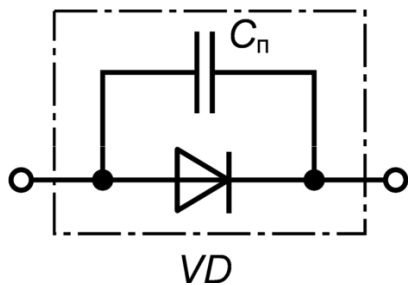
Физические причины инерционности:

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.

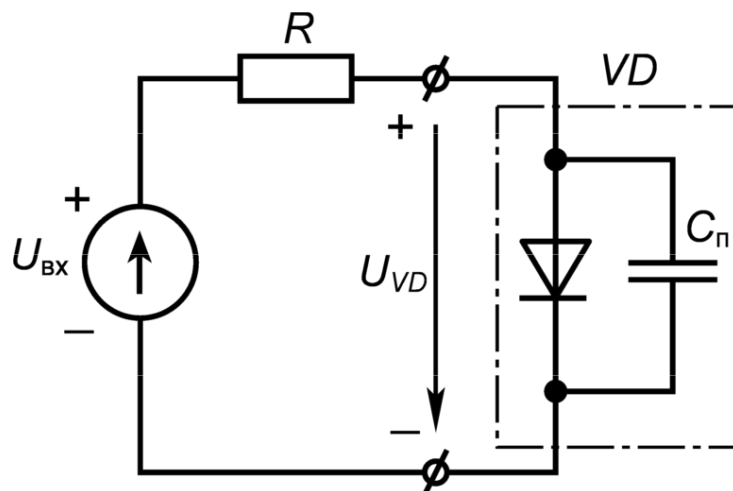


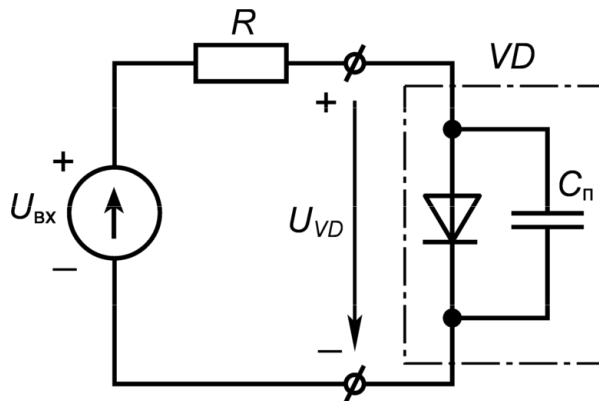
Динамическая схема
замещения диода

Емкость перехода показывают схемой, изображенной на рисунке: емкость подключают параллельно к безынерционному переходу.

Наличие паразитной емкости C_n делает невозможным скачкообразное изменение напряжения на переходе (II закон коммутации).

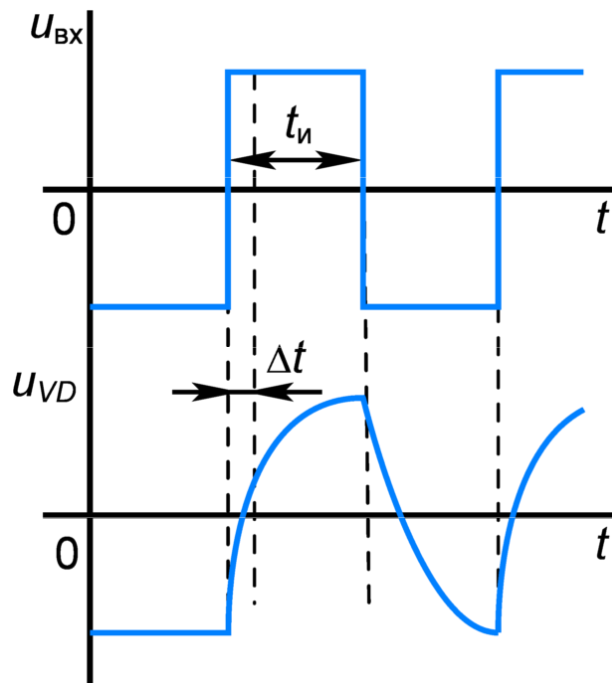
Используя схему изображенную на рисунке ниже, покажем влияние паразитной емкости на напряжение на p - n -переходе.





Емкость перехода показывают схемой, изображенной на рисунке: емкость подключают параллельно к безынерционному переходу.

Наличие паразитной емкости C_n делает невозможным скачкообразное изменение напряжения на переходе (II закон коммутации).



Влияние C_n на скорость переключения p - n -перехода из проводящего состояния в запертое

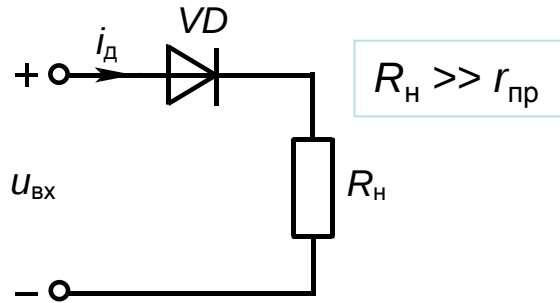
При $U_{BX} < 0$ p - n -переход был смещён в прямом направлении (открыт).

При скачкообразном изменении U_{BX} на положительное (запирающее) значение конечного времени перезаряда емкости C_n приводит к тому, что в течение времени Δt переход не «подчиняется» запирающему воздействию и продолжает оставаться открытым, т.к. напряжение на переходе не изменило знак на противоположный.

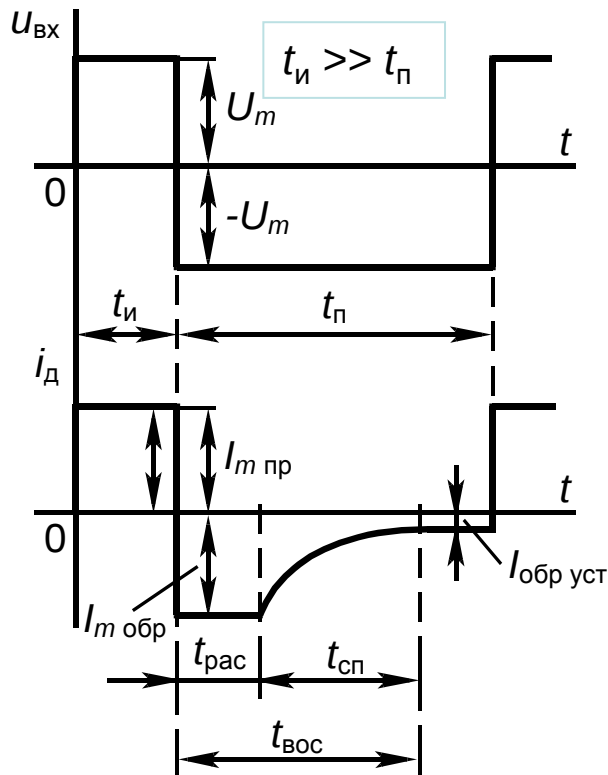
В случае если длительность импульсов t_n станет соизмерима с Δt (при высокой частоте U_{BX}), p - n -переход будет оставаться в проводящем состоянии при любой полярности U_{BX} , т.е. потеряет своё главное свойство – одностороннюю проводимость.

В рассмотренном случае $C_n = C_{бар}$.

Рассмотрим влияние диффузионной емкости, полагая, что $C_n = C_{\text{диф}}$.



Под диффузионной емкостью понимают емкость, с помощью которой имитируют эффект конечного времени рассасывания неравновесного заряда неосновных носителей в высокоомной части p - n -перехода. Данные физические процессы были подробно рассмотрены в разделах «Ёмкости p - n -перехода» и «Импульсные диоды» курса «Электроника 1.2». Тем не менее некоторые подробности.

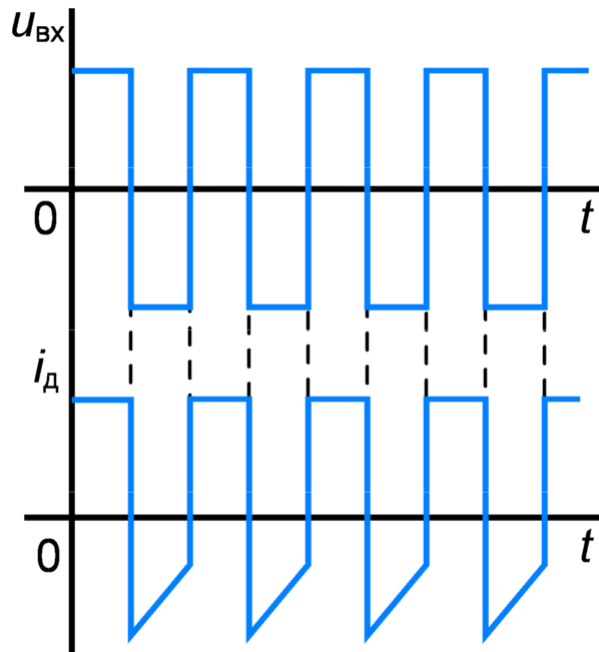
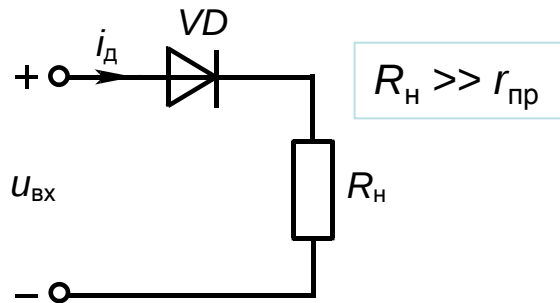


Ранее рассматривался p - n -переход с высокоомной областью, т.е. $n_p \gg p_n$, где в области p электроны являются неосновными носителями и их равновесная концентрация мала. При подаче прямого смещения электроны – основные носители слоя n в огромном количестве переходят в слой p , создавая там объемный заряд неравновесных неосновных носителей.

Если резко сменить приложенное напряжение на запирающее, то переход электронов из n -области прекратится, но электроны, оказавшиеся в этот момент в p -слое (неравновесный объемный заряд), будут, как неосновные носители, возвращаться в n -слой, пока объемный заряд неосновных носителей в p -области не уменьшится до равновесного.

Физически это означает, что в течение некоторого времени после смены напряжения с прямого на обратное через p - n -переход будет протекать обратный ток, намного больший равновесного значения I_0 ($I_{\text{обр уст}}$).

Влияние C_n на скорость переключения p - n -перехода из запертого состояния в проводящее при низкой частоте вх. сигнала



Проявление диффузионной емкости p - n -перехода при высокой частоте входного сигнала

На рисунке видно, что влияние диффузионной емкости при высокой частоте входного напряжения приводит к потере односторонней проводимости p - n -перехода. В силу того, что переход не успевает восстанавливать своё высокое обратное сопротивление, он проводит в обоих направлениях – бесполезный диод!

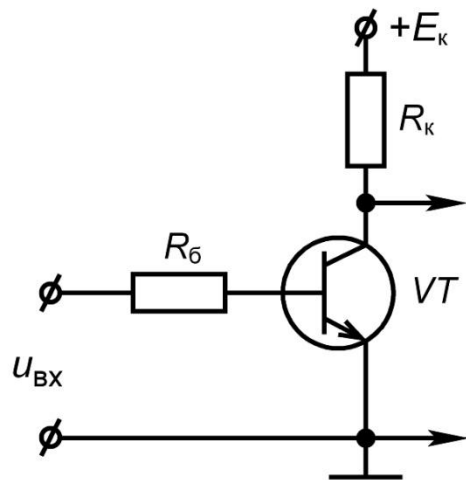
Очевидно, что чем больше величина прямого тока, тем больше неравновесный заряд, тем большее время ($t_{рас}$) необходимо для его рассасывания, тем больше инерционность p - n -перехода.

Выводы

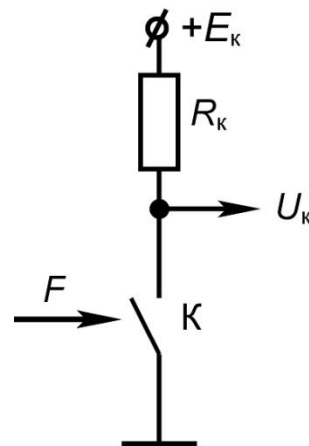
1. Реальный диод является инерционным прибором. При отпирании и запираии диодного ключа напряжение и токи в цепи устанавливаются не мгновенно, а в течение промежутка времени, значение которого зависит от параметров диода и его режимов работы.
2. Инерционность определяет время переключения диода из одного статического состояния в другое.
3. При проектировании устройств с диодами необходимо учитывать их инерционность, т.е. длительность переходных процессов схеме должна быть значительно больше времени переключения диода.

Электронные ключи

Ключевой режим работы биполярных транзисторов



электронный ключ на биполярном транзисторе



механический ключ – аналог электронного ключа

Назначение элементов:

$E_к$ – источник питания;
 $R_к$ – нагрузка;
 VT, K – ключевой элемент;
 U_{BX} – входной управляющий сигнал;
 F – внешняя сила;
 $U_{BX}, R_б$ – 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 $U_{вых} = U_{кэ}$ 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 $U_{кэ}$ 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.

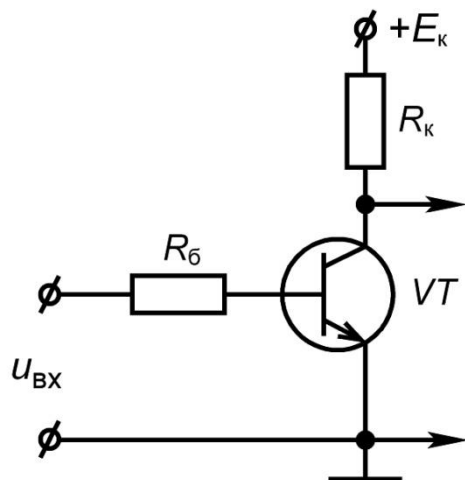
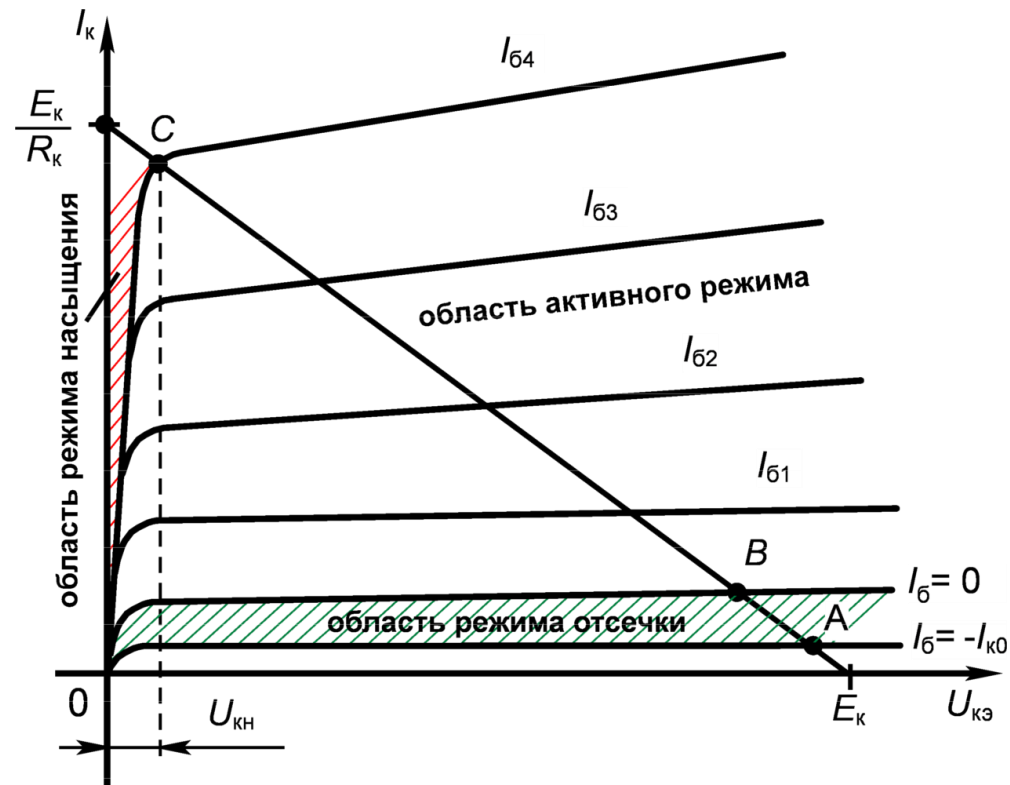


Схема ключа на биполярном транзисторе



- т. А – режим глубокой отсечки (активное запирание) – рекомендуемый режим запирания;
- т. В – режим неглубокой отсечки (пассивное запирание);
- 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 запирания биполярного транзистора

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

$$I_{\bar{\delta}} \geq I_{\bar{\delta}H}$$

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

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

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

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

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

Электронные ключи

**Переходные процессы при переключении транзисторного
ключа на биполярном транзисторе
+ ключ с форсирующим конденсатором (идея, реализация)**

**Изучить самостоятельно!
Написать конспект!**

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.: ил.
2. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 703, [1] с.
3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.

Электронные ключи

Ключи на полевых транзисторах

В качестве ключевого элемента обычно используют:

- транзисторы с управляющим p - n -переходом;
- МДП-транзисторы с индуцированным каналом.

В сравнении с биполярными полевые транзисторы имеют ряд преимуществ:

- входной ток ничтожно мал, $\Rightarrow$ нет потребления статической мощности по управлению;
- быстрое включение и выключение, т.к. отсутствуют процессы накопления и рассасывания избыточного заряда;
- повышенная термоустойчивость, т.к. с ростом температуры тока стока уменьшается.

Быстродействие ключей на полевых транзисторах на высоких частотах переключения хуже, чем у биполярных. Переходные процессы в ключах на полевых транзисторах обусловлены переносом носителей через канал и перезарядом межэлектродных емкостей и емкостей нагрузки.

Электронные ключи

Ключи на полевых транзисторах

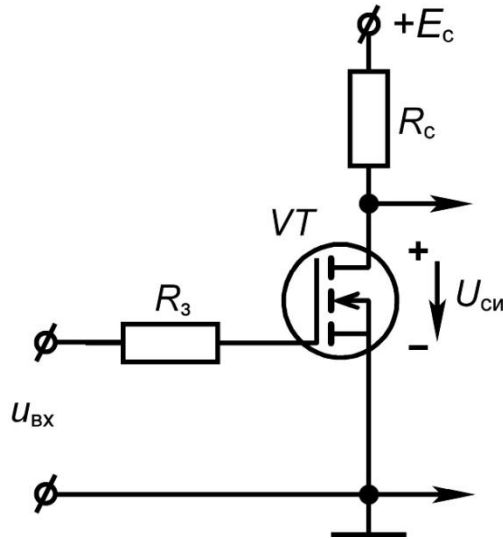


Схема ключа на полевом МДП-транзисторе с индуцированным каналом.

Для выключения ключа на затвор необходимо подать запирающее напряжение (отрицательное напряжение) превышающее $U_{зи\text{ отс}}$.

Назначение элементов:

E_c – источник питания;

R_c – нагрузка;

VT – ключевой элемент;

$U_{вх}$ – входной управляющий сигнал;

$U_{вх}$, R_3 – задают ток заряда и разряда $C_{зи}$.

При $U_{вх}=0$ транзистор заперт (ключ выключен), т.е. $I_c=0$.

Включение ключа осуществляется подачей напряжения отпирающей полярности на затвор величиной превышающей $U_{зи\text{ отс}}$.

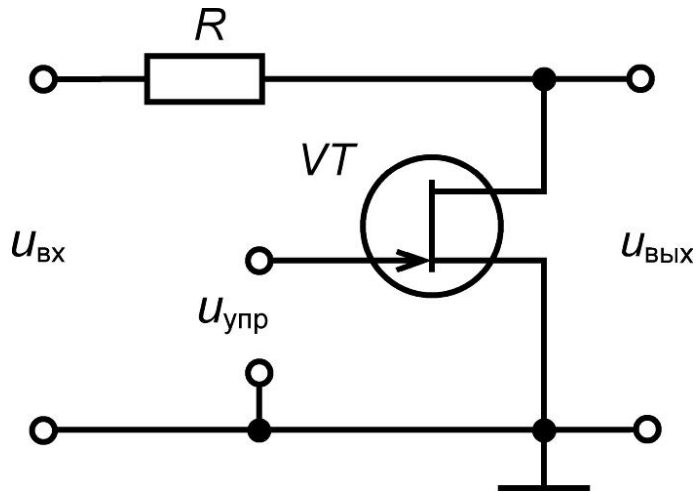
Тенденция: чем больше $U_{зи} = U_{вх}$, тем больше ток I_c .

$$I_c = \frac{E_c}{R_c + R_{си\text{ min}}}$$

Электронные ключи

Ключи на полевых транзисторах

В отличие от биполярных транзисторов полевые широко применяются для построения аналоговых ключей.



При напряжении $u_{упр} < 0$ транзистор запирается $\Rightarrow$ сопротивление канала $R_{си}$ возрастает, при этом выходное напряжение увеличивается:

$$U_{вых} \uparrow = U_{вх} \frac{R_{си} \uparrow}{R + R_{си} \uparrow}.$$

Параллельный аналоговый ключ

Для коммутирования разнополярных сигналов аналоговые ключи строятся по двухтактной схеме.

Подробности и дополнительная информация на:

http://www.platan.ru/shem/pdf/an_comm.pdf

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. Ерофеев Ю.Н. Импульсные устройства: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 527 с.: ил.
5. http://www.platan.ru/shem/pdf/an_comm.pdf