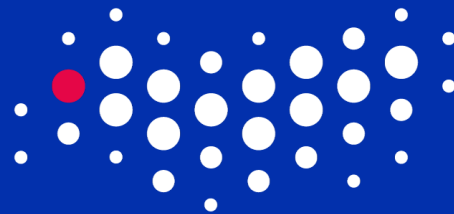


УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург, 2021



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Формирователи сигналов. Ключевой  
режим работы биполярного  
транзистора, разновидности  
транзисторных ключей.



## Темы, освещенные в презентации

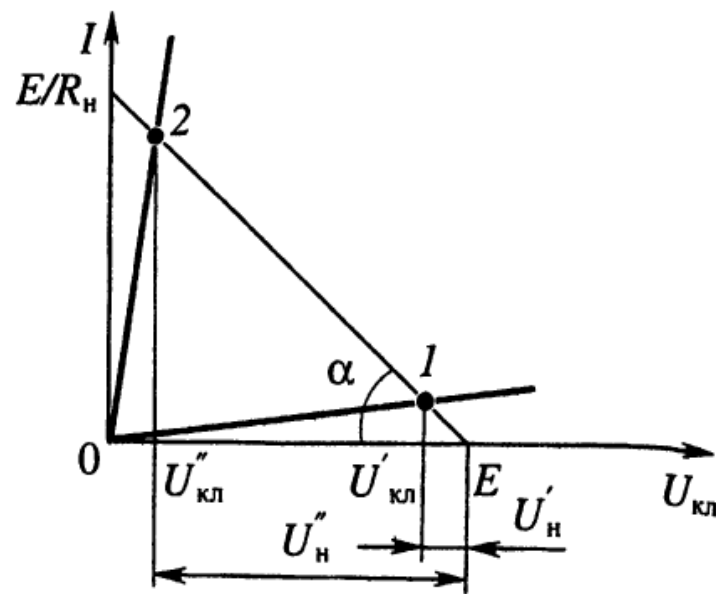
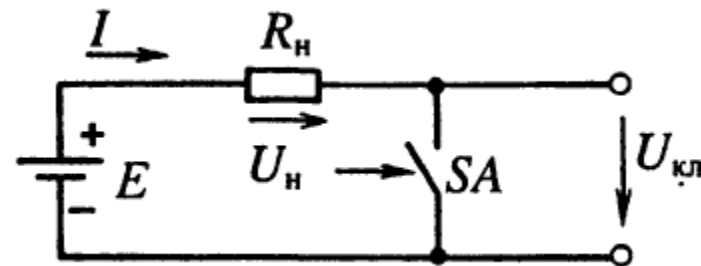
- ✓ Ключевой режим работы транзистора
- ✓ Разновидности транзисторных ключей
- ✓ Триггеры
- ✓ Разновидности триггеров

## Ключевая схема (ключ)

Ключевые схемы являются важнейшими базовыми элементами импульсных устройств и служат для формирования электрических импульсов прямоугольной формы. Ключевая схема (ключ) позволяет подключать нагрузку к источнику или отключать ее и таким образом коммутировать ток в нагрузке.

Простейший коммутирующий элемент – электромеханический ключ «SA» (рисунок). На нижнем рисунке построена нагрузочная прямая рассматриваемой цепи.

В качестве электронных ключей используются диоды, транзисторы, тиристоры и некоторые другие электронные приборы.



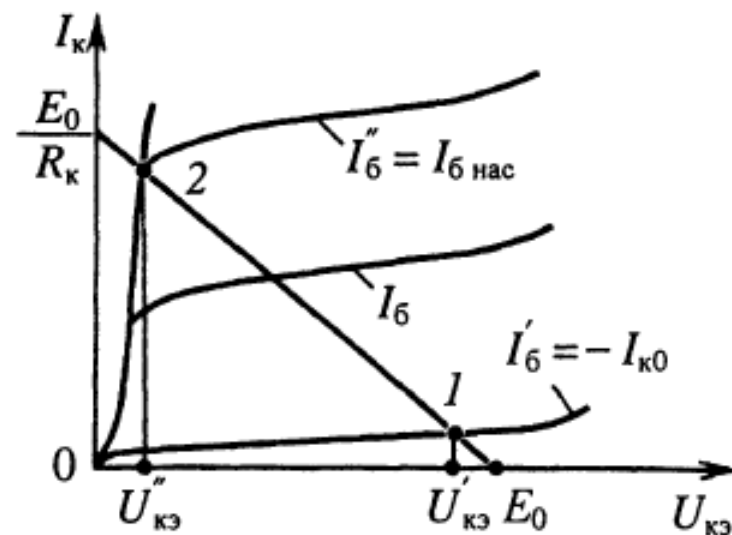
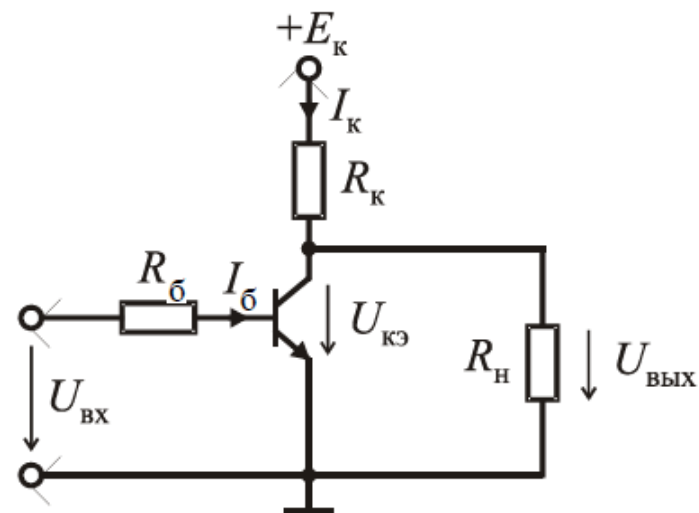
## Простейший транзисторный ключ

Выходное сопротивление транзистора по постоянному току со стороны электродов коллектор-эмиттер может изменяться в широких пределах в зависимости от положения рабочей точки на ВАХ, очевидно, что из рисунка, на котором приведены ВАХ транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

Точка 1 на рисунке соответствует режиму отсечки (состояние «выключено»). Точка 2 (состояние «включено») соответствует режиму насыщения. Когда транзистор находится в режимах отсечки или в насыщения, он не управляется по цепи базы.

Ключ закрыт, когда напряжение на входе меньше напряжения логического нуля  $U$ . Для ключей на кремниевых биполярных транзисторах оно составляет 0.4–0.5 В.

Сопротивление закрытого ключа составляет сотни кОм.



# Простейший транзисторный ключ

Если на вход действует импульс напряжения такой, что транзистор находится в режиме насыщения, то

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}}{R_{\text{б}}} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{б}}}$$

В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, ток коллектора возрастает max:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{кнас}} = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{кэ}}}{R_{\text{к}}} \approx \frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}}}$$

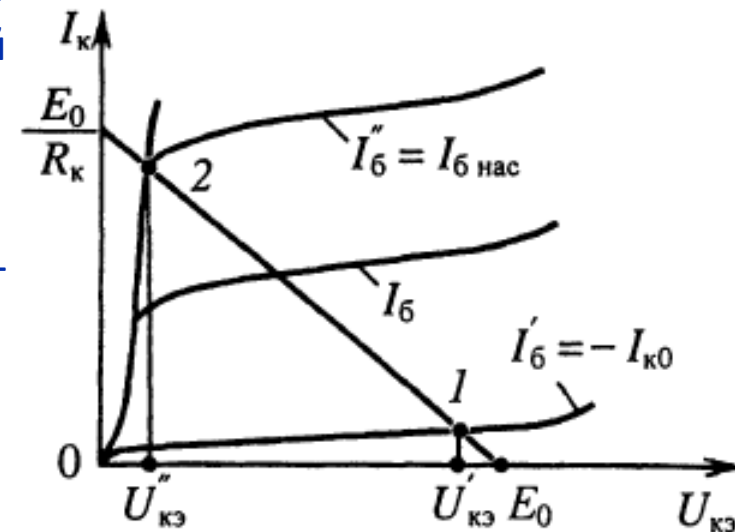
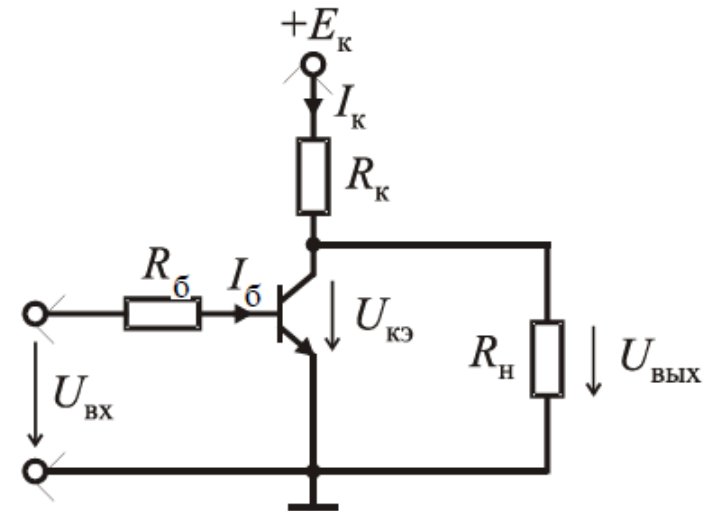
Напряжение  $U_{\text{кэ}}$  в режиме насыщения составляет 0.2–0.3 В, а выходное сопротивление – несколько десятков Ом. Минимальный ток базы, необходимый насыщению транзистора:

$$I_{\text{б}} > \frac{I_{\text{кнас}}}{\beta} \approx \frac{E_{\text{к}}}{\beta R_{\text{к}}}$$

Глубину насыщения транзистора характеризуют коэффициентом (степенью) насыщения:

$$Q = \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{бнас}}}$$

Величина коэффициента насыщения от 1.5 до 3.

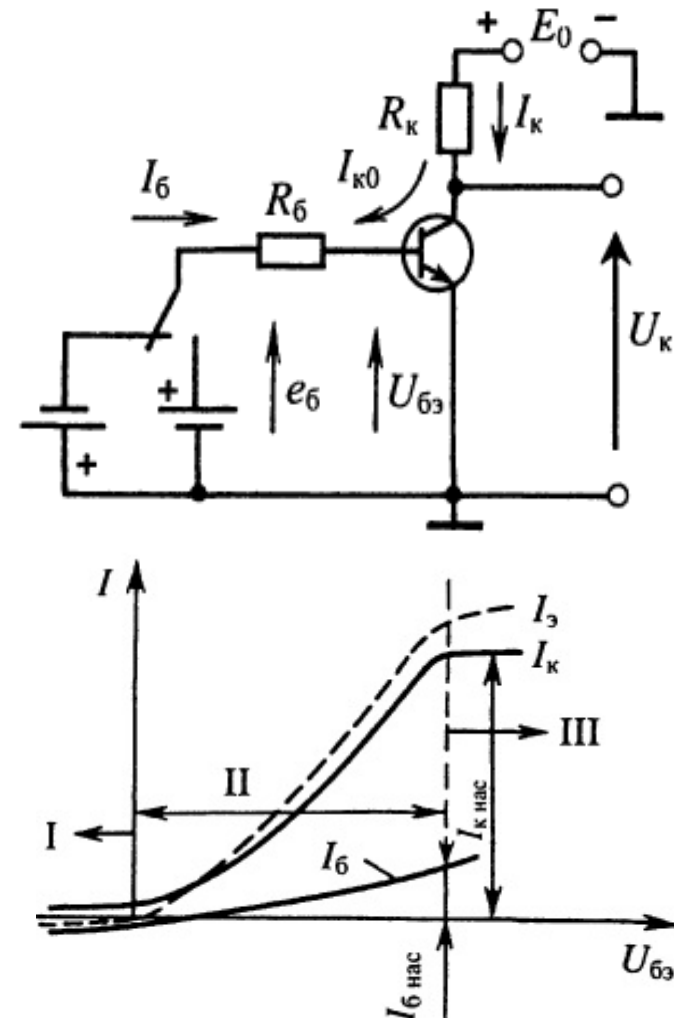


## Простейший транзисторный ключ

На верхнем рисунке показана схема простейшего транзисторного ключа.

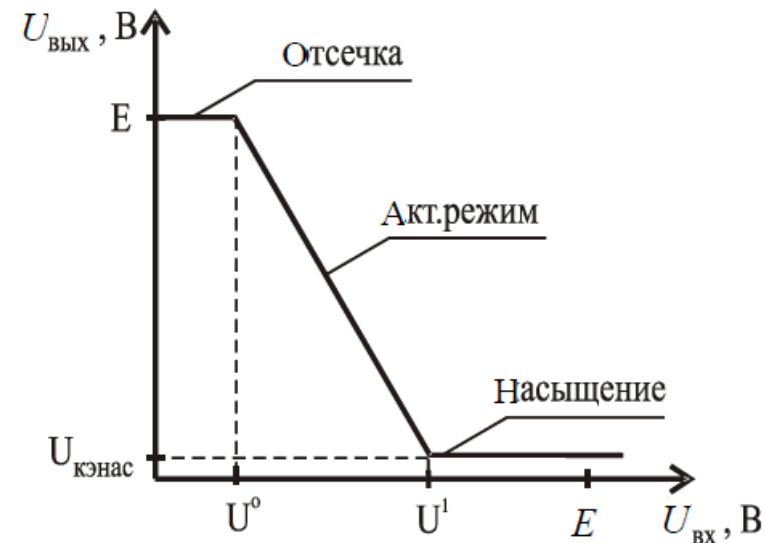
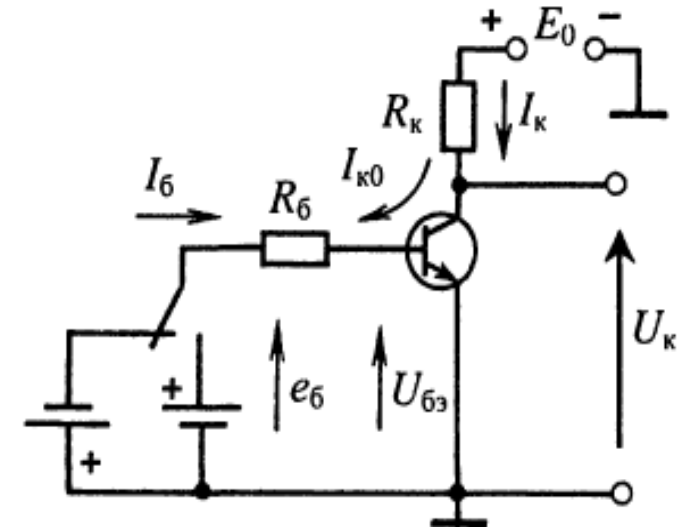
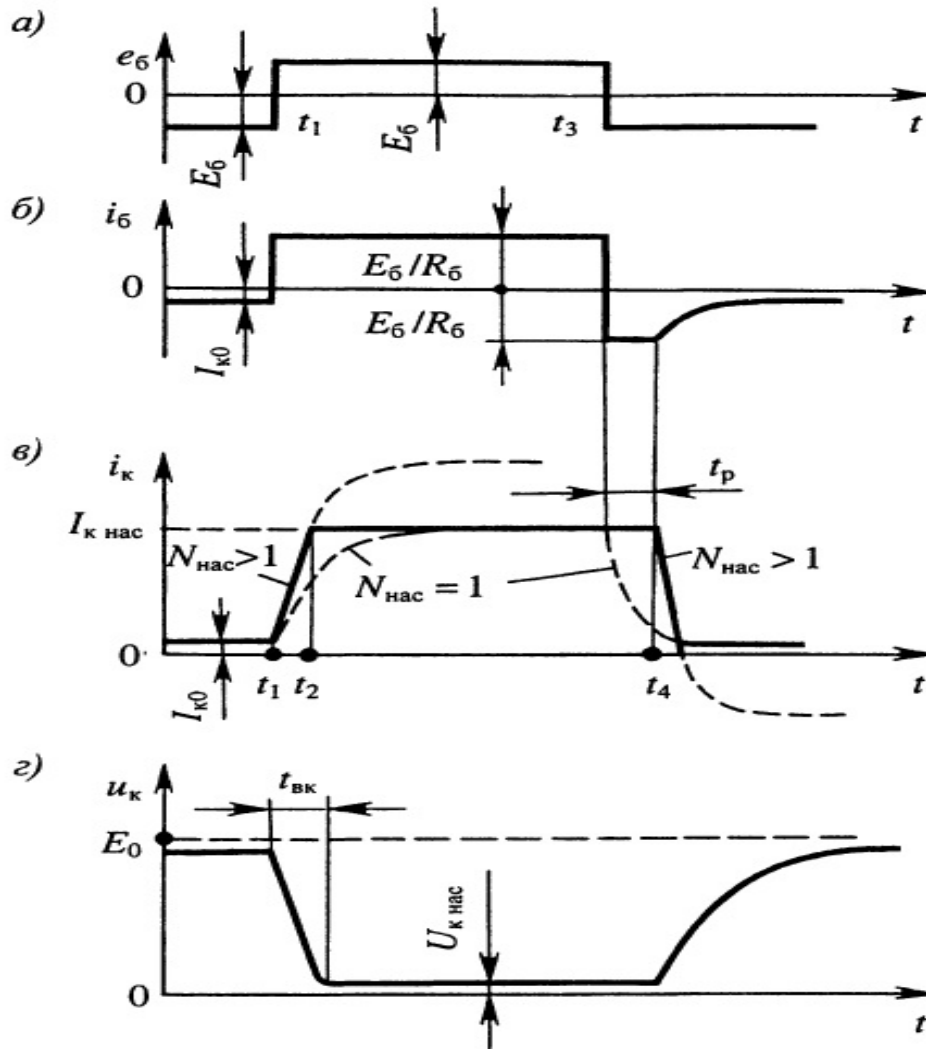
Рассмотрим зависимость токов  $I_k$ ,  $I_z$  и  $I_b$  от напряжения  $U_{бз}$  на базе транзистора (нижний рисунок).

В режиме отсечки (область I) в цепях базы и коллектора текут малые токи обратно смещенных n-p переходов транзистора. При увеличении положительного смещения на базе  $U_{бз}$  транзистор переходит в активный режим (область II), а когда потенциал базы превысит потенциал коллектора — в режим насыщения (область III).





## Переходные процессы в ключе на БТ





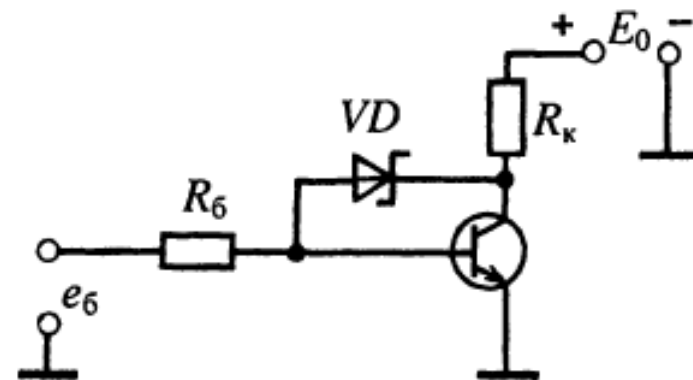
## Транзисторный ключ с диодом Шоттки

Основным фактором, ограничивающим быстродействие, является насыщение транзистора. Время рассасывания  $t_p$  вносит самый существенный вклад.

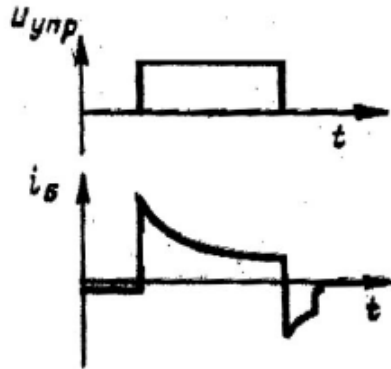
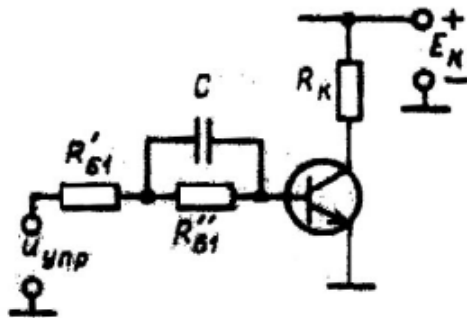
В микроэлектронных импульсных устройствах повышение быстродействия транзисторного ключа часто достигается применением в ключевой схеме диода с барьером Шоттки (ДБШ) (рисунок).

Если транзистор находится в состоянии отсечки, то диод смещен в обратном направлении положительным напряжением на коллекторе. При подаче положительного скачка управляющего напряжения в цепь базы транзистор переходит в активный режим. На его базе напряжение имеет положительную полярность относительно эмиттера, а напряжение на коллекторе падает в соответствии с ростом коллекторного тока.

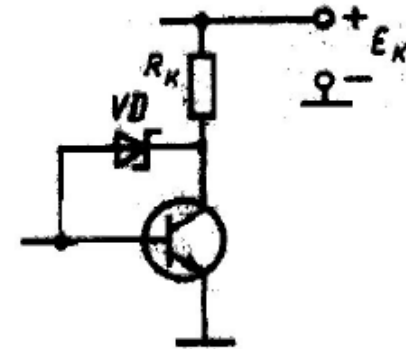
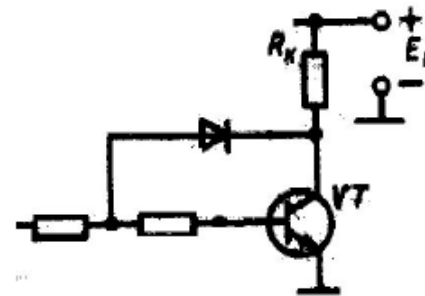
Особенностью ДБШ, работа которого основана на выпрямляющих свойствах контакта металл-полупроводник, является более крутая прямая ветвь ВАХ, чем у диода с обычным p-n переходом. По этой причине при уменьшении напряжения на коллекторе в процессе переключения ДБШ откроется раньше, чем коллекторный переход.



## Схемотехнические методы повышения быстродействия ключа:



форсирующая цепочка



нелинейная обратная связь

Принцип работы форсирующей цепочки: при отпирании транзистора ток базы определяется процессом заряда форсирующей емкости (быстрый переход в насыщение), в открытом состоянии ток базы определяется резистором, величина которого выбирается т.о., чтобы обеспечить неглубокое насыщение транзистора. Таким образом, уменьшается время рассасывания неосновных носителей в базе.

При использовании нелинейной обратной связи применяется диод, включенный между базой и коллектором транзистора. Запертый диод не влияет на работу схемы, когда ключ открывается, диод оказывается смещенным в прямом направлении, а транзистор охваченным глубокой отрицательной обратной связью.

## Transistor switch mode

### 1. A typical inverter circuit using a bipolar transistor.

A typical inverter circuit using a bipolar transistor is shown in Figure 1.

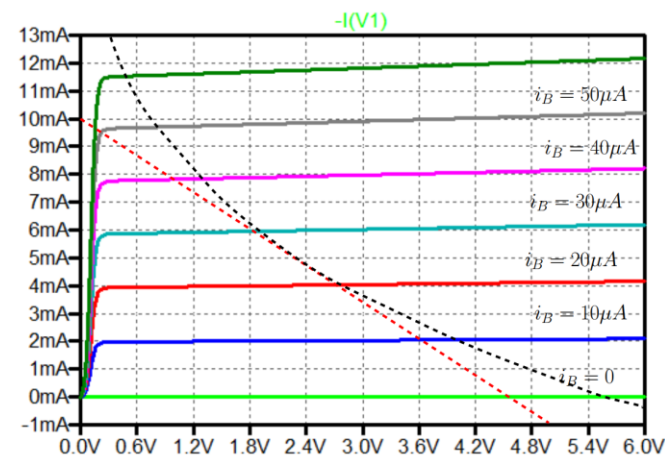
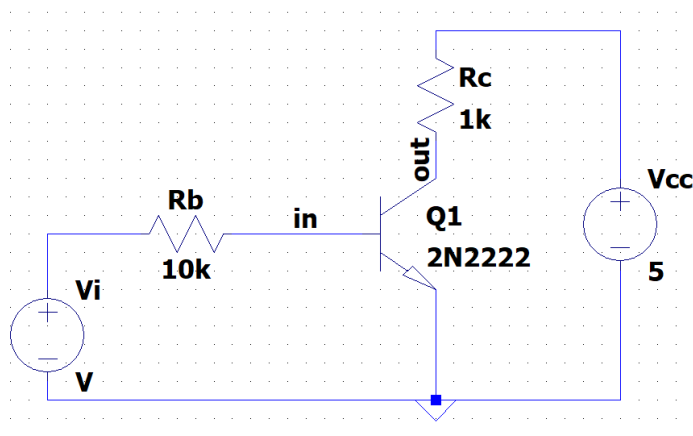
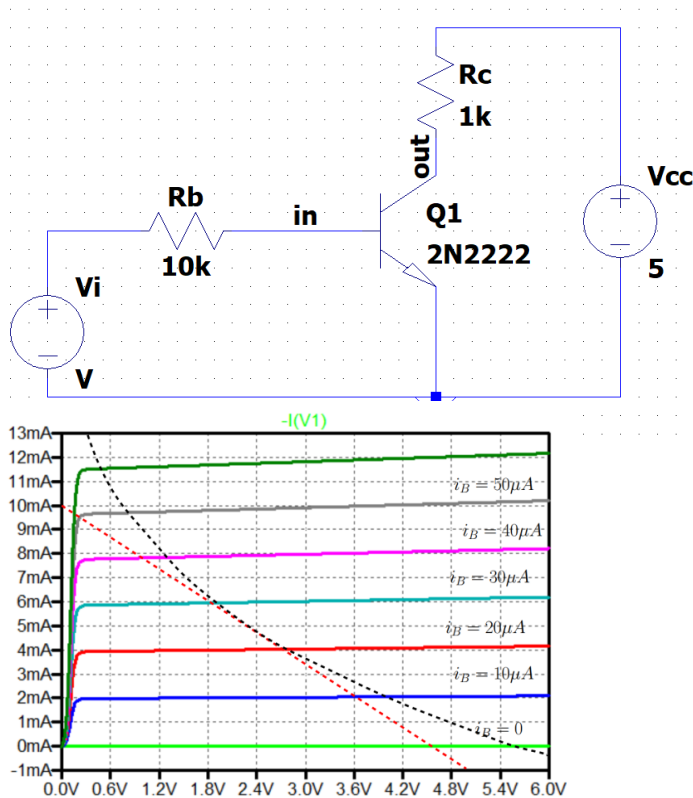


Figure 1 - A typical inverter circuit and volt-ampere characteristic

## Transistor switch mode



Consider main relationships for transistor switch.

For output load line drawing we need to consider Kirchhoff's voltage law for output circuit

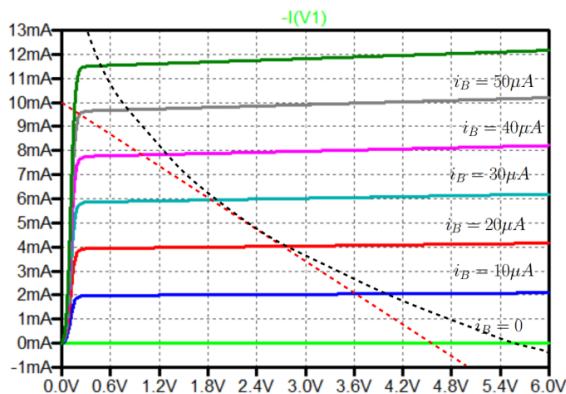
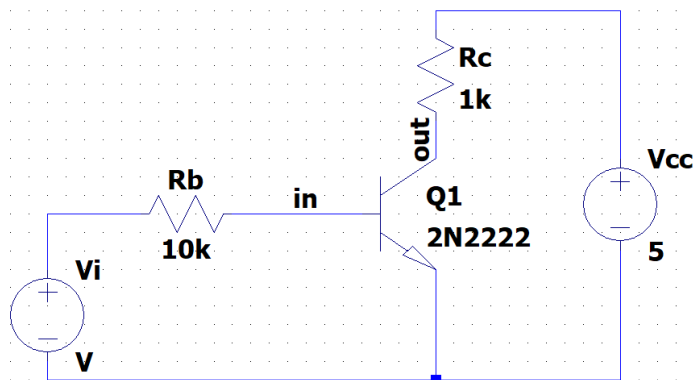
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C i_C$$

For input load line drawing we need to consider Kirchhoff's voltage law for input circuit

$$V_{BE} = V_i - R_B i_B$$

Consider levels of analog input signals – as logic “0” we consider signal over 0 V and as logic “1” we consider signal over 5 V.

## Transistor switch mode



For logic 0 the base current is zero. Transistor is said to be cut off (off), only a very small value of collector current flows. In cut off state for output voltage we have logical 1 level

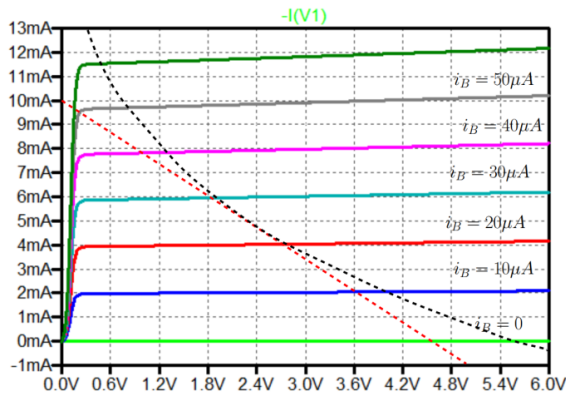
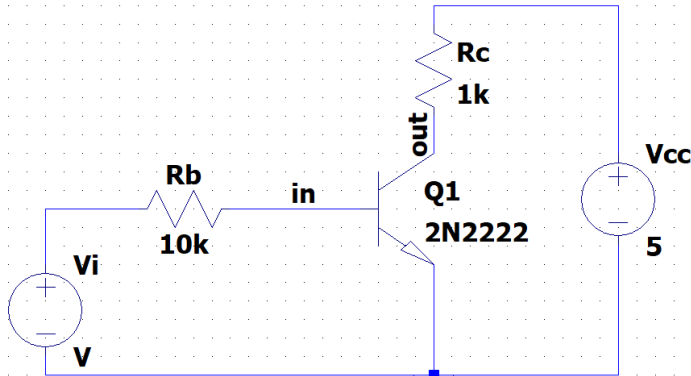
$$V_{out} = V_{CE_{cut\ off}} \cong V_{CC} - R_C i_{CE0} \cong V_{CC} = 5\text{ V}.$$

For logic 1 the base current is not zero

$$I_{B_{sat}} = \frac{V_i - V_{BE}}{R_B}$$

where  $V_{BE} \cong 0.7\text{ V}$  which is the threshold voltage.  $R_B$  is chosen to drive the transistor into saturation.

## Transistor switch mode



In the saturated state  $V_{CEsat} = 0.2 \dots 0.3 \text{ V}$  (this is typically value).

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} \cong \frac{V_{CC}}{R_C}.$$

It can be shown that saturation will occur when

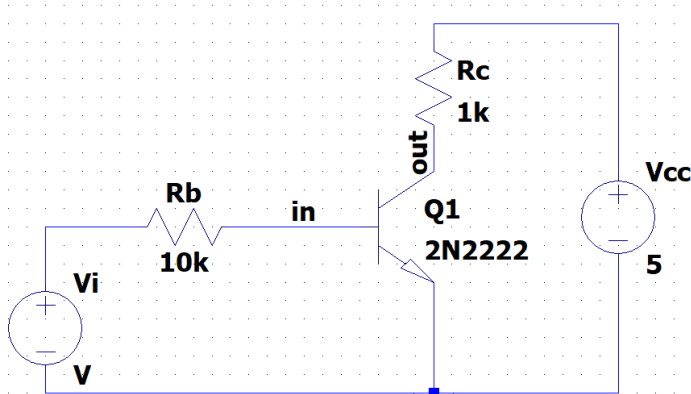
$$\frac{V_i - V_{BE}}{R_B} > \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{\beta R_C}.$$

Since  $i_C \cong \beta i_B + I_{CE0}$ , then for saturated state we need

$$i_{Bsat} > i_{Csat} / \beta, \text{ such as}$$

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C}$$

## Transistor switch mode



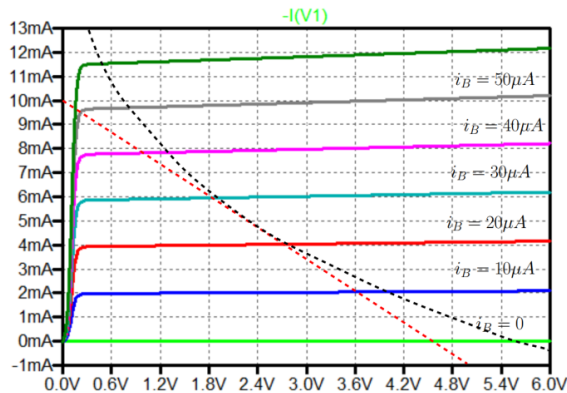
then

$$I_{B_{sat}} = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{\beta R_C}$$

We choose current value as

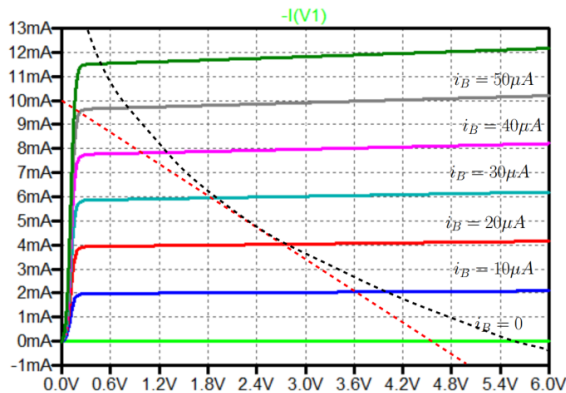
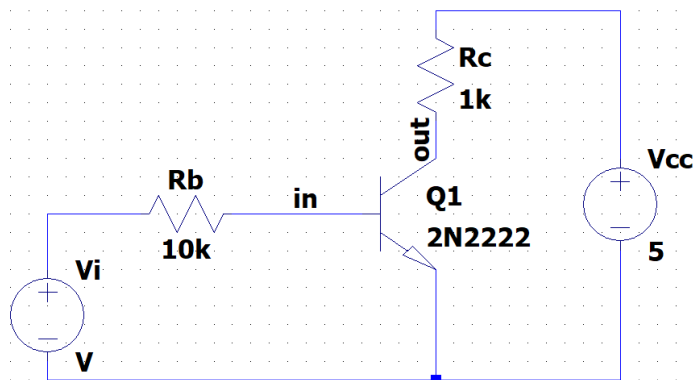
$$i_B = k \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{\beta R_C}$$

where  $k$  is a coefficient of desired overdrive (usually  $k = 2 \dots 3$ ).





## Transistor switch mode



For example, we consider transistor 2N2222.

We need to choose current value  $I_C$  it must be not more than maximum value of transistor current  $I_{C_{max}}$  (for 2N2222  $I_{C_{max}} = 0.6 A$ , see table from datasheet).

We choose  $I_C = 10 mA$ . Then for  $R_C$  we have

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{I_C} \cong \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{5}{0.01} = 500 \Omega.$$

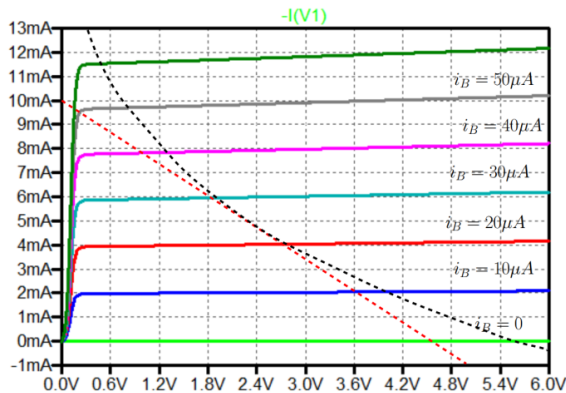
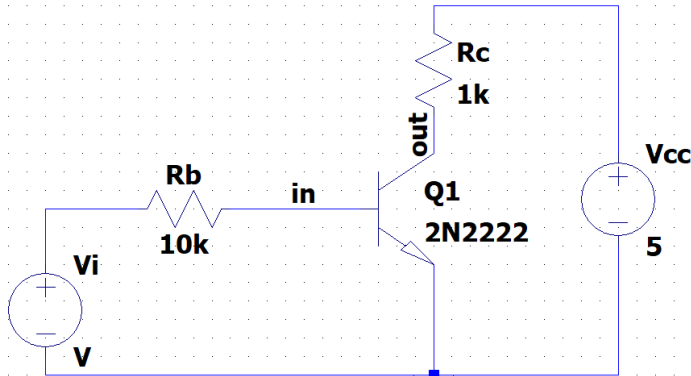
Now we can plot load line on the output volt–ampere characteristic (VAC) and maximum collector dissipation line.

Collector Current	$I_C$	600	mA
Power Dissipation	$P_{tot}$	625	mW





## Transistor switch mode



Chose value of  $i_B$

$$i_B = k \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{\beta R_C} \cong k \frac{V_{CC}}{\beta R_C}$$

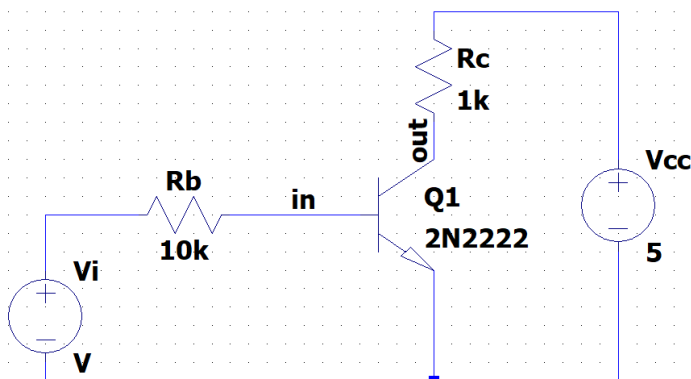
For  $k = 3$  and  $\beta = 100$  (we found this value in transistor datasheet) we have

$$i_B = k \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{\beta R_C} = 3 \frac{5}{100 \cdot 500} = 0.3 \text{ mA.}$$

Now we need find value of  $R_B$

$$R_B = \frac{V_i - V_{BE}}{I_B},$$

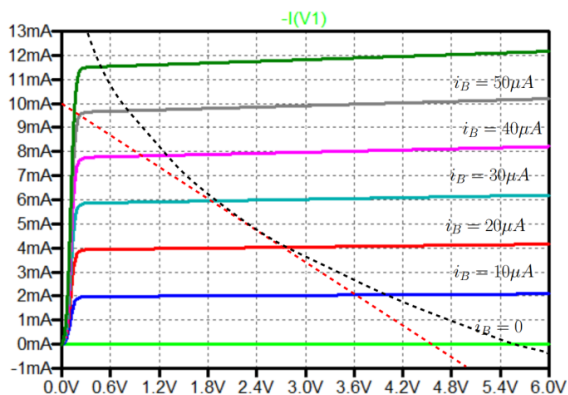
## Transistor switch mode



For  $V_i = 5\text{ V}$  we have

$$R_B = \frac{V_i - V_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0.7}{0.0003} = 14333.3\ \Omega$$

We chose  $R_B = 15\text{ k}\Omega$ .



## Недостатки ключей на БТ

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

- Ограниченное быстродействие, вызванное конечной скоростью рассасывания неосновных носителей в базе;
- Значительная мощность, потребляемая цепями управления в статическом режиме;
- При параллельном включении биполярных транзисторов необходимо применение выравнивающих резисторов в цепях эмиттеров, что приводит к снижению КПД схемы;
- Термическая неустойчивость, определяемая ростом тока коллектора при увеличении температуры транзистора.

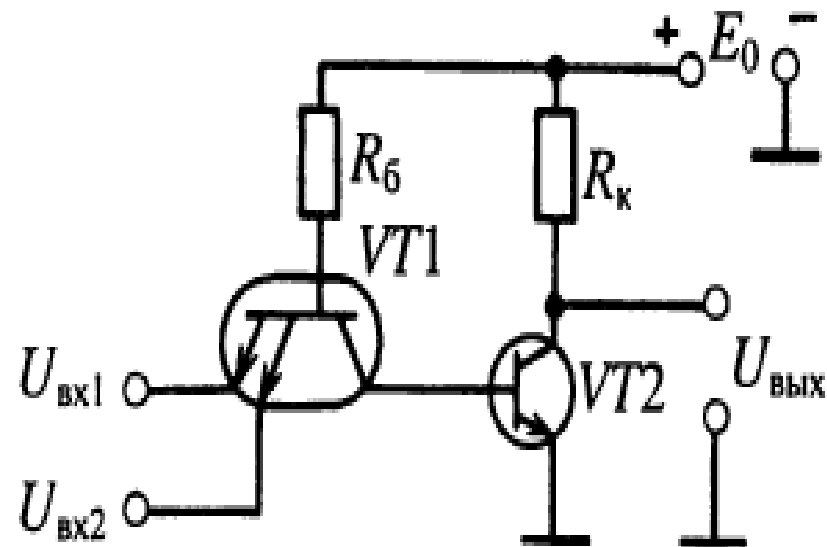
# Разновидности транзисторных ключей

## *Транзисторный ключ в элементах транзистор-транзисторной логики (ТТЛ).*

Простейшая ключевая схема имеет один вход. В общем случае количество входов и выходов может быть больше.

В качестве примера на рисунке приведена схема логического элемента, построенного на основе транзисторного ключа. В состав элемента входит ключевая схема на транзисторе VT2. Управление схемой производится с помощью многоэмиттерного транзистора VT1.

Многоэмиттерный транзистор специально разработан для миниатюрных логических устройств и не имеет дискретного аналога. На его входы (эмиттеры) могут подаваться сигналы высокого (1) или низкого (0) уровня.

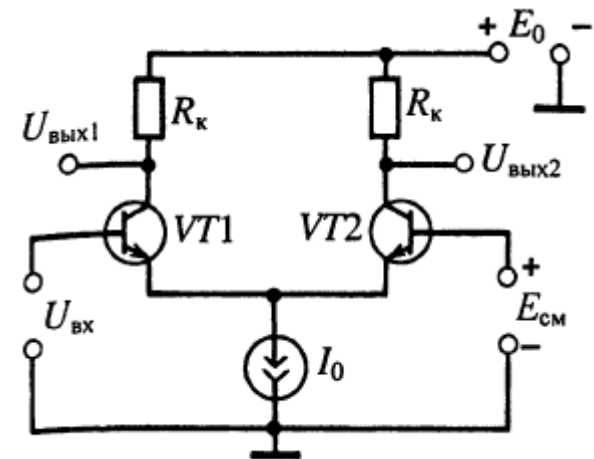


# Разновидности транзисторных ключей

## *Дифференциальный каскад*

В логических элементах цифровой техники находят применение так называемые транзисторные переключатели тока, в которых происходит переключение тока от одной нагрузки к другой. Для этой цели используется дифференциальный каскад (рисунок). Глубокая отрицательная ОС по току в схеме дифференциального каскада обуславливает то обстоятельство, что коллекторный ток каждого из транзисторов не может превысить ток генератора тока в эмиттерной цепи транзисторов. Транзисторы не переходят в режим насыщения и при переключении остаются в активном режиме. Эта особенность в сочетании с хорошими частотными свойствами выбранных транзисторов и самой схемы переключателя тока определяет ее высокое быстродействие.

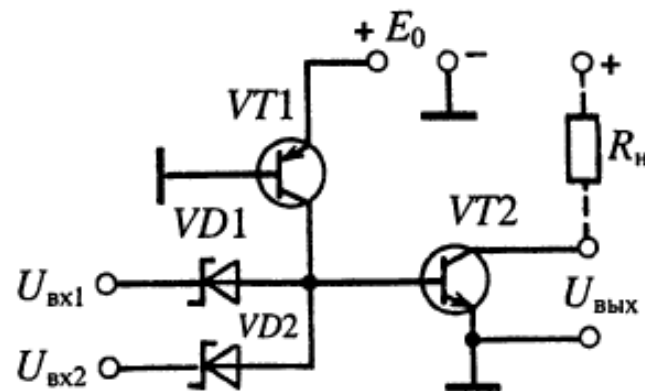
Время переключения таких схем может быть порядка нескольких наносекунд. Связь между транзисторами в переключателе тока осуществляется через генератор тока, включенный в неразветвленную цепь эмиттеров транзисторов. По этой причине логические элементы, построенные на основе транзисторного переключателя тока, называются эмиттерно-связанной логикой (ЭСЛ).



# Разновидности транзисторных ключей

## Транзисторный ключ с инжекционной логикой

Одним из перспективных направлений развития миниатюрных цифровых устройств является построение ключей на основе **инжекционной логики** (рисунок). Функцию ключа выполняет транзистор VT2, нагрузкой которого служит входная цепь следующего за ним устройства. Когда на оба входа поданы сигналы высокого уровня, диоды VD1 и VD2 закрыты, и значение базового тока транзистора VT2 определяется транзистором VT1 p-n-p типа, работающим в режиме источника постоянного тока. Его ток задается таким образом, чтобы транзистор VT2 был открыт. В этом случае выходное напряжение схемы имеет низкий уровень. Чтобы переключить транзистор VT2, необходимо хотя бы на один из входов подать сигнал низкого уровня, чтобы диод, подключенный к этому входу, открылся. При этом ток транзистора VT1 потечет через открытый диод (с барьером Шоттки), на котором будет фиксироваться напряжение меньшего значения, чем требуется для отпирания транзистора VT2 по эмиттерному переходу. Следовательно, транзистор VT2 окажется в режиме отсечки, а его выходное напряжение будет иметь высокий уровень.



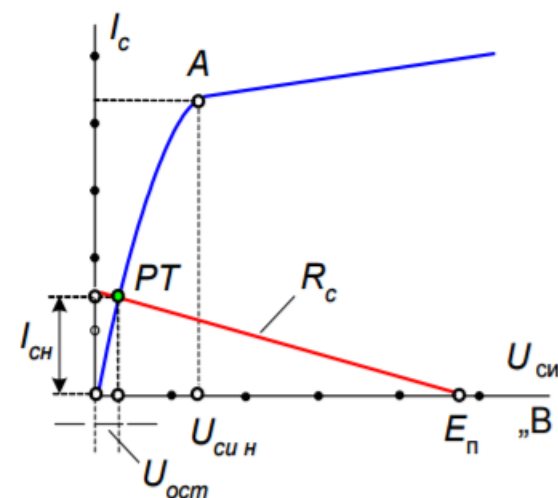
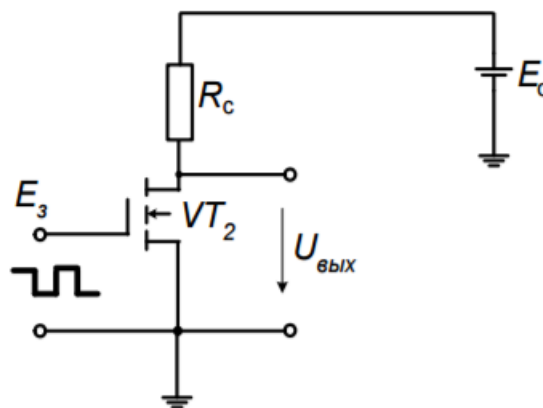
# Разновидности транзисторных ключей

## Ключ на основе полевого транзистора

В схеме в качестве нагрузки используется резистор и она осуществляет логическую функцию инвертирования - высокий логический уровень на входе создает низкий уровень на выходе, и наоборот. Вариант схемы на n-канальном транзисторе включает выход на землю при подаче на затвор высокого уровня.

Если заменить резистор осветительной лампочкой, реле, приводом печатающей головки или какой-то другой мощной нагрузкой, получим схему мощного переключателя.

Отпирание ключа происходит при превышении входного напряжения порогового значения отпирания транзистора  $E_3 > U_{ПОР}$ . Напряжение д.б. таким, чтобы рабочая точка обладала как можно меньшим остаточным напряжением  $U_{ОСТ} = \frac{E_C}{b(E_C - U_{ПОР})R_C}$ , где  $b$  – удельная крутизна транзистора.



# Разновидности транзисторных ключей

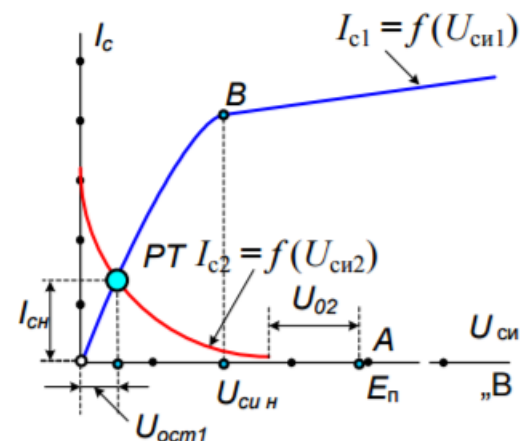
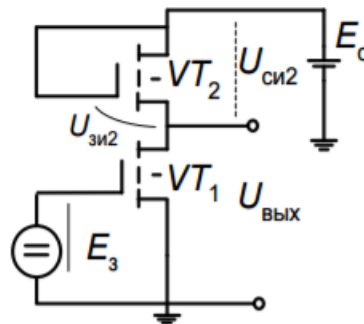
## Ключ на основе полевого транзистора

Одним из основных достоинств полевых транзисторов с изолированным затвором (МДП – транзисторов) по сравнению с биполярными является более высокая технологичность и возможность изготовления на одной подложке большого числа приборов с идентичными параметрами, а также МДП транзисторы имеют очень большое входное сопротивление.

При реализации полевых транзисторов по интегральной технологии (для упрощения технологии), в качестве нагрузки полевого транзистора более выгодно использовать второй МДП-транзистор, у которого затвор и сток замкнуты (рисунок).

Поскольку ВАХ транзистора VT1 нелинейна, то и его сопротивление при переключении изменяется нелинейно.

По этой причине рассматриваемая схема получила название ключа с нелинейной нагрузкой.

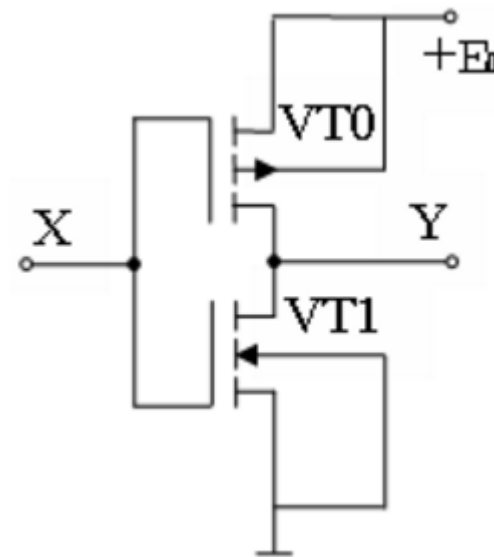




# Разновидности транзисторных ключей

## *Ключ на основе полевого МДП транзистора*

Широкое распространение находят ключи на полевых транзисторах с каналами разного типа проводимости (рисунок), напомним, что транзисторы VT1 и VT2 в данном случае называется комплементарными. В такой схеме коммутируются оба транзистора одновременно, так как затворы их соединены, т.е. на оба затвора поступает управляющий сигнал.

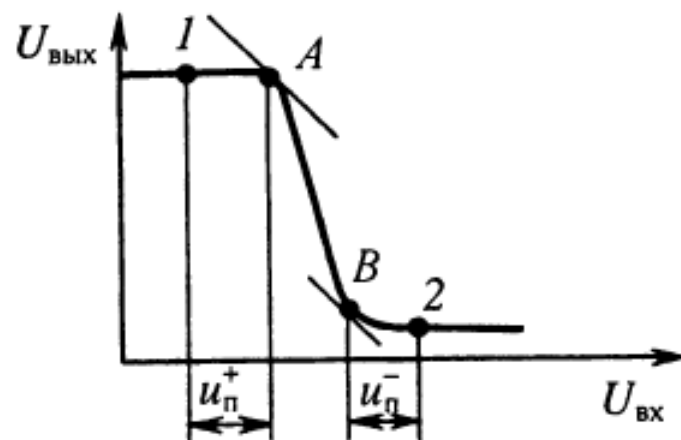


## Помехоустойчивость ключа

Важной характеристикой ключевых схем является их устойчивость к воздействию помех, возникающих при работе устройств цифровой техники за счет наводок напряжений и паразитных связей через общие цепи питания. В цифровой технике часто используется последовательное (цепочное) соединение ключевых схем, при котором возможно усиление помехи в самих ключах, приводящее к ложному срабатыванию. Оценить помехоустойчивость транзисторного ключа можно по его передаточной характеристике (рисунок), представляющей собой зависимость выходного напряжения ключа от напряжения на его входе.

Нечувствительность ключа к паразитным сигналам, могущим вызвать ложное переключение, называют помехозащищенностью или помехоустойчивостью.

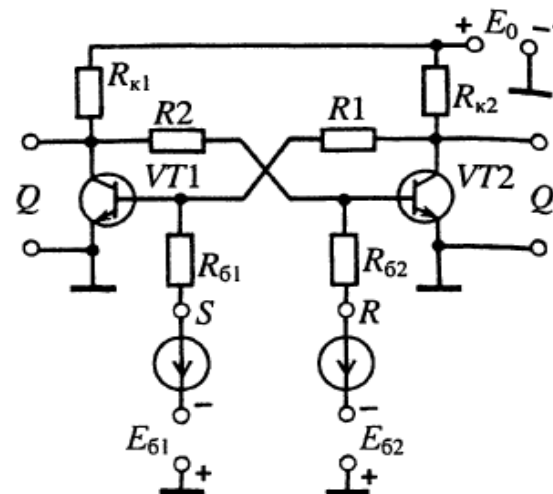
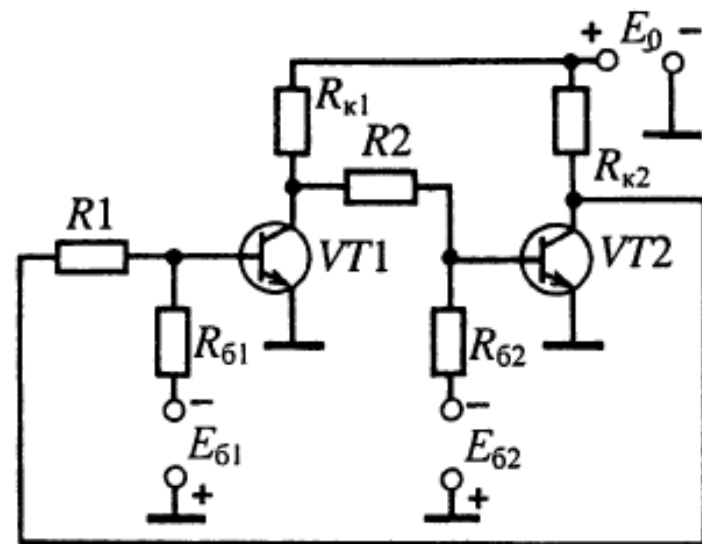
Помехоустойчивость ключа принято измерять абсолютной величиной помехи (в вольтах), не вызывающей ложного переключения ключевой схемы.



## Триггеры

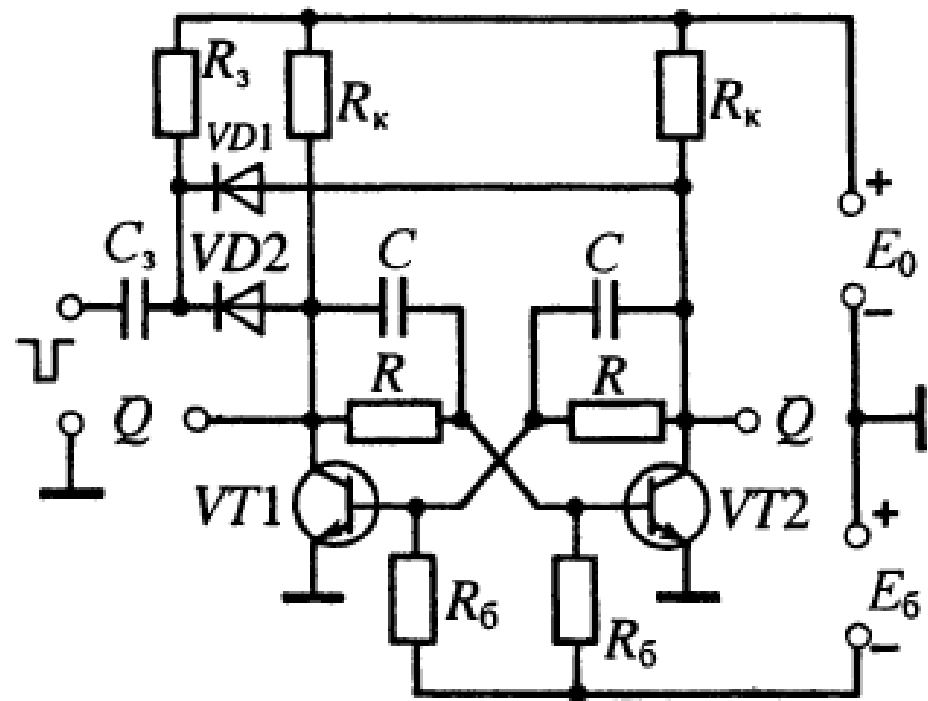
Триггер является бистабильным генератором импульсов прямоугольной формы, имеющим два постоянно устойчивых состояния. Изменение статического состояния триггера происходит под действием внешних запускающих импульсов и сопровождается изменением напряжения на его выходе от некоторого максимального значения до минимального (близкого к нулю). Такие триггеры получили название потенциальных, или статических.

Чаще всего триггеры строятся на основе транзисторов, работающих в ключевом режиме. Если включить последовательно два идентичных ключевых каскада (рисунок верхний) и соединить выход второго каскада (коллектор  $VT2$ ) с входом первого (база  $VT1$ ), т.е. обеспечить в схеме ПОС, то получим схему симметричного триггера. Симметрия схемы будет нагляднее, если ее изобразить в общепринятом виде (рисунок нижний).



## Т-триггер

На рисунке показан вариант симметричного триггера с общим (счетным) запуском (Т-триггер). Запуск производится последовательностью импульсов отрицательной полярности, причем каждый последующий импульс изменяет состояние схемы на противоположное.



## Триггер Шмитта

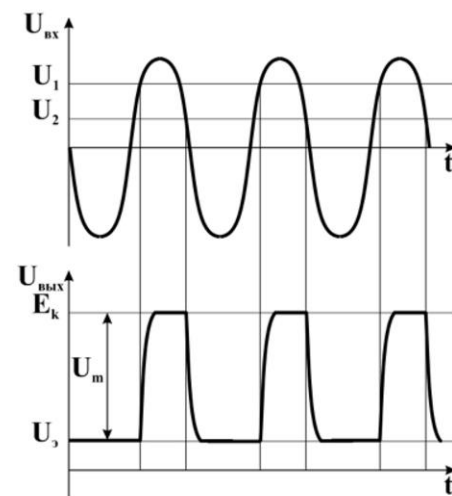
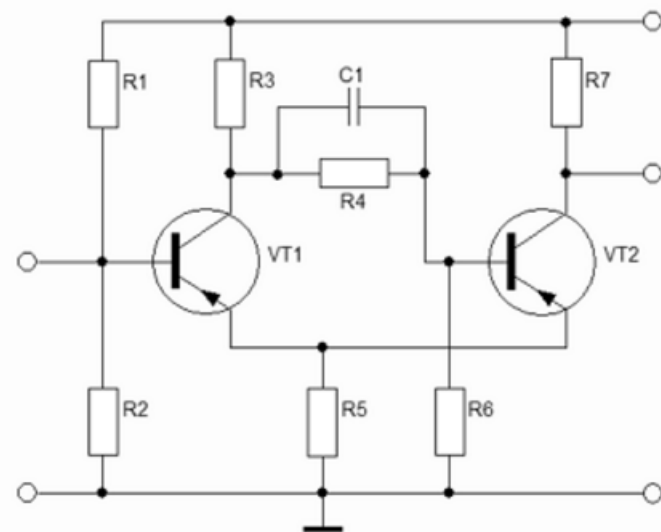
В схеме, приведенной на рисунке, применено дифференциальное включение транзисторов.

### **Принцип работы триггера Шмитта.**

При подключении источника питания к триггеру, он переходит в исходное состояние, при котором транзистор VT1 закрыт, а транзистор VT2 открыт. В этом случае на выходе триггера присутствует некоторое напряжение  $U_2$ , которое зависит от элементов обвязки транзистора VT2.

В случае, когда входное напряжение превысит порог срабатывания, транзистор VT1 откроется, а VT2 соответственно закроется и напряжение на выходе триггера резко возрастёт до значения примерно равному напряжению источника питания.

Триггер Шмитта имеет два уровня напряжения (пороги срабатывания), разность между которыми называется шириной петли гистерезиса. Ширина петли гистерезиса зависит от величины резистора, а порог срабатывания триггера от соотношения делителя напряжения, который образуется резисторами R4 и R6. Вследствие чего большой проблемой является отдельная регулировка, как ширины петли гистерезиса, так и порогов срабатывания триггера.





УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Спасибо за внимание!**

Санкт-Петербург, 2021