

**Общие сведения.** Электронный ключ — это устройство, которое может находиться в одном из двух устойчивых состояний: замкнутом или разомкнутом. Переход из одного состояния в другое в идеальном электронном ключе (рис. 10.1) происходит скачком под влиянием управляющего напряжения или тока.

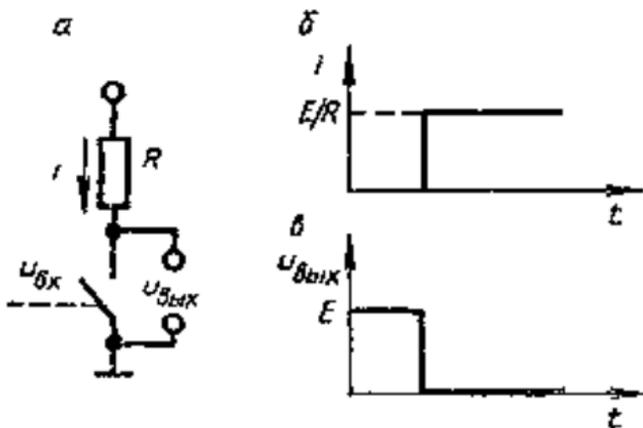


Рис. 10.1. Схема идеального электронного ключа (а) и графики изменений тока (б) и выходного напряжения (в) при переходе ключа из состояния «Выключено» в состояние «Включено»

В реальных электронных ключах переход из открытого состояния в закрытое и наоборот происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. Это время определяется инерционностью активного нелинейного элемента и наличием в ключе паразитных емкостей и индуктивностей. Кроме того, реальные ключи в разомкнутом состоянии имеют конечное сопротивление, вследствие чего у них в состоянии «Выключено» ток  $i \neq 0$  и напряжение  $U_{\text{вых}} < \bar{E}$ . В замкнутом состоянии сопротивление ключа

$R_i$  отлочно от нуля, поэтому в состоянии «Включено»  $i = E/(R + R_i)$  и  $u_{\text{вых}} = iR_i = ER_i/(R + R_i)$ .

Качество ключа тем выше, чем меньше значения тока в закрытом состоянии, напряжения на выходе в открытом состоянии и время переключения из одного состояния в другое.

Основу электронного ключа составляет нелинейный активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор и др.), работающий в ключевом режиме. По типу используемого нелинейного элемента электронные ключи делятся на *диодные*, *транзисторные*, *тиристорные* и т. д.

**Диодные ключи.** Простейшим типом электронных

ключей являются диодные ключи. Их схемы аналогичны схемам диодных ограничителей. В последовательном диод-

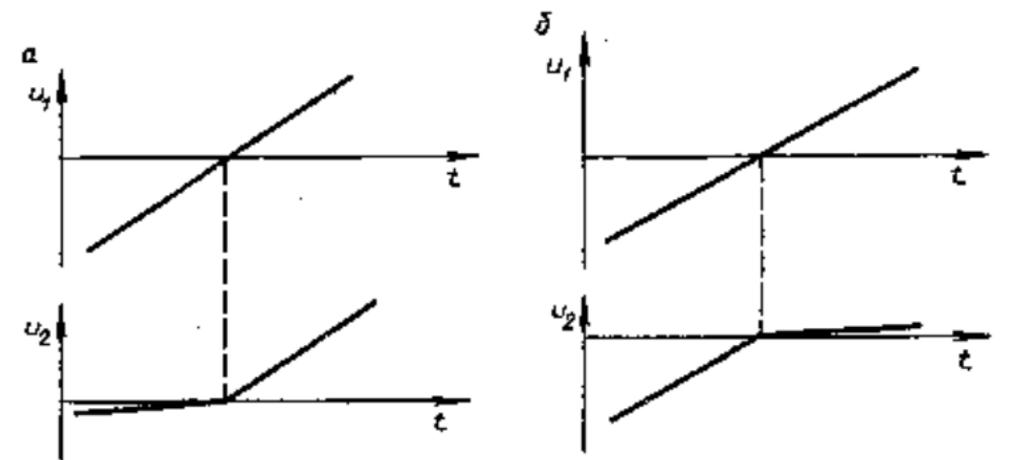


Рис. 10.2. Графики изменений напряжений на входе  $u_1$  и выходе  $u_2$  последовательных диодных ограничителей «снизу» (а) и «сверху» (б)

чения диода (см. рис. 9.12, а), <math>u\_1 < 0</math> диод оказывается закрытым при  $u_1 > 0$ , а при  $u_1 < 0$  он открыт и  $u_2 \approx u_1$  (рис. 10.2, б).

В параллельных диодных ключах (см. рис. 9.14 и рис. 9.15)  $u_2 \approx u_1$  при полярностях напряжения  $u_1$ , соответствующих закрытому состоянию диода, и  $u_2 \approx 0$  при полярностях напряжения  $u_1$ , смещающих диод в прямом направлении.

В современной электронной технике наибольшее применение находят транзисторные ключи.

**Ключи на биполярных транзисторах.** Простейшая схема транзисторного ключа (рис. 10.3, а) подобна схеме транзисторного усилителя, однако она отличается режимом работы транзистора. При работе в ключевом режиме

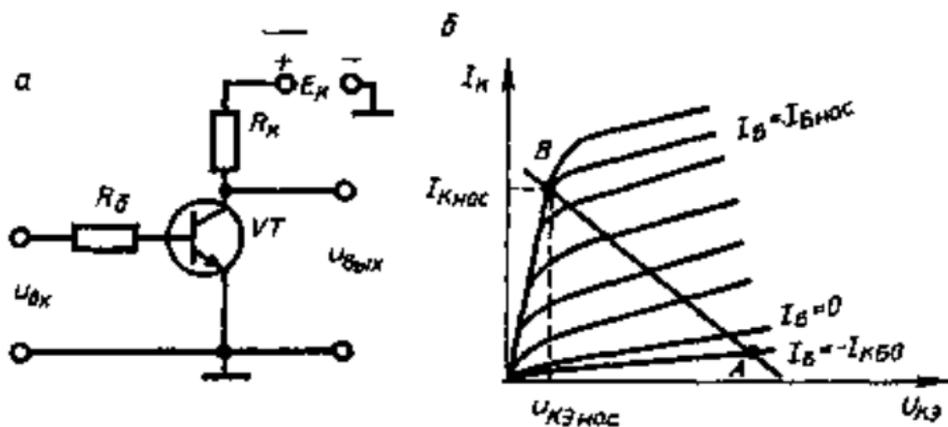


Рис. 10.3. Схемы транзисторного ключа (а) и характеристики (б), иллюстрирующие изменения режима при переходе ключа из закрытого состояния (точка А) в открытое (точка В)

рабочая точка транзистора может находиться только в двух положениях: в области отсечки (транзистор закрыт) и в области насыщения (транзистор открыт и насыщен). Такие ключи называют насыщенными транзисторными ключами. Иногда применяются ключи, в которых рабочая точка при открытом транзисторе находится в активной области (обычно вблизи области насыщения, но не достигает ее). Такие ключи называют ненасыщенными. Чаще применяются транзисторные насыщенные ключи, так как у них в состоянии «Включено» выходное напряжение имеет более низкий уровень и отличается большей стабильностью.

Для обеспечения режима отсечки на вход ключа необходимо подать отрицательное напряжение  $u_{вх} = -E_1$  (или положительное для  $p-n-p$ -транзистора). Через транзистор и резистор  $R_б$  будут протекать обратные токи  $I_{КБ0}$  и  $I_{ЭБ0}$ . Учитывая, что  $I_{ЭБ0} \ll I_{КБ0}$ , можно считать, что через резистор  $R_б$  протекает лишь ток  $I_{КБ0}$ . Напряжение  $I_{КБ0}R_б$  является отпирающим для транзистора, так как плюсом подключается к базе. Чтобы транзистор оставался закрытым, необходимо выполнить условие

$$U_{БЭ} = -E_1 + I_{КБ0}R_б < 0. \quad (10.1)$$

Для надежного запираения транзистора абсолютное значение отрицательного напряжения  $U_{БЭ}$  должно быть

не менее некоторого значения порогового напряжения  $U_{БЭ\text{ пор}}$  и окончательное условие для обеспечения режима отсечки имеет вид

$$-E_1 + I_{КБ0}R_0 \leq -U_{БЭ\text{ пор}}$$

или для абсолютных значений

$$E_1 \geq U_{БЭ\text{ пор}} + I_{КБ0}R_0. \quad (10.2)$$

Режим отсечки характеризуется точкой  $L$  на выходной нагрузочной характеристике (рис. 10.3, б). Выходное напряжение в режиме отсечки

$$U_{\text{вых.отс}} = E_k - I_{КБ0}R_k \approx E_k.$$

Для перехода транзистора в режим насыщения на вход ключа необходимо подать такое положительное напряжение  $E_2$ , при котором в цепи базы создается ток

$$I_B \geq I_{B\text{ нас}},$$

где  $I_{B\text{ нас}}$  — ток базы на границе между активным режимом и режимом насыщения (точка  $B$  на рис. 10.3, б).

Ток коллектора в режиме насыщения

$$I_{K\text{ нас}} = \frac{E_k - U_{КЭ\text{ нас}}}{R_k} \approx \frac{E_k}{R_k}.$$

Так как  $U_{КЭ\text{ нас}} \ll E_k$ , то условием насыщения является

$$I_B \geq I_{B\text{ нас}} = \frac{I_{K\text{ нас}}}{h_{21E}} = \frac{E_k}{R_k h_{21E}}. \quad (10.3)$$

В режиме насыщения коллекторное напряжение  $U_{КЭ\text{ нас}}$  остается положительным по отношению к эмиттеру, но имеет очень малое значение (десятыи доли вольта для германиевых транзисторов и 1...1,5 В для кремниевых). Поэтому напряжение на коллекторном ЭДП оказывается отрицательным:

$$U_{КБ} = U_{КЭ\text{ нас}} - U_{БЭ\text{ нас}} < 0,$$

и он включается в прямом направлении.

Таким образом, чтобы устройство, показанное на рис. 10.3, а, работало в ключевом режиме, на его вход необходимо подавать разнополярные напряжения  $E_1$  и  $E_2$ , при которых выполняются условия (10.2) и (10.3).

Быстродействие электронного ключа зависит от времени включения и выключения.

Время включения определяется временем задержки, обусловленным инерционностью диффузионного движения

неосновных носителей заряда в базе БТ, и временем формирования фронта (временем установления) выходного напряжения. Время выключения складывается из времени рассасывания накопленных в базе неосновных носителей заряда и времени формирования среза выходного напряжения.

Увеличению быстродействия транзисторного ключа способствуют применение высокочастотных транзисторов, увеличение отпирающего и обратного токов базы, а также уменьшение тока базы в режиме насыщения.

Для увеличения отпирающего  $I_{Б1}$  и обратного  $I_{Б2}$  токов используются транзисторные ключи с форсирующим конденсатором  $C_6$ , который подключается параллельно части сопротивления базовой цепи транзистора (рис. 10.4, а). Поэтому при замыкании ключа в момент формирования фронта выходного напряжения ток базы будет протекать только через  $R'_6$  и иметь значение  $I'_{Б1} = E_2/R'_6$ , которое превышает его значение без форсирующего конденсатора, равного  $I''_{Б1} = E_2/(R'_6 + R''_6)$ .

За время формирования фронта конденсатор зарядится очень незначительно, и его зарядка будет продолжаться после окончания формирования фронта выходного импульса. При этом сопротивление конденсатора  $C_6$  будет увеличиваться, а ток базы — уменьшаться.

В момент выключения ключа ток базы  $I'_{Б2}$  будет определяться суммой напряжений  $E_1 + U_{C_6}$  и сопротивлением  $R'_6$ :  $I'_{Б2} = (E_1 + U_{C_6})/R'_6$ , что превышает его значение  $I''_{Б2} = E_1/R'_6$  при отсутствии форсирующего конденсатора. Это приведет к уменьшению времени рассасывания накопленных в базе неосновных носителей заряда.

Для уменьшения тока базы в режиме насыщения применяют ненасыщенные ключи, в которых между базой и коллектором включают диод Шоттки (рис. 10.4, б). Диод Шоттки имеет напряжение отпираения на 0,1...0,2 В меньше, чем напряжение насыщения коллекторного перехода, поэтому он открывается до наступления режима насыщения, и часть тока базы через открытый диод проходит в коллекторную цепь транзистора, предотвращая тем самым накопление в базе заряда неосновных носителей. Ненасыщенные ключи с диодом Шоттки широко применяются в ИМС. Это связано с тем, что изготовление диодов Шоттки на основе транзисторной структуры с помощью интегральной технологии не требует никаких дополнительных операций и не приводит к увеличению площади кристалла, занимаемой элементами ключа.

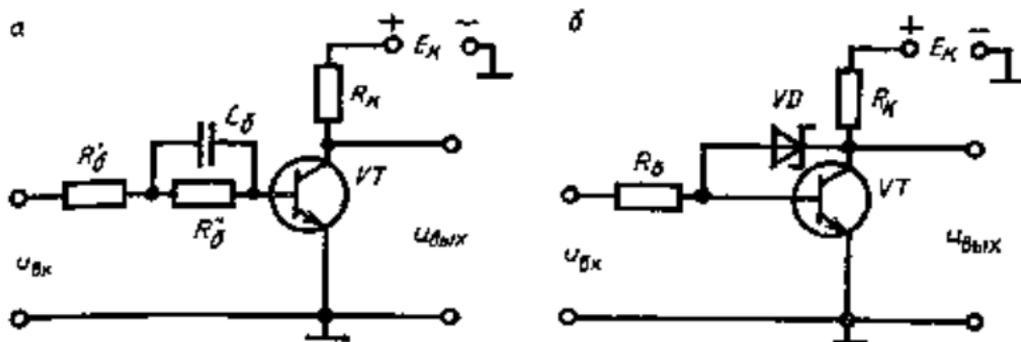


Рис. 10.4. Схемы быстродействующих электронных ключей: а — с форсирующим конденсатором; б — с диодом Шоттки

**Ключи на МДП-транзисторах.** В ключах на полевых транзисторах (рис. 10.5) отсутствует такой недостаток, как накопление и рассасывание неосновных носителей, поэтому время переключения определяется зарядкой и перезарядкой междуэлектродных емкостей. Роль резистора  $R_c$  могут выполнять полевые транзисторы. Это значительно облегчает технологию производства интегральных ключей на полевых транзисторах.

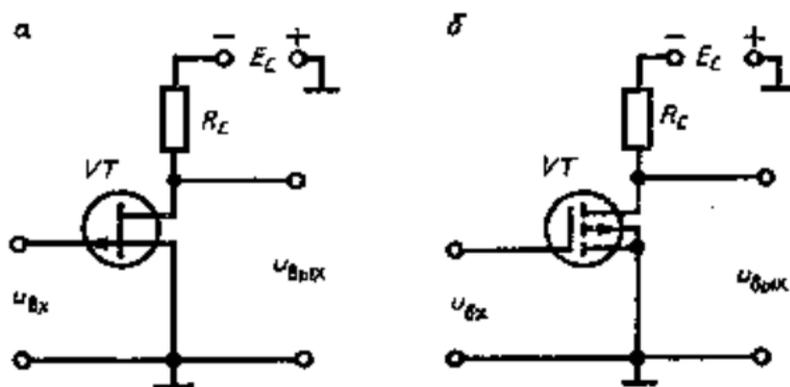


Рис. 10.5. Схемы электронных ключей на ПТ с р — л-затвором (а) и МДП-типа (б)

В ключах на МДП-транзисторах с индуцированным каналом (рис. 10.6) роль резистора  $R_c$  выполняют транзисторы  $VT_1$ , а роль активного элемента — транзисторы  $VT_2$ . Транзисторы  $VT_2$  имеют канал р-типа, а транзисторы  $VT_1$  — канал р-типа (рис. 10.6, а) или n-типа (рис. 10.6, б). Их передаточные характеристики показаны на рис. 10.7, а и 10.7, б соответственно. Графики напряжений, поясняющие работу ключей, представлены на рис. 10.8.

При подаче на вход положительного напряжения  $E_c$  транзисторы  $VT_2$ , имеющие канал р-типа, закрываются.

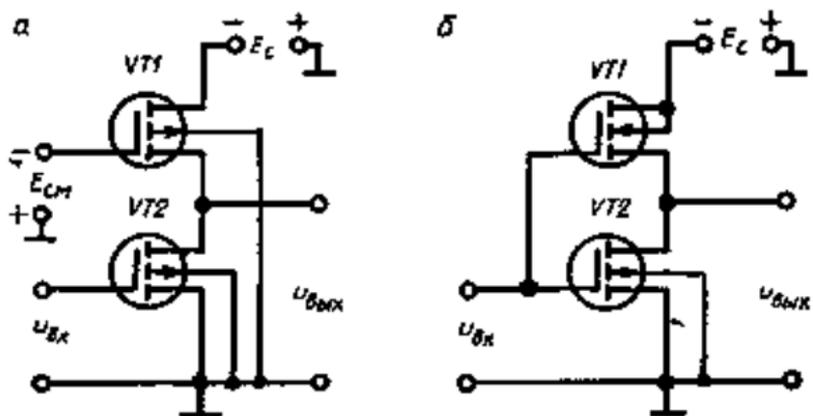


Рис. 10.6. Схемы электронных ключей на МДП-транзисторах с индуцированными каналами одинакового (а) и противоположного (б) типов электропроводности

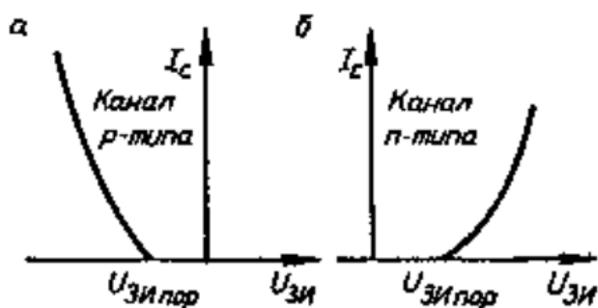


Рис. 10.7. Передаточные характеристики МДП-транзисторов с индуцированными каналами различного типа электропроводности

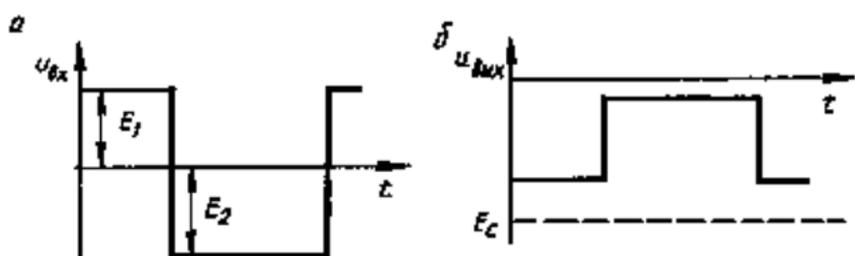


Рис. 10.8. Графики изменений входного (а) и выходного (б) напряжений электронных ключей на МДП-транзисторах

Транзистор  $VT1$  первого ключа (рис. 10.6, а) открыт вследствие поданного на его затвор отрицательного напряжения смещения  $E_{см}$ . Транзистор  $VT1$  второго ключа, имеющий канал n-типа (рис. 10.6, б), также оказывается открытым, так как его затвор соединен со входом, на котором действует положительное напряжение  $E_1 > U_{зи пар}$ . Сопротивления открытых транзисторов  $VT1$

малы по сравнению с сопротивлениями закрытых транзисторов  $VT2$ , и  $u_{вых} \approx -E_c$ .

При поступлении на вход ключей отрицательного напряжения  $-E_2 \ll -U_{зи\text{пор}}$  транзисторы  $VT2$  открываются, а транзисторы  $VT1$  закрываются. Почти все напряжение  $E_c$  падает на большом сопротивлении канала транзистора  $VT1$ , и  $u_{вых} \approx 0$ .