

# Аналоговые коммутаторы

Аналоговый коммутатор служит для переключения непрерывно изменяющихся электрических сигналов. Если коммутатор находится в состоянии "включено", его выходное напряжение должно, по возможности, быть равным входному; если же коммутатор находится в состоянии "выключено", выходное напряжение должно быть как можно ближе к нулю.

## 1. Общие сведения

Существуют различные схемные решения коммутаторов, удовлетворяющие указанным условиям. Их принцип действия показан на рис. 1 на примере механических переключателей.

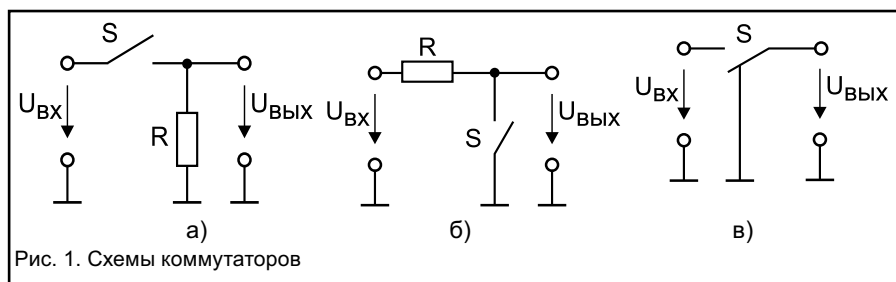


Рис. 1. Схемы коммутаторов

На рис. 1а представлен последовательный коммутатор. Пока контакт замкнут,  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$ . Когда контакт размыкается, выходное напряжение становится равным нулю. Все это справедливо, если источник сигнала имеет нулевое выходное сопротивление, и емкость нагрузки равна нулю. При значительном выходном сопротивлении источника сигнала напряжение  $U_{\text{вых}}$  делится между этим сопротивлением и резистором R. Поэтому данную схему не следует применять в случае, если источник сигнала является источником тока, например, фотодиод. При существенной емкости нагрузки во время разряда этой емкости при размыкании ключа S выходное напряжение коммутатора падает до нуля с задержкой.

В схеме параллельного коммутатора (рис. 1б)  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$  при замкнутом ключе, если входное сопротивление нагрузки коммутатора бесконечно велико. Если же оно соизмеримо с сопротивлением резистора R, то на резисторе будет падать часть выходного напряжения источника сигнала. При наличии емкостной нагрузки выходное напряжение будет устанавливаться после размыкания ключа относительно медленно.

Последовательно-параллельный коммутатор, показанный на рис. 1в, не имеет недостатков двух предыдущих схем. В любом рабочем состоянии он имеет выходное сопротивление, близкое к нулю.

## 2. Электронные коммутаторы

Разновидности аналоговых коммутаторов, показанные на рис. 1, могут быть реализованы на электронных элемен-

тах с управляемым сопротивлением, имеющим малое минимальное и высокое максимальное значения. Для этих целей могут использоваться диодные мосты, биполярные и полевые транзи-

сторы. Вследствие своей неидеальности, они вносят погрешности в обрабатываемые сигналы. Источниками погрешностей электронных аналоговых коммутаторов являются:

- ненулевое проходное сопротивление электронного ключа во включенном состоянии и конечная его величина в выключенном;
- остаточное падение напряжения на замкнутом ключе, т. е. наличие

напряжения на ключе при отсутствии тока через него;

- нелинейная зависимость сопротивления ключа от напряжения (тока) на информационном и управляющем входах;
- взаимодействие управляющего и коммутируемого сигналов;
- ограниченный динамический диапазон (по амплитуде и по знаку) коммутируемых токов и напряжений.

Ключи на биполярных транзисторах и, в особенности, на диодных мостах потребляют значительную мощность по цепям управления и имеют сравнительно большое остаточное напряжение, составляющее единицы милливольт, что вносит заметную погрешность при коммутации слабых сигналов (менее 100 мВ). Такие ключи имеют высокое быстродействие (время переключения диодных ключей, выполненных на диодах Шоттки, достигает 1 нс) и используются для построения сверхскоростных коммутаторов. Более широкое применение нашли коммутаторы на полевых транзисторах.

## 3. Коммутаторы на полевых транзисторах

Как известно, полевой транзистор в области малых напряжений сток-исток ведет себя как резистор, сопротивление которого может изменяться во много раз при изменении управляющего напряжения затвор-исток  $U_{\text{зи}}$ . На рис. 2а изображена упрощенная схема последовательного коммутатора на полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом.

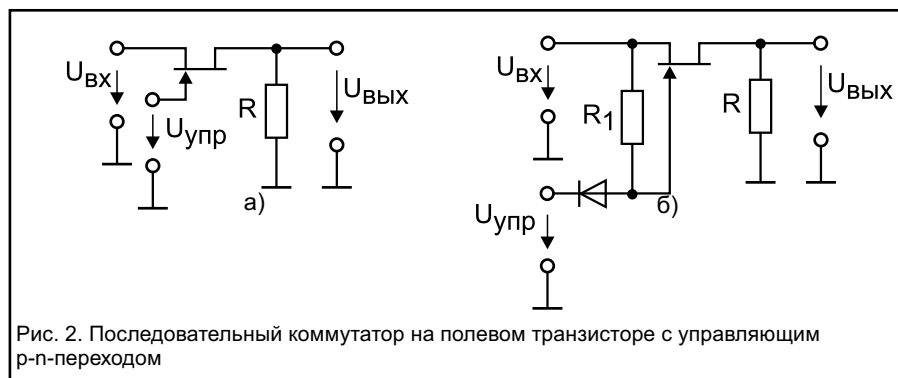


Рис. 2. Последовательный коммутатор на полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом

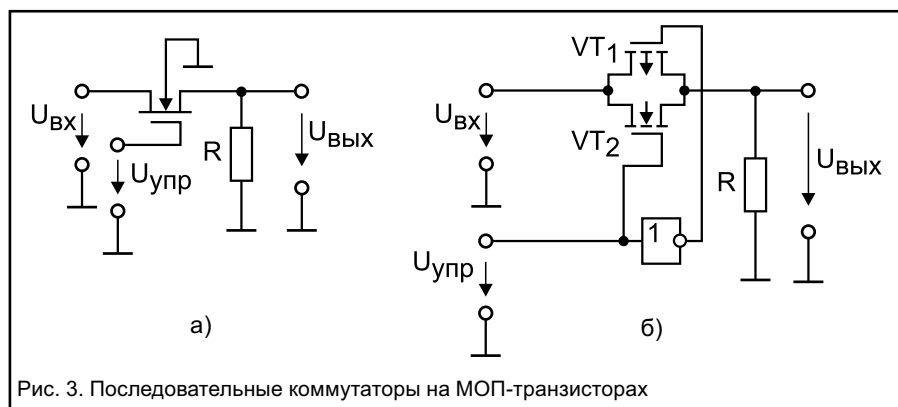


Рис. 3. Последовательные коммутаторы на МОП-транзисторах

Если в этой схеме управляющее напряжение  $U_{упр}$  установить меньшим, чем минимально возможное входное напряжение, по крайней мере, на величину порогового напряжения транзистора – транзистор закроется, и выходное напряжение станет равным нулю. Для того чтобы транзистор был открыт, напряжение затвор-исток  $U_{зи}$  следует поддерживать равным нулю, обеспечивая тем самым минимальное сопротивление канала. Если же это напряжение станет больше нуля, управляющий р-п-переход откроется, и выход коммутатора окажется соединенным с цепью управления. Равенство  $U_{зи}$  нулю не просто реализовать, так как потенциал истока изменяется в соответствии с изменением входного потенциала. Наиболее простой путь преодоления этой трудности показан на рис. 26.

Если напряжение  $U_{упр}$  установить большим, чем максимально возможное входное напряжение коммутатора, диод VD закроется, и напряжение  $U_{зи}$  будет, как это и требуется, равно нулю. При достаточно большом отрицательном управляющем напряжении диод будет открыт, а полевой транзистор закрыт. В таком режиме работы через резистор  $R_1$  течет ток от источника входного сигнала в цепь управляющего сигнала. Это не мешает нормальной работе схемы, так как выходное напряжение коммутатора в этом режиме равно нулю. Нарушение нормального режима работы такой схемы может произойти лишь в случае, если цепь входного сигнала содержит разделительный конденсатор, который при закрытом транзисторе коммутатора заряжается до отрицательного уровня управляющего напряжения.

Проблемы подобного рода не возникают, если в качестве ключа использовать полевой транзистор с изолированным затвором (МОП-транзистор). Его можно переводить в открытое состояние, подавая управляющее напряжение большее, чем максимальное входное положительное напряжение, причем и в таком режиме работы ток затвора будет равен нулю. Таким образом, в этой схеме коммутатора отпадает необходимость в диоде и резисторе  $R_1$ . Схема ключа на МОП-транзисторе приведена на рис. 3а. Здесь ключом является n-канальный МОП-транзистор обогащенного типа, не проводящий ток при  $U_{зи} \leq 0$ . В этом состоянии сопротивление канала, как правило, достигает единиц или даже десятков ГОм, и сигнал не проходит через ключ. Подача на затвор значительного положительного напряжения относительно истока приводит канал в проводящее состояние с сопротивлением от 20 до 200 Ом, типичным для транзисторов, используемых в качестве аналоговых ключей.

Приведенная на рис. 3а схема будет работать при положительных

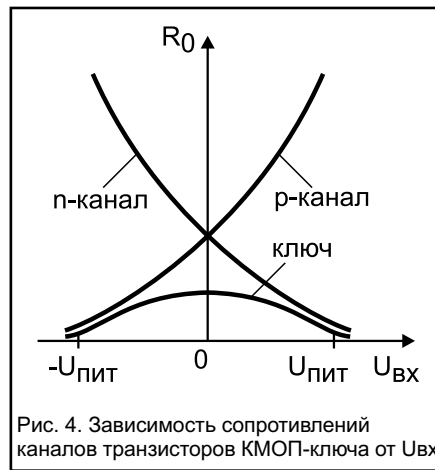


Рис. 4. Зависимость сопротивлений каналов транзисторов КМОП-ключа от  $U_{вх}$

входных сигналах, которые, по крайней мере, на 5 В меньше, чем  $U_{упр}$ . При более высоком уровне сигнала напряжение затвор-исток будет недостаточно, чтобы удержать транзистор в открытом состоянии (сопротивление канала в открытом состоянии  $R_0$  начнет расти); отрицательные входные сигналы вызовут включение транзистора при заземленном затворе. Поэтому, если надо переключать сигналы обеих полярностей (например, в диапазоне от  $-10$  до  $+10$  В), то можно использовать такую же схему, соединив подложку с источником  $-15$  В и подавая на затвор напряжение  $+15$  В (включено) или  $-15$  В (выключено).

Лучшими характеристиками обладают ключи на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП-ключи), показанные на рис. 3б. Здесь на подложку транзистора VT1 подается положительное питающее напряжение  $+U_{пит}$ , а на подложку транзистора VT2 – отрицательное питающее напряжение  $-U_{пит}$ . При высоком уровне управляющего сигнала напряжение на затворе n-канального транзистора VT2 практически равно  $+U_{пит}$ . В таком случае транзистор VT2 проводит сигналы с уровнями от  $-U_{пит}$  до  $+U_{пит}$  без нескольких вольт (при более высоких уровнях сигнала  $R_0$  начинает катастрофически расти). В это время напряжение на затворе VT1 практически

равно  $-U_{пит}$ . Транзистор VT1 пропускает сигналы с уровнями от  $+U_{пит}$  до значения, на несколько вольт выше  $-U_{пит}$ . Таким образом, все сигналы в диапазоне от  $+U_{пит}$  до  $-U_{пит}$  проходят через двухполюсник с малым сопротивлением (рис. 4). При переключении управляющего сигнала на низкий уровень, напряжение на затворе n-канального транзистора VT2 устанавливается близким к  $-U_{пит}$ , а напряжение на затворе p-канального транзистора VT1 устанавливается близким к  $+U_{пит}$ . Тогда при  $U_{пит} < U_{вх} < +U_{пит}$  оба транзистора закрыты, и цепь коммутатора разомкнута. В результате получается аналоговый переключатель для сигналов в диапазоне от низкого до высокого напряжения питания ключа. Эта схема работает в двух направлениях: любой ее зажим может служить входным. Она является основой практически для всех ИМС аналоговых коммутаторов, выпускаемых в настоящее время.

#### 4. Аналоговые мультиплексоры

Хорошим приложением ключей на полевых транзисторах являются мультиплексоры – схемы, которые позволяют выбрать один из нескольких входов по указанию управляющего цифрового сигнала. Такие устройства входят в состав систем сбора данных микропроцессорных регуляторов промышленных и транспортных объектов. Аналоговый сигнал с выбранного входа будет прямо проходить на выход. На рис. 5 в качестве примера показана функциональная схема аналогового мультиплексора из четырех направлений в одно.

Каждый из ключей от S0 до S3 представляет собой аналоговый КМОП-ключ. Дешифратор декодирует адрес, представленный в двоичном коде, и включает только адресованный ключ, блокируя остальные. Вход разрешения E необходим для наращивания числа коммутируемых источников сигналов; если на этот вход поступает сигнал низкого уровня, то независимо от состояния адресных входов все ключи мульт-

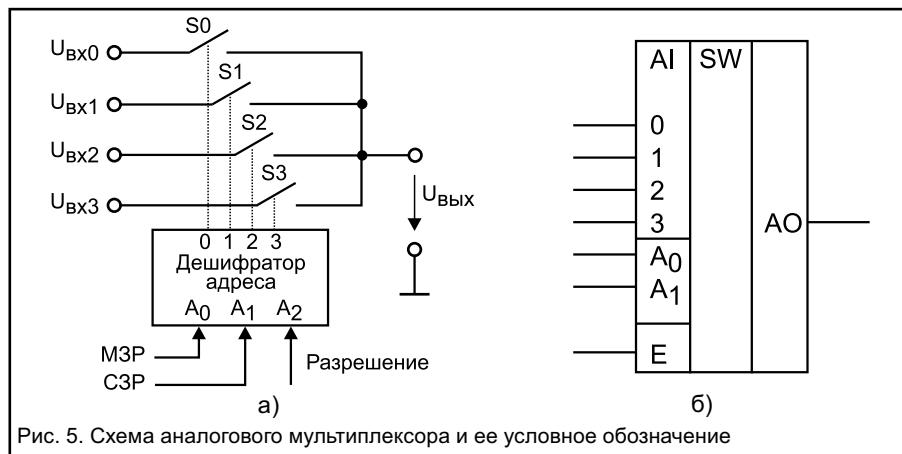


Рис. 5. Схема аналогового мультиплексора и ее условное обозначение

типлектора разомкнуты. Так как аналоговые ключи являются двунаправленными устройствами, аналоговый мультиплексор является одновременно и демультимплексором, т. е. сигнал может быть подан на вход мультиплексора и снят с избранного выхода.

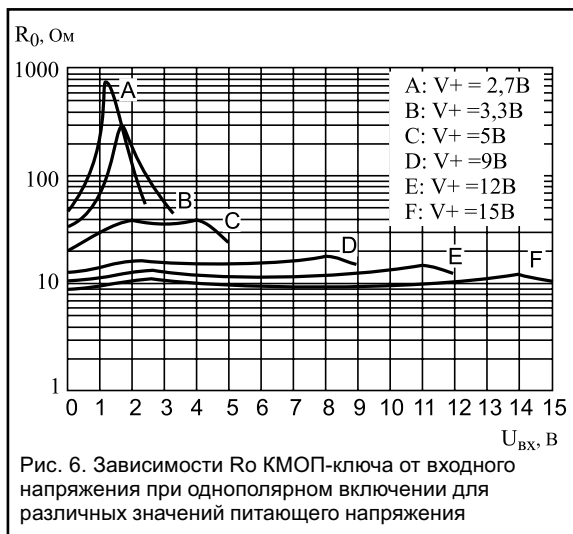
### 5. Характеристики аналоговых коммутаторов

#### 5.1. Статические характеристики

1) Сопротивление в открытом (включенном) состоянии. Ключи КМОП, работающие от относительно высокого напряжения питания (например, ±15 В), будут иметь малые значения  $R_o$  во всем диапазоне значений входного сигнала, так как всегда тот или другой

На рис. 6 приведены зависимости  $R_o$  ключа микросхемы коммутатора MAX312 от напряжения входного сигнала при однополярном питании. При уменьшении  $U_{пит}$  сопротивление полевого транзистора во включенном состоянии значительно увеличивается (особенно вблизи точки  $U_{вх} = U_{пит}/2$ ). Это объясняется тем, что для полевого транзистора обогащенного типа пороговое напряжение составляет несколько вольт, и для достижения малых значений  $R_o$  требуется напряжение затвор-исток не меньше, чем 5...10 В. Как видно из рис. 6, сопротивление открытого ключа, близкое к 10 Ом при номинальном напряжении питания, при  $U_{пит} = 2,7$  В достигает 700 Ом!

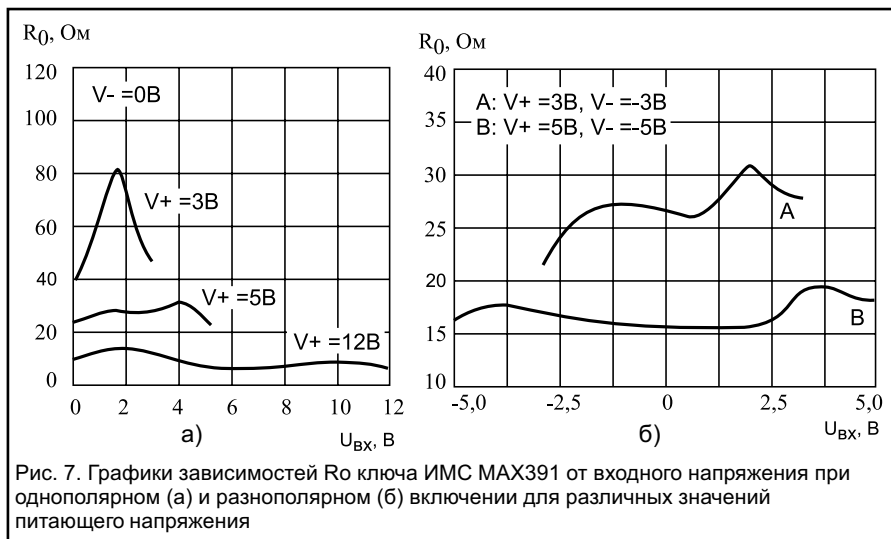
Имеются различные приемы, используемые разработчиками ИМС аналоговых коммутаторов, чтобы сохранить значение  $R_o$  малым и примерно постоянным во всем диапазоне изменения входных сигналов. Это нужно для уменьшения нелинейных искажений входного сигнала. Для этого схему управления ключом выполняют таким образом, чтобы напряжение n-подложки "следило" за напряжением входного сигнала. Применение транзисторов с малым напряжением отсечки и повышенной крутизной позволяет построить коммутаторы с весьма малым  $R_o$  при низком питающем напряжении.



проводящий транзистор будет иметь прямое смещение затвора, равное, по крайней мере, половине напряжения питания. Но при меньшем напряжении питания сопротивление ключа  $R_o$  будет расти, и максимум его достигается при среднем уровне сигнала между высоким и низким напряжениями питания.

На рис. 7 приведены зависимости сопротивления открытого ключа низковольтной микросхемы MAX391 от напряжения входного сигнала для различных питающих напряжений при однополярном (а) и разнополярном (б) питании.

Применение КМОП логики для управления транзисторами ключей дает



еще один важный положительный эффект: в состоянии покоя эти микросхемы практически не потребляют энергии.

2) Ток утечки канала. В закрытом состоянии канал КМОП-ключа обладает очень высоким динамическим сопротивлением (до сотен ГОМ) при напряжении сток-исток более 0,1 В. Поэтому его принимают источником тока с током  $I_{ут}$ . Направление протекания тока утечки через закрытый КМОП-ключ определяется полярностью приложенного напряжения. При очень низких напряжениях на закрытом ключе сопротивление канала уменьшается, но остается все-таки весьма высоким.

#### 5.2. Динамические характеристики

1) Междуэлектродные емкости. МОП-ключи обладают следующими емкостями (рис. 8): между входом и выходом ( $C_{си}$ ), между каналом и общей точкой схемы ( $C_c, C_{и}$ ), между затвором и каналом ( $C_3$ ) и между ключами в пределах одного кристалла. Как правило, наличие этих емкостей ухудшает характеристики ключей.

•  $C_{си}$  (емкость вход-выход). Наличие этой емкости приводит к прохождению сигнала через разомкнутый ключ, причем на высоких частотах этохождение возрастает. На рис. 9 показан этот эффект для микросхемы четырехканального аналогового коммутатора типа MAX312. Здесь кривая 1 представляет собой амплитудно-частотную характеристику последовательного ключа, нагруженного на резистор 50 Ом в замкнутом состоянии. Кривая 2 – фазочастотная характеристика для этого же случая. Кривая 3 представляет амплитудно-частотную характеристику ключа в разомкнутом состоянии при той же нагрузке. Как видно, даже при нагрузке 50 Ом сквозное прохождение сигнала на высоких частотах становится значительным. При нагрузке 10 кОм ситуация со сквозной передачей сигнала, конечно же, намного хуже.

В большинстве низкочастотных применений емкостное сквозное прохождение сигнала через разомкнутый ключ не создает проблем. Если они возникают, хорошим решением является использование пары включенных каскадно ключей (рис. 10а) или, что еще лучше, использование последовательно-параллельного коммутатора (рис. 10б).

Последовательный каскад ценой дополнительного делителя напряжения удваивает ослабление (в децибелах), в то время как последовательно-параллельная схема уменьшает прямое прохождение, снижая эффективное сопротивление нагрузки до  $R_o$ , когда последовательный ключ разом-

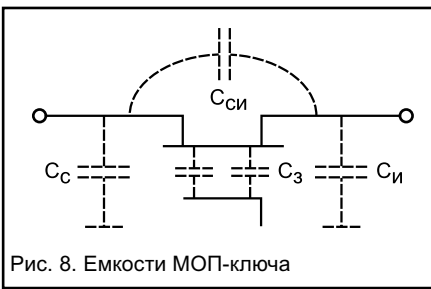


Рис. 8. Емкости МОП-ключа

кнут. Многие фирмы выпускают ИМС аналоговых коммутаторов, содержащие по два нормально замкнутых (т. е. замкнутых при низком уровне управляющего сигнала) и два нормально разомкнутых ключа. Это, например, МАХ314, DG413, 590КН4 и другие. Эти микросхемы позволяют наиболее просто построить последовательно-параллельные коммутаторы.

- $C_c, C_{\text{и}}$  (емкость относительно земли). Шунтирующая на землю емкость приводит к упомянутому ранее спаду частотной характеристики (кривые 1 и 2 на рис. 9). Совместно с сопротивлением источника сигнала и сопротивлением замкнутого ключа  $R_0$ , эти емкости образуют фильтр нижних частот. Ситуация осложняется при высокоомном источнике сигнала.

- Емкость между ключами. Поскольку обычно на кристалле размещается несколько ключей, то не следует удивляться появлению наводок между каналами. Виновницей может быть емкость между каналами, имеющая величину порядка 0,5 пФ. Эффект усиливается по мере роста частоты и увеличения импеданса источника сигнала.

2) Динамические помехи. Во время перехода от включенного состояния к выключенному и обратно в аналоговых ключах на полевых транзисторах могут возникать неприятные эффек-

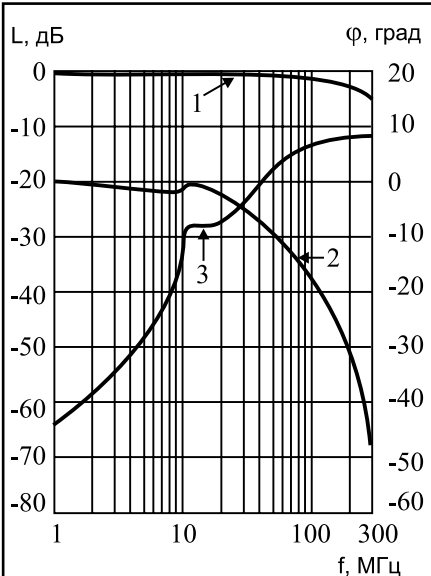


Рис. 9. Частотные характеристики последовательного коммутатора на ИМС МАХ312

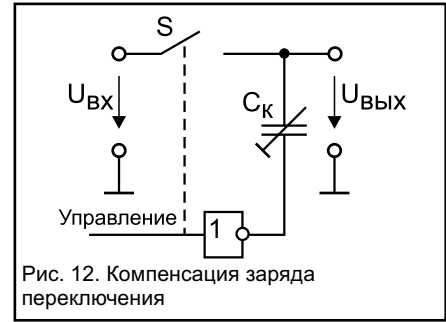


Рис. 12. Компенсация заряда переключения

рез емкость  $C_3$ , имеющую величину порядка 5 пФ (рис. 8), при изменении напряжения затвора. Это напряжение делает резкий скачок от одного уровня питания к другому, перенося заряд  $q = \pm C_3(U_{\text{зи.выс}} - U_{\text{зи.низ}})$ .

Заметим, что величина переносимого заряда зависит только от полного изменения напряжения затвора и не зависит от времени, за которое это изменение происходит. Замедление изменения сигнала на затворе вызывает меньшую по амплитуде, но более долгую динамическую помеху с той же площадью под графиком. Обработка выходного сигнала ключа фильтром нижних частот дает тот же эффект. Такие меры могут помочь в тех случаях, когда важно добиться малого пика амплитуды динамической помехи, однако с точки зрения исключения пропуска управляющего напряжения с затвора на выход они неэффективны. Можно попробовать частично компенсировать заряд переключения путем добавки инвертированного сигнала затвора через компенсирующий подстроечный конденсатор малой емкости  $C_k$  (рис. 12).

Емкость затвор-канал распределена по всей длине канала, а это значит, что часть заряда переключения (помехи) попадает на вход ключа, вызывая переходные процессы на выходе источника сигнала. Эти процессы будут минимальны, если источник сигнала обладает нулевым выходным сопротивлением, т. е. является источником ЭДС. Уменьшение полного сопротивления нагрузки также приводит к снижению динамической помехи, но при этом нагружается источник коммутируемого сигнала, и вносятся дополнительные статическая погрешность и нелинейность за счет конечного и нелинейного  $R_0$ . Уменьшение емкости затвор-канал за счет сокращения размеров интегрального МОП-транзистора уменьшает переходные помехи при переключении коммутатора, но за это приходится платить увеличением  $R_0$ .

На рис. 13 приведены кривые переноса заряда для ключа с управляющим р-п-переходом (рис. 2). Как видно, для такого типа ключа существует сильная зависимость величины динамической помехи от сигнала, поскольку диапазон изменения напряжения затвора пропор-

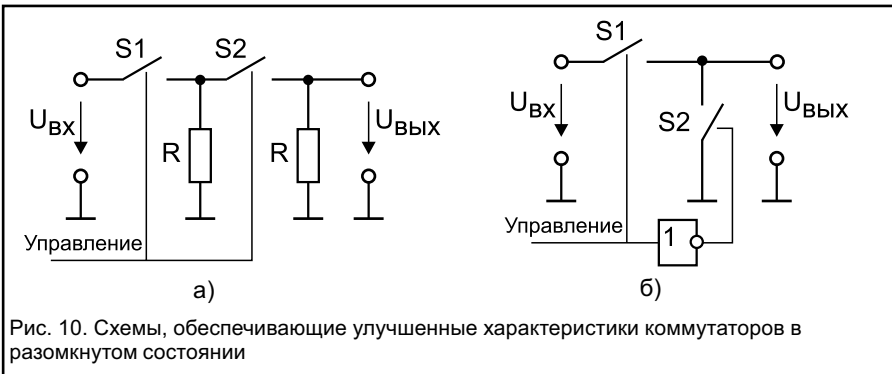


Рис. 10. Схемы, обеспечивающие улучшенные характеристики коммутаторов в разомкнутом состоянии

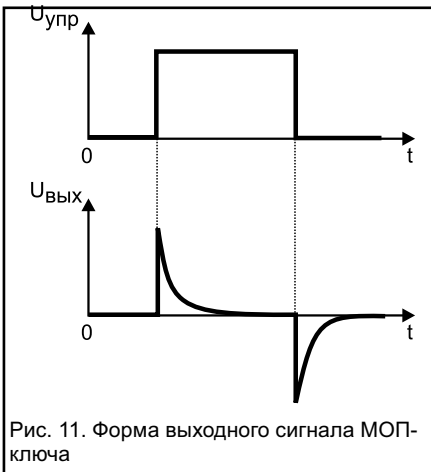


Рис. 11. Форма выходного сигнала МОП-ключа

ты. Скачок управляющего напряжения, поданный на затвор, вызывает изменение заряда в цепи канала. Это наиболее существенно при уровнях сигналов, соответствующих разомкнутому ключу. Подобные эффекты возникают и в мультиплексорах во время изменения адреса канала.

Ввиду важности этой проблемы, рассмотрим ее более подробно. На рис. 11 изображена форма выходного сигнала, которую можно увидеть на выходе п-канального МОП-ключа (рис. 3а) при нулевом уровне входного сигнала и нагрузке, состоящей из резистора сопротивлением 10 кОм и параллельного ему конденсатора емкостью 20 пФ. Эти всплески и провалы вызваны переносом заряда в канал че-

ционален разности между уровнем входного сигнала и уровнем отрицательного напряжения питания. Хорошо сбалансированные КМОП-ключи имеют относительно малую динамическую помеху, поскольку попадающие в канал заряды у комплементарных МОП-транзисторов стремятся скомпенсировать друг друга (когда на одном затворе напряжение растет, на другом – падает). На рис. 14 приведены зависимости заряда переключения от входного напряжения для интегрального КМОП-коммутатора MAX312 при двухполярном питании ±15 В (кривая А) и однополярном +12 В (кривая В). Чтобы дать представление о масштабе этих эффектов, скажем, что заряд 30 пКл создает скачек напряжения в 3 мВ на конденсаторе емкостью 0,01 мкФ. Для многих применений это очень существенная величина.

3) Быстродействие. Ключи на полевых транзисторах имеют сопротивление в открытом состоянии  $R_o$  от 10 Ом до сотен Ом. В комбинации с емкостью подложки и паразитными емкостями, это сопротивление образует фильтр нижних частот, ограничивающий область частот пропускаемых сигналов значениями порядка 10 МГц и даже ниже. Полевые транзисторы с

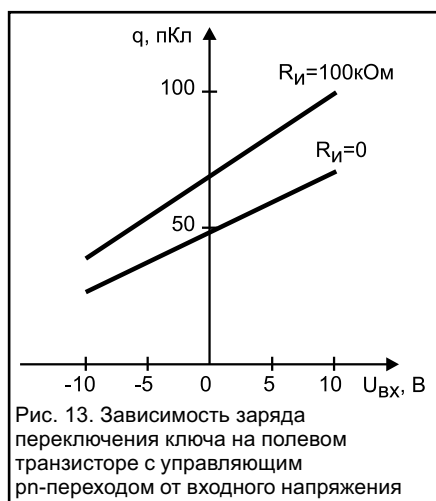


Рис. 13. Зависимость заряда переключения ключа на полевом транзисторе с управляющим рп-переходом от входного напряжения

меньшим  $R_o$  имеют обычно большую емкость, так что выигрыша в скорости нарастания выходного сигнала они не дают. Значительная доля ограничения частотной характеристики вызвана элементами защиты – последовательными токоограничивающими резисторами и шунтирующими диодами, применяемыми почти во всех КМОП-схемах. Специальные высокоскоростные коммутаторы, например MAX453 фирмы Maxim, имеют типичную полосу пропускания до 50 МГц и предназначены для передачи сигналов видеочастоты с амплитудой ±1 В от низкоомных источников (обычно 75 Ом) на согласованную нагрузку.

4) Время переключения. Длительность переходного процесса включения и выключения ( $t_{вкл}$  и  $t_{выкл}$ ) коммутатора на МОП-транзисторах определяется временем перезаряда емкости затвор-канал. Уменьшение этой емкости связано с возрастанием  $R_o$ , поэтому обычно повышения скорости переключения добиваются снижением выходного сопротивления цепей, осуществляющих управление напряжением на затворе коммутирующего МОП-транзистора. При этом возрастает ток, потребляемый схемой от источника питания. Характерная величина времени переключения для КМОП-коммутаторов составляет около 0,2 мкс при токе потребления в статическом состоянии менее 1 мкА.



Рис. 14. Зависимость заряда переключения от входного напряжения для интегрального коммутатора MAX312

### 5.3. Эксплуатационные параметры

К эксплуатационным параметрам относятся:

- номинальные значения питающих напряжений;
- ток потребления;
- максимально допустимое значение тока через коммутатор;
- диапазон допустимых значений входного (выходного) напряжения;
- уровни (высокий и низкий) напряжения управления (обычно согласованы с уровнями 0 и 1 ТТЛ и КМОП цифровых микросхем, для чего ИМС аналоговых коммутаторов содержат порой довольно сложные схемы управления собственно ключами).

В таблице 1 приведены основные характеристики некоторых типов аналоговых коммутаторов и мультиплексоров.

Георгий Волович,  
g\_volovich@mail.ru

Продолжение следует

Таблица 1

Наименование коммутатора	Напряжение питания, В	Ток потр. мкА	Ток утечки, нА	$R_o$ , Ом	Время вкл., нс	Время выкл., нс	Заряд перекл., пКл	Макс. вых. ток, мА	Примечание
Коммутаторы									
DG411	4,5...20 10...30	1	0,25	35	175	145	10	30	Счетверенный коммутатор.
MAX391	2,7...8 3...15	<1	0,1	35	130	75	5	30	То же
HI-201HS	5...20 12...20	4000	1	50	30	40	10	20	Быстродействующий
MAX326	4,5...18 10...30	100	0,01	2500	1000	1000	1	20	Минимальный заряд переключения
590KH13	15	4000	50	50	50	50	–	20	Счетверенный коммутатор
Мультиплексоры									
590KH6	15	–	70	300	300	300	–	20	1x8
591KH3	15	1000	70	270	300	300	–	20	1x16
DG528	4,5...20 5...30	2500	1	450	1000	1000	4	20	1x8; Регистр-защелка
MAX350	2,7...8 3...15	7	0,1	100	275	150	10	30	Сдвоенный 1x4; Последовательный интерфейс