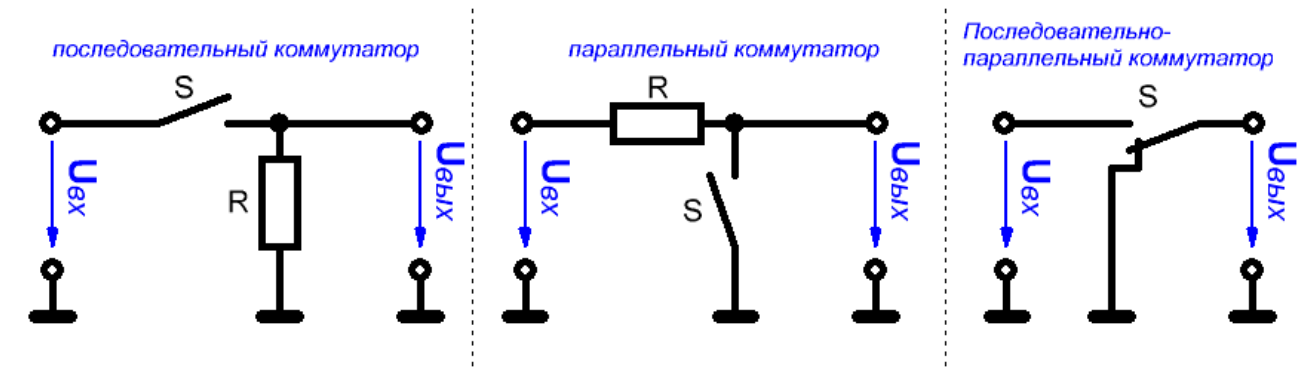


Аналоговые коммутаторы

Аналоговый коммутатор служит для переключения непрерывно изменяющихся электрических сигналов. Если коммутатор находится в состоянии "включено", его выходное напряжение должно по возможности точно равняться входному; если же коммутатор находится в состоянии "выключено", выходное напряжение должно быть как можно ближе к нулю или, во всяком случае, должно как можно меньше зависеть от входного.

Существуют различные схемные решения коммутаторов. Их принцип действия показан на рис. на примере механических (контактных) переключателей.



Последовательный коммутатор. Пока контакт замкнут, $U_{вых}=U_{вх}$. 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 $U_{вых}$ делится между этим сопротивлением и резистором R . Поэтому эту схему не следует применять в случае, если источником сигнала является источник тока, например, фотодиод. При существенной емкости нагрузки, во время разряда этой емкости при размыкании ключа S выходное напряжение коммутатора снижается до нуля довольно долго.

В схеме параллельного коммутатора $U_{вых}=U_{вх}$ при разомкнутом 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 будет относительно медленно устанавливаться выходное напряжение после размыкания ключа.

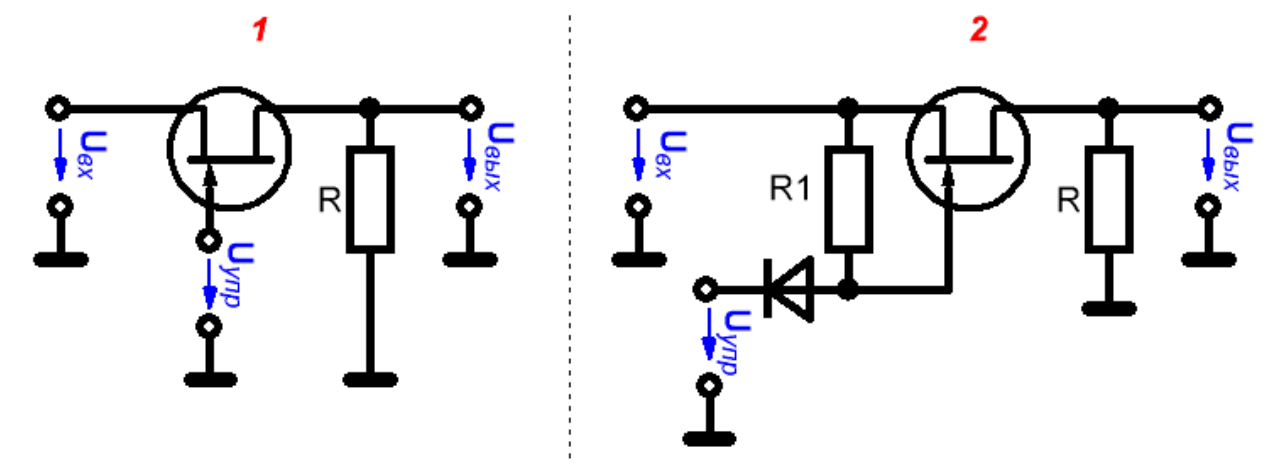
Последовательно-параллельный коммутатор не имеет недостатков двух предыдущих схем. В любом рабочем состоянии он имеет выходное сопротивление, близкое к 0.

Разновидности аналоговых коммутаторов могут быть реализованы на электронных элементах с управляемым сопротивлением, имеющим малое минимальное и высокое максимальное значения. Для этих целей могут использоваться диодные мосты, биполярные и полевые транзисторы. Вследствие 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 через него тока;
- 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 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 и применяются для построения сверхскоростных коммутаторов. Более широкое применение нашли коммутаторы на полевых транзисторах.

В области малых напряжений сопротивление перехода сток-исток может изменяться во много раз при изменении управляющего напряжения затвор-исток U_{zu} . Упрощенная схема последовательного коммутатора на полевом транзисторе с управляющим рп-переходом.

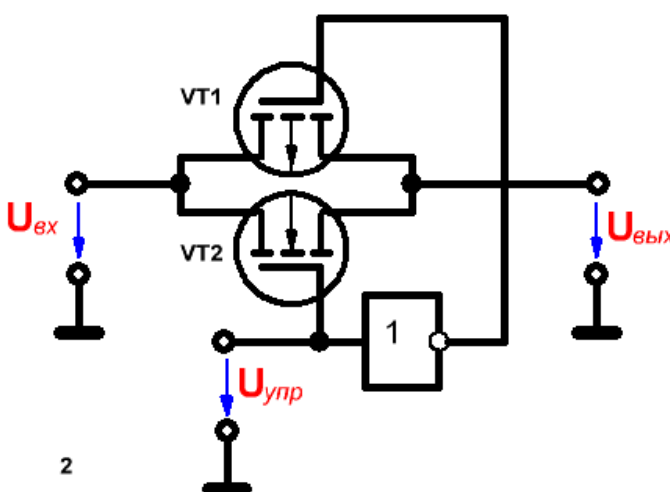
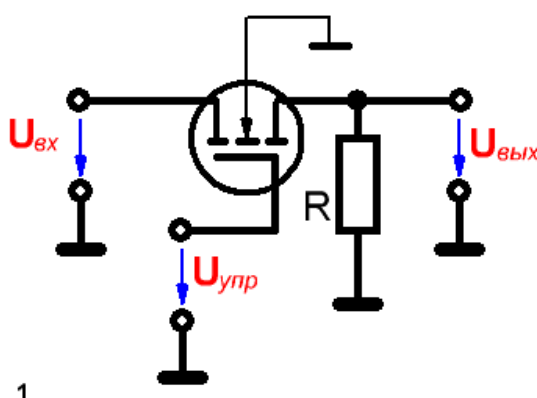


Если напряжение $U_{упр}$ установить на величину меньшую порогового напряжения транзистора (меньшую, чем минимально-возможное входное напряжение), транзистор закроется и выходное напряжение будет равным 0. Для того, чтобы транзистор был открыт, напряжение затвор-исток U_{zu} следует поддерживать равным нулю, что обеспечивает минимальное сопротивление канала. Если это напряжение станет больше нуля, откроется управляющий рп-переход, и выход коммутатора окажется соединенным с цепью управления. Равенство нулю U_{zu} сложно реализовать, так как потенциал истока изменяется согласно изменению входного потенциала. Наиболее простой путь преодоления этой трудности показан на рис.2

Если напряжение $U_{упр}$ установить большим, чем максимально-возможное входное напряжение коммутатора, диод закроется и напряжение U_{zu} будет равно 0. При достаточно большом отрицательном управляющем напряжении диод будет открыт, а полевой транзистор закрыт. В таком режиме работы через резистор R1 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 зарядится до отрицательного уровня управляющего напряжения.

Если в качестве ключа использовать полевой транзистор с изолированным затвором, 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. В этой схеме коммутатора отпадает необходимость в диоде и резисторе R1.

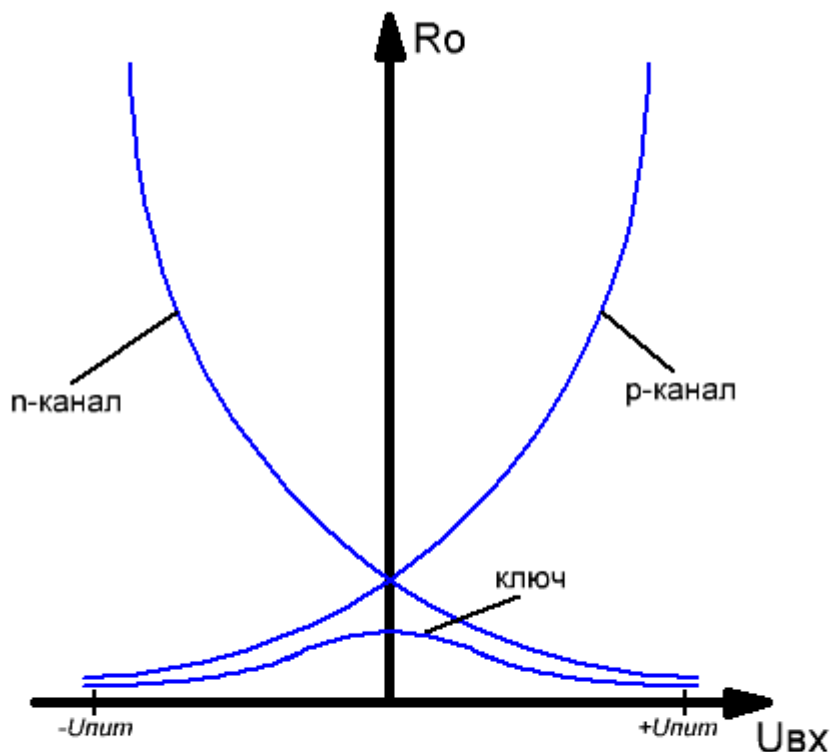
п-канальный МОП-транзистор обогащенного типа не проводящий ток при $U_{зи} \leq 0$.



В закрытом состоянии сопротивление канала очень большое, и сигнал через ключ не проходит. При подаче на затвор относительно истока значительного положительного напряжения канал переходит в проводящее состояние с сопротивлением от 10 до 200 Ом, типичным для транзисторов, используемых в качестве аналоговых ключей.

Схема 1 будет работать при положительных входных сигналах, которые по крайней мере на 5 В меньше, чем $U_{упр}$. При более высоком уровне сигнала напряжения затвор-исток будет недостаточно, чтобы удержать транзистор в открытом состоянии (сопротивление канала в открытом состоянии начнет расти). А 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 эту же схему, соединив подложку с источником -15 В и подавая на затвор напряжения +15 В (включено) и -15 В (выключено).

Лучшими характеристиками обладают ключи на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП-ключи), рис. 2. 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 сопротивление канала R_o 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



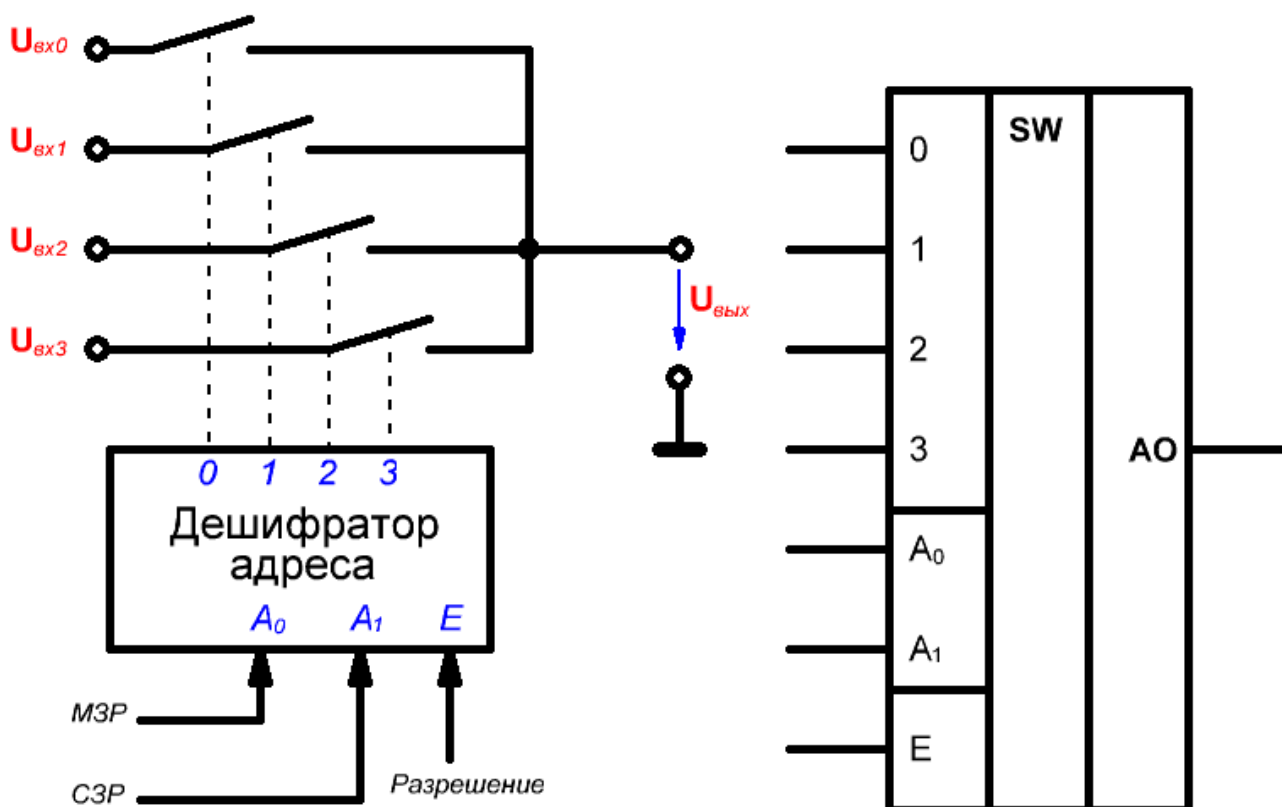
Зависимость сопротивлений каналов транзисторов КМОП-ключа от $U_{вх}$.

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 заперты, и цепь коммутатора разомкнута. В результате получается аналоговый переключатель для сигналов в диапазоне от низкого напряжения питания ключа до высокого напряжения его питания. 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.

Мультиплексоры - схемы, которые позволяют выбрать один из нескольких входов по указанию управляющего цифрового сигнала. 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 мультиплексора разомкнуты. Так как аналоговые ключи являются двунаправленными устройствами, аналоговый мультиплексор является одновременно

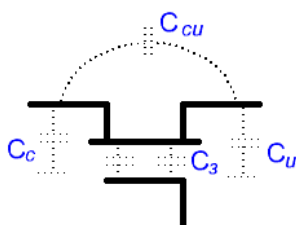
и "демультиплексором", т.е. сигнал может быть подан на выход мультиплексора и снят с избранного входа.



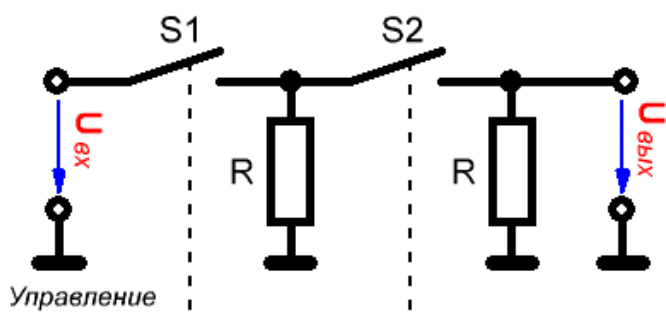
Ключи КМОП, работающие от относительно высокого напряжения питания (например, +15 В), будут иметь малые значения R_0 во всем диапазоне значений входного сигнала, так как всегда тот или другой проводящий транзистор будет иметь прямое смещение затвора, равное, по крайней мере, половине напряжения питания. Но при меньшем напряжении питания сопротивление ключа R_0 будет расти, и максимум его имеет место при среднем уровне сигнала между высоким и низким напряжениями питания $U_{вх} = U_{пит}/2$. Это объясняется тем, что для полевого транзистора обогащенного типа пороговое напряжение составляет несколько вольт, и для достижения малых значений R_0 требуется напряжение затвор-исток не меньше, чем 5...10 В. Имеются различные приемы, которые разработчики ИМС аналоговых коммутаторов применяют, чтобы сохранить значение R_0 малым и примерно постоянным во всем диапазоне изменения входных сигналов. Это нужно для уменьшения нелинейных искажений входного сигнала. Применение транзисторов с малым напряжением отсечки и повышенной крутизной позволяет построить коммутаторы с весьма малым R_0 при низком питающем напряжении. Применение КМОП логики для управления транзисторами ключей дает еще один важный положительный эффект - в покое эти микросхемы практически не потребляют энергии. В закрытом состоянии канал МОП-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_{ym} . Направление протекания тока утечки через закрытый КМОП-ключ определяется полярностью приложенного напряжения. Типичное значение I_{ym} для широкой номенклатуры аналоговых ключей и мультиплексоров составляет величину порядка 1 нА. Однако выпускаются и ключи с пониженным током утечки.

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

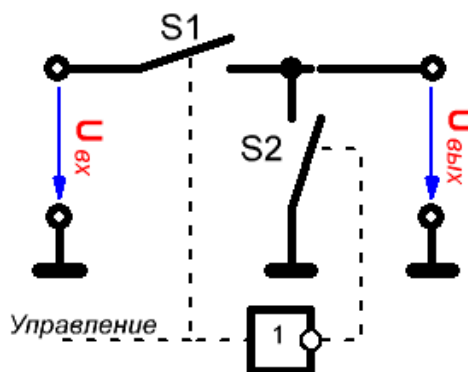
C_{cu} (емкость вход-выход). Наличие этой емкости приводит к прохождению сигнала через разомкнутый ключ, которое возрастает на высоких частотах. В большинстве случаев на низких частотах емкостное сквозное прохождение сигнала через разомкнутый ключ не



создает проблем. Если они возникают, хорошим решением является использование пары последовательных каскадно-включенных ключей, или использование *последовательно-параллельного* коммутатора. *Последовательный каскад* удваивает ослабление (в децибелах) ценой дополнительного делителя напряжения, в то время как *последовательно-параллельная* схема уменьшает прямое прохождение, снижая эффективное сопротивление нагрузки до R_o , когда последовательный ключ разомкнут.



Последовательный каскадно-включенный ключ



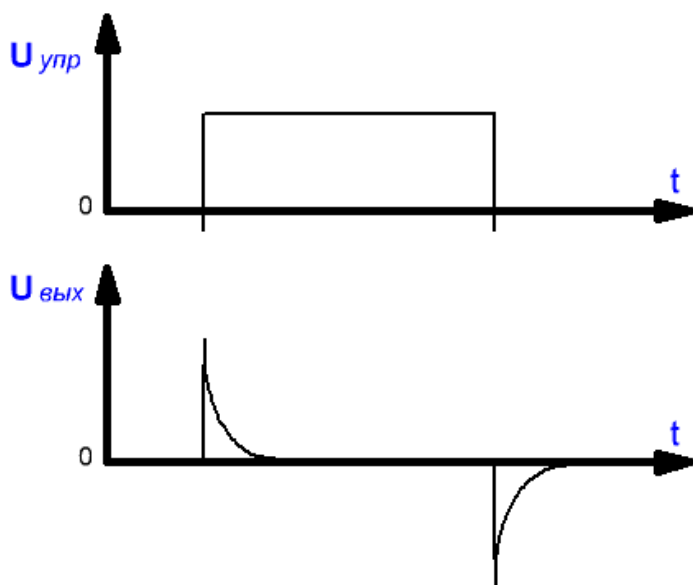
Последовательно-параллельный коммутатор

Многие производители ИМС выпускают аналоговые коммутаторы, содержащие по два нормально-замкнутых и два нормально-разомкнутых ключа. Эти микросхемы позволяют наиболее просто построить *последовательно-параллельные* коммутаторы.

C_s, C_u (емкость относительно земли). Шунтирующая на землю емкость приводит к спаду частотной характеристики. Совместно с сопротивлением источника сигнала и сопротивлением замкнутого ключа R_o эти емкости образуют фильтр нижних частот. Ситуация ухудшается при высокоомном источнике сигнала.

Емкость между ключами. Поскольку обычно на кристалле размещается несколько ключей, то могут появляться наводки между каналами. Причиной может быть емкость между каналами. Эффект усиливается по мере роста частоты и увеличения сопротивления источника сигнала.

Динамические помехи. Во время перехода от включенного состояния к выключенному и обратно, 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.

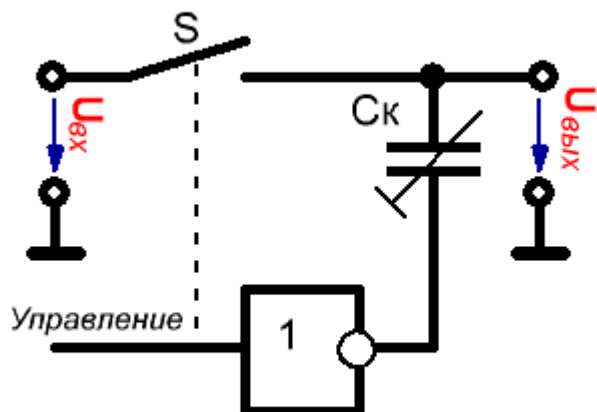


Форма выходного сигнала, на выходе n-канального МОП-ключа, при нулевом уровне входного сигнала и нагрузке, состоящей из резистора сопротивлением 10 кОм и параллельного ему конденсатора с емкостью 20 пФ. Эти всплески и провалы вызваны переносом заряда в канал через емкость C_3 , имеющую величину порядка 5 пФ, при изменении напряжения затвора. Это напряжение делает резкий скачок от одного уровня питания к другому, перенося заряд $q = +C_3(U_{3и.выс} - U_{3и.низ})$.

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. Фильтрация 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 в смысле исключения

пропускания 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 .



Компенсация заряда переключения

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 **э.д.с.**

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_o . Уменьшение емкости затвор-канал за счет сокращения размеров интегрального МОП-транзистора уменьшает переходные помехи при переключении коммутатора, но при этом увеличивается R_o .

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 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, имеют типичную полосу пропускания до 50 МГц и предназначены для передачи сигналов видеочастоты амплитудой ± 1 В от низкоомных источников (обычно 75 Ом) на согласованную нагрузку.

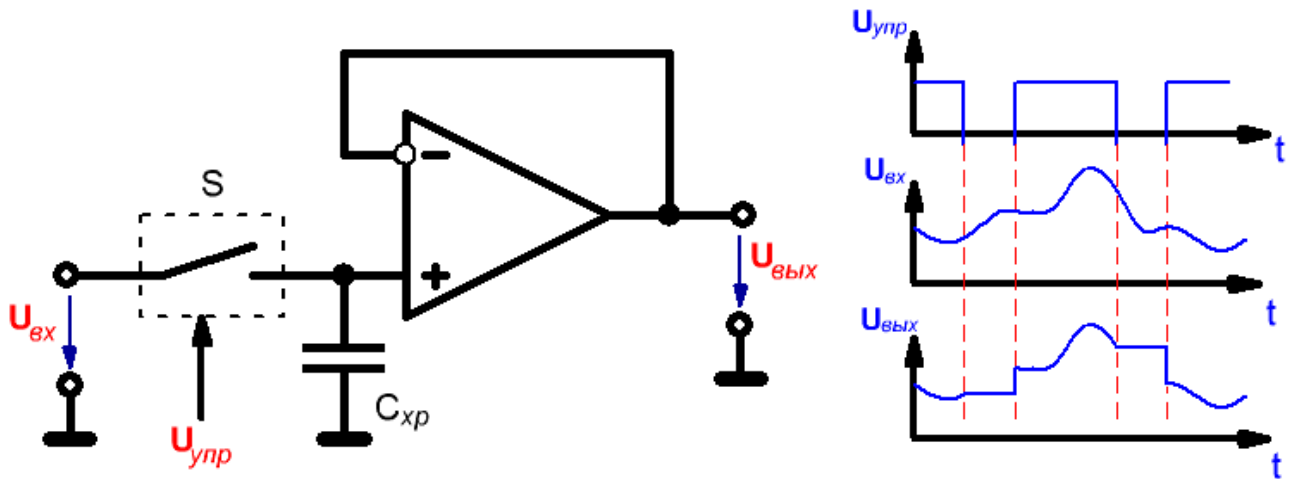
Время переключения. Длительность переходного процесса включения и выключения ($t_{вкл}$ и $t_{выкл}$) коммутатора на МОП-транзисторах определяется временем перезаряда емкости затвор-канал. Уменьшение этой емкости связано с возрастанием R_o , поэтому обычно повышения скорости переключения добиваются снижением 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.

К эксплуатационным параметрам относятся:

- номинальные значения питающих напряжений; В
- ток потребления; мкА
- ток утечки; нА
- максимально допустимое значение тока через коммутатор; мА
- сопротивление в открытом состоянии R_o ; Ом
- время включения/выключения; нс
- диапазон допустимых значений входного (выходного) напряжения; В
- 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 ключами). В

Устройства выборки - хранения

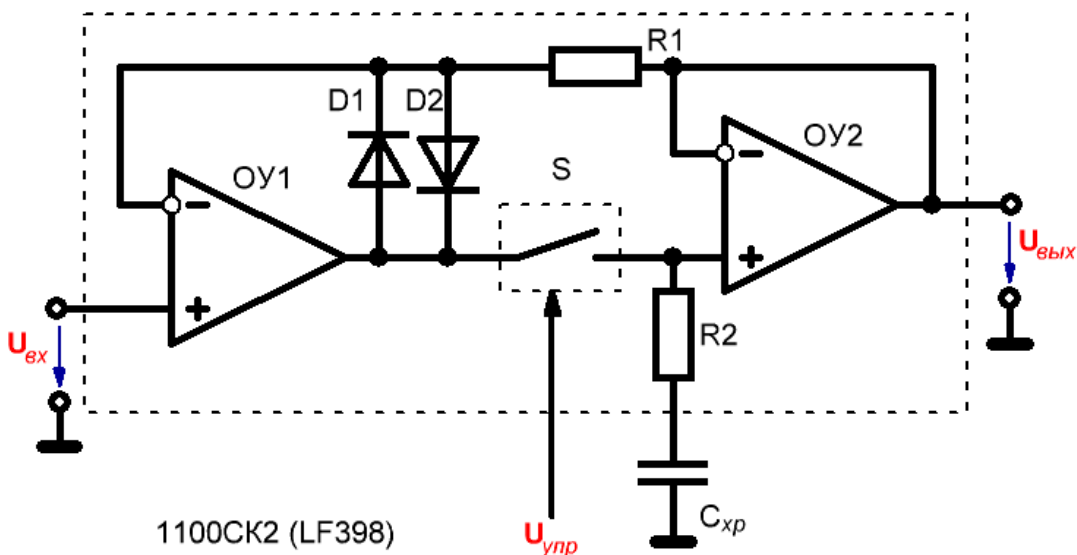
При сборе информации и ее последующем преобразовании часто бывает необходимо зафиксировать значение аналогового сигнала в некоторый момент времени. Например некоторые типы АЦП, могут давать ошибки, если их входной сигнал не зафиксирован во время преобразования. При смене входного кода ЦАП из-за неодновременности установления разрядов наблюдаются выбросы выходного напряжения. Для устранения этих явлений на время установления также следует зафиксировать выходной сигнал ЦАП. Устройства выборки - хранения (УВХ) (слежения - хранения), на интервале времени выборки (слежения) повторяют на выходе входной аналоговый сигнал, а при переключении режима на хранение сохраняют последнее значение выходного напряжения до поступления сигнала выборки.



Когда ключ S замкнут, выходное напряжение схемы повторяет входное. При размыкании ключа $U_{вых}$ сохраняет свое значение, последнее перед размыканием. Выходной повторитель на ОУ препятствует разряду конденсатора хранения $C_{хр}$ на нагрузку схемы. Входное сопротивление повторителя должно быть как можно больше, поэтому обычно применяют ОУ с полевыми транзисторами на входе. Простейшая схема УВХ имеет ряд недостатков:

- При замкнутом ключе источник входного сигнала имеет значительную емкостную нагрузку. Если источником является ОУ, это обычно приводит к его самовозбуждению.
- ОУ с полевыми транзисторами на входе, применяемые в качестве буферных повторителей, имеют значительное смещение нуля.

Эти недостатки во многом устранены в ИМС LF398 (1100СК2), которая в течение многих лет была промышленным стандартом. Схема имеет общую отрицательную обратную связь, охватывающую всю схему - с выхода усилителя ОУ₂ на вход усилителя ОУ₁.

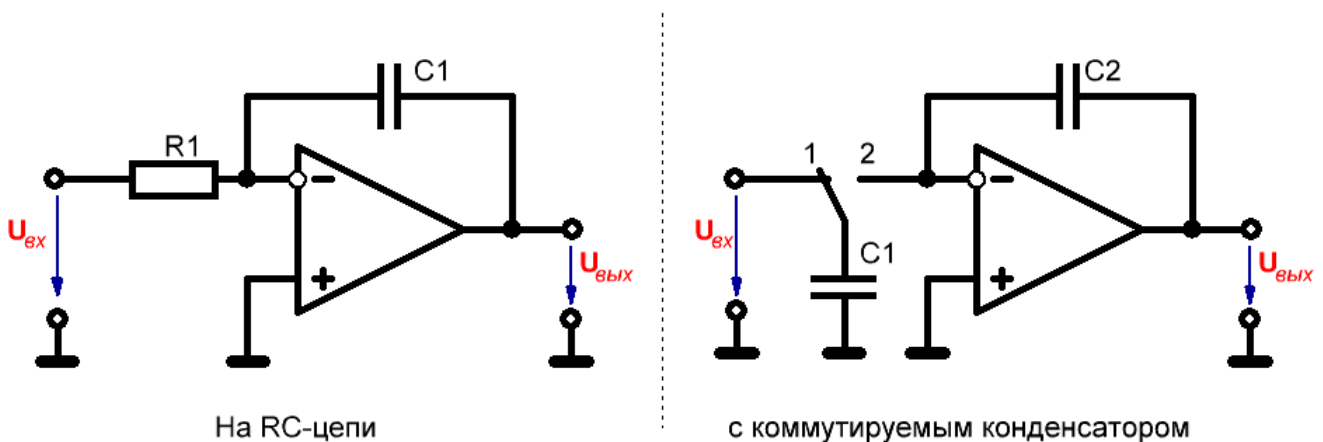


Когда коммутатор находится в замкнутом состоянии, потенциал выхода операционного усилителя ОУ₁ вследствие действия общей отрицательной обратной связи устанавливается таким, что $U_{вых}$ отличается от $U_{вх}$ на величину напряжения смещения ОУ₁. При этом смещение, возникающее из-за наличия коммутатора и ОУ₂, сводится к нулю. Диоды в этом состоянии схемы заперты, так как падение напряжения на них, равное указанному смещению, достаточно мало ($\leq 20\text{мВ}$). При размыкании коммутатора управляющим сигналом выходное напряжение остается неизменным. Резистор R_1 и диоды предотвращают насыщение ОУ₁, которое могло бы возникнуть из-за размыкания общей отрицательной обратной связи в этом режиме. Это снижает время переходного процесса при замыкании коммутатора. Усилитель ОУ₁ обеспечивает высокое входное сопротивление $U_{ВХ}$. Он выполнен по схеме с биполярными транзисторами на входе, что легко позволяет получить смещение нуля схемы в пределах 5 мВ. Резистор R_2 ограничивает ток заряда конденсатора хранения.

Устройства на переключаемых конденсаторах

Высокая точность изготовления интегральных МОП-конденсаторов и их стабильность способствовали тому, что получили развитие способы обработки сигналов, использующие явление дискретного переноса зарядов. Один из путей реализации этих способов состоит в применении схем с переключаемыми конденсаторами.

Реализация аналогового интегратора с применением переключаемого конденсатора



Передаточная функция схемы обычного аналогового интегратора на RC- цепи имеет вид

$$K(s) = -\frac{1}{sR_1C_1}, \text{ а частотная характеристика } K(j\omega) = -\frac{1}{j\omega R_1C_1}$$

Интегратор, в котором резистор R_1 имитируется с помощью схемы с переключаемым конденсатором работает следующим образом: Коммутатор периодически переключается из положения 1 в положение 2 и обратно с периодом T . В момент nT конденсатор C_1 заряжается до напряжения $U_{вх}(nT)$, поэтому накопленный на нем заряд составляет $C_1U_{вх}(nT)$. После переключения коммутатора из положения 1 в положение 2 в момент $nT+T/2$ конденсатор C_1 разряжается на вход ОУ с конденсатором C_2 в обратной связи. Поскольку входное дифференциальное напряжение и входные токи идеального ОУ равны нулю, конденсатор C_1 разрядится полностью и его заряд суммируется с зарядом, накопленным на конденсаторе C_2 . В результате в момент $(n+1)T$ справедливо следующее уравнение зарядов:

$$C_2U_{вых}[(n+1)T] = C_2U_{вых}(nT) - C_1U_{вх}(nT).$$

Здесь знак "-" обусловлен отрицательной обратной связью. Применив к обеим частям уравнения z-преобразование, получим уравнение

$$zC_2U_{вых}(z) = C_2U_{вых}(z) - C_1U_{вх}(z).$$

Определенная из этого уравнения передаточная функция имеет вид

$$W(z) = \frac{U_{вых}(z)}{U_{вх}(z)} = -\frac{C_1}{C_2(z-1)}$$

подставив $z = \exp(j\omega T)$ получим частотные характеристики

$$W(j\omega) = -\frac{C_1}{C_2(e^{j\omega T} - 1)}$$

При ωT стремящемся к 0 выражение в скобках в знаменателе правой части уравнения неограниченно приближается к $j\omega T$. Таким образом, для частот входного сигнала, низких относительно частоты переключения коммутатора $f=1/T$, можно приближенно записать

$$W(j\omega) = -\frac{C1}{C2j\omega T}$$

Применение интеграторов с переключаемыми конденсаторами в ИМС фильтров вместо обычных интеграторов дает два существенных **преимущества**. Во-первых, коэффициент передачи интегратора зависит только от отношения двух конденсаторов, а не от их абсолютных величин.

Второе преимущество фильтров на переключаемых конденсаторах состоит в возможности настройки их *характеристической частоты* (т.е. центральной частоты полосового фильтра или точки -3 дБ фильтра нижних частот) изменением только тактовой частоты. Это объясняется тем, что характеристическая частота фильтра, построенного на основе метода переменных состояния, пропорциональна коэффициенту передачи интегратора (или, что то же, обратнопропорциональна постоянной времени интегрирования). Это позволяет выпускать фильтры 8-го порядка в корпусе с семью выводами без внешних времязадающих элементов.

Теперь о **недостатках** фильтров на переключаемых конденсаторах. Такие фильтры имеют два неприятных свойства, которые обусловлены присутствием периодического тактового сигнала. Первое, это *сквозное прохождение сигнала тактовой частоты*, а именно наличие некоторого выходного сигнала (с напряжением приблизительно от 10 до 25 мВ) с частотой тактового колебания, напряжение которого не зависит от прикладываемого входного сигнала. Чаще всего это не имеет существенного значения, поскольку этот сигнал значительно удален от полосы, занимаемой обрабатываемым сигналом (обычно разработчики ИМС задают частоту коммутации в 100 раз (реже в 50 раз) больше характеристической частоты фильтров). Если же такое сквозное прохождение тактового сигнала нежелательно, то для его подавления обычно используют простой ФНЧ первого или второго порядка. В состав ИМС фильтров на переключаемых конденсаторах обычно включают неинвертирующий повторитель, на котором может быть построен такой фильтр.

Вторая проблема более тонкого свойства связана с наложением спектров. Любые компоненты входного сигнала, которые отстоят по частоте от частоты тактового сигнала на величину, соответствующую частотам полосы пропускания, не будут подавлены. Например, при использовании ИМС в качестве ФНЧ с частотой среза 1 кГц (при тактовой частоте в 100 кГц) все спектральные компоненты входного сигнала в диапазоне от 99 до 101 кГц будут преобразованы в полосу частот от постоянного тока до частоты 1 кГц. Поэтому в случае, если в спектре входного сигнала есть заметные компоненты частот, близких к тактовой частоте, перед входом фильтра следует включить простой предварительный фильтр нижних частот.