

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.

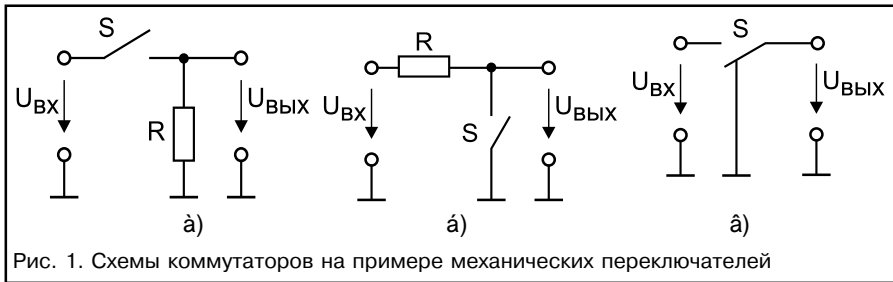


Рис. 1. Схемы коммутаторов на примере механических переключателей

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 источником сигнала является источник 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 элементах с управляемым сопротивлением, имеющим малое минимальное и высокое

максимальное значения. Для этих целей могут использоваться диодные мосты, биполярные и полевые транзисторы. 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.

Если в этой схеме управляющее напряжение $U_{\text{упр}}$ установить меньшим, чем минимально возможное входное

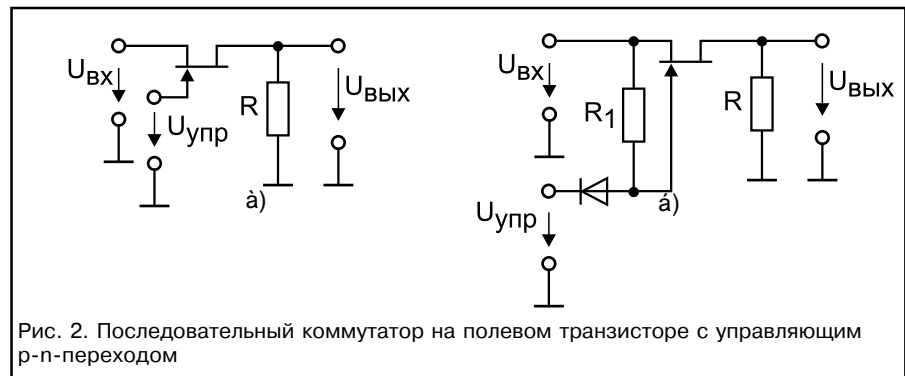


Рис. 2. Последовательный коммутатор на полевом транзисторе с управляющим p-n-переходом

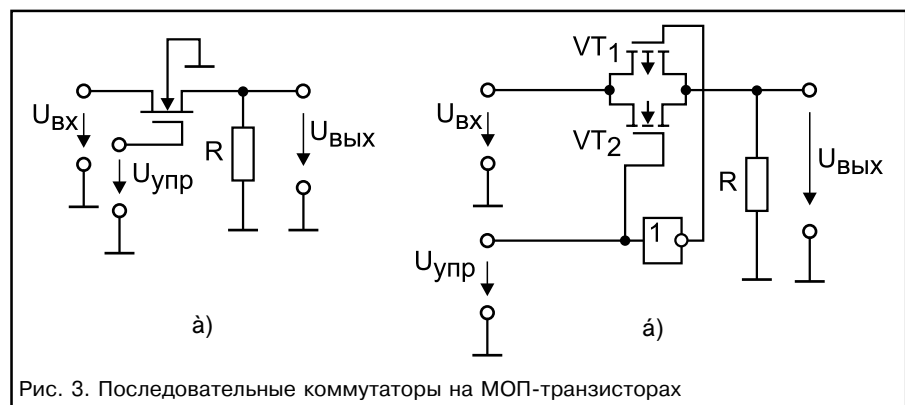


Рис. 3. Последовательные коммутаторы на МОП-транзисторах

напряжение, по крайней мере, на величину порогового напряжения транзистора – транзистор закрывается, 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 изменится в соответствии с изменением входного потенциала. Наиболее простой путь преодоления этой трудности показан на рис. 2б.

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 перевести 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 $U_{зи} < 0$. 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 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

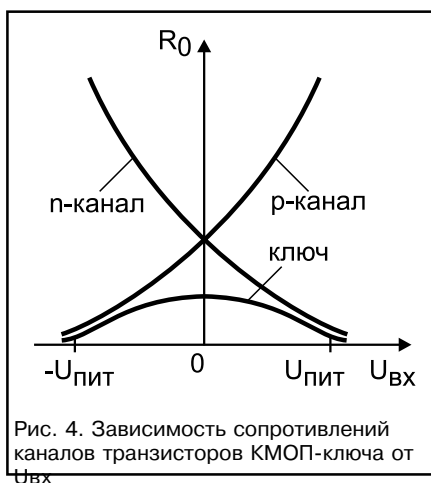


Рис. 4. Зависимость сопротивлений каналов транзисторов КМОП-ключа от $U_{вх}$

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 $-U_{пит}$ пройдут 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 заперты, 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 мультиплексора 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.

Георгий Волович,
g_volovich@mail.ru

Продолжение следует

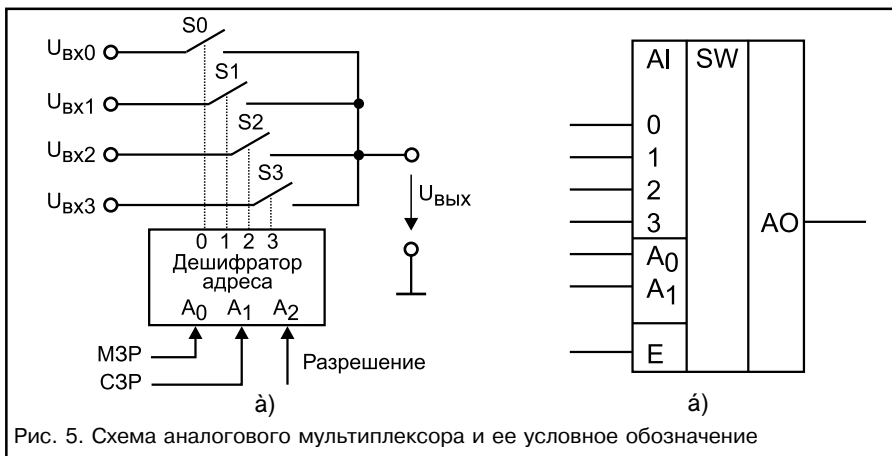


Рис. 5. Схема аналогового мультиплексора и ее условное обозначение