

# АНАЛОГОВЫЕ КМОП-КЛЮЧИ

## РУКОВОДСТВО ПО ВЫБОРУ\*

### ЧАСТЬ 1

Усама Мунир, Дэвид Кэнни\*\* [russia-feedback@maximintegrated.com](mailto:russia-feedback@maximintegrated.com)

Сегодня на рынке представлено огромное число разнообразных аналоговых ключей, причем за 35 лет, прошедших с момента появления их первых КМОП-версий, было создано множество специализированных ключевых схем. Довольно часто интегральные аналоговые ключи используются в качестве интерфейса, передающего аналоговые сигналы цифровым контроллерам. Разработчику при выборе требуемого ключа приходится учитывать многие критерии. В статье описываются типовые схемы стандартных аналоговых КМОП-ключей, их основные аналоговые и цифровые параметры, такие как сопротивление в открытом состоянии RON, его нелинейность, утечки, инжекция заряда и коэффициент изоляции (развязка между входом и выходом) в разомкнутом состоянии. Обсуждается усовершенствование новейших образцов ключей, которое привело к улучшению характеристик переключения, снижению питающих напряжений и уменьшению размеров корпусов. Появляются такие специфические характеристики, как защита от неисправностей, электростатического разряда (ESD), калибровка мультиплексоров и одновременная коммутация силовых и сигнальных цепей. Кроме того, рассмотрены специализированные ключи для видеосигналов, высокоскоростных USB-интерфейсов, HDMI- и PCIe-интерфейсов.

### БАЗОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ТИПИЧНОГО АНАЛОГОВОГО КЛЮЧА

В типичной схеме аналогового ключа (рис.1) полевые р- и n-канальные МОП-транзисторы (в дальнейшем р- и n-канальные МОП-транзисторы) включены параллельно, что позволяет одинаково легко пропускать сигналы в двух направлениях. Какой из транзисторов проводит большую часть тока, зависит

от соотношения значений напряжения на входе и выходе. Так как у ключа нет предпочтительных направлений протекания тока, его вход и выход полностью эквивалентны. Оба МОП-транзистора включаются и выключаются одновременно при подаче управляющих сигналов внутренних инвертирующего и неинвертирующего буферных усилителей. Эти усилители устанавливают нужное значение входных цифровых сигналов в зависимости от используемого для подачи управляющих сигналов типа логики (ТТЛ или КМОП) и от напряжения применяемого аналогового источника питания – одно- или двухполярного.

\* Версия статьи, опубликованной в двух выпусках журнала Elektronixpraxis за 27 ноября и 4 декабря 2012 года.

\*\* Усама Мунир (Usama Munir) и Дэвид Кэнни (David Canny) – инженеры по применению компании Maxim Integrated.

Обычные аналоговые ключи старших поколений (такие как CD4066) сейчас выпускают многие производители. Компания Maxim тоже предлагает подобные микросхемы, например, MAX4610, которые по выводам совместимы с этими ключами, но превосходят их по характеристикам. Так, их сопротивление в открытом состоянии меньше, а точность лучше. Существуют и разнообразные модификации базовой конструкции аналогового ключа. Например, в схемах некоторых аналоговых ключей с малой паразитной емкостью (таких как MAX4887) используются только n-канальные транзисторы, а p-канальные МОП-транзисторы, которые намного больше по размерам, исключены из сигнальной цепи, что позволяет значительно расширить их полосу пропускания.

В некоторых аналоговых ключах, работающих от однополярного источника положительного напряжения, для получения отрицательных напряжений используется схема с подкачкой заряда. Например, в переключателе звуковых сигналов MAX14504, работающем от однополярного источника напряжения 2,3–5,5 В, такая схема обеспечивает прохождение двуполярных сигналов (в диапазоне ±V<sub>CC</sub>) без искажений. Кроме того, многие современные ключи поставляются в корпусах, много меньших размеров, чем у компонентов предыдущих поколений.

### СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ СИГНАЛА ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ СОСТОЯНИИ R<sub>ON</sub>

При параллельном соединении p- и n-канальных транзисторов сопротивление в открытом состоянии R<sub>ON</sub> при различных значениях входного напряжения V<sub>IN</sub> разное (рис.2). Представленную на рис.2 зависимость R<sub>ON</sub> от V<sub>IN</sub> в первом приближении можно охарактеризовать как линейную,

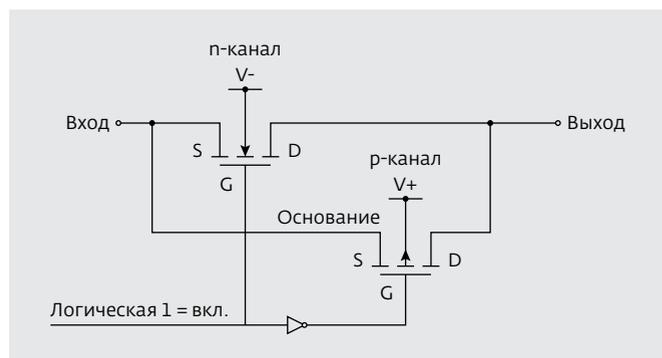


Рис.1. Типичная схема аналогового ключа – параллельное включение n- и p-канальных МОП-транзисторов

если пренебречь влиянием температуры, напряжения питания, а также зависимостью R<sub>ON</sub> от входного аналогового напряжения. В идеале следует стремиться к минимизации этого сопротивления, что позволит снизить потери в ключе и задержку распространения сигнала. Однако чтобы уменьшить R<sub>ON</sub>, необходимо увеличить отношение ширины (W) к длине (L) канала МОП-транзистора, что, в свою очередь, приведет к росту паразитных емкостей, сужающих рабочую полосу частот ключа. Помимо зависимости от соотношения геометрических размеров, R<sub>ON</sub> зависит от подвижности электронов и дырок в полупроводнике (μ<sub>n</sub> и μ<sub>p</sub>), емкости оксидного слоя (C<sub>ox</sub>), порогового напряжения (V<sub>T</sub>) и напряжения сигнала V<sub>GS</sub> (V<sub>IN</sub>), как видно из следующих выражений:

Для n-канального транзистора

$$R_{ON} = \frac{L_n}{\mu_n C_{ox} W_n (V_{GS} - V_T)}$$

для p-канального транзистора

$$R_{ON} = \frac{L_p}{\mu_p C_{ox} W_p (V_{GS} - V_T)}$$

Минимизация R<sub>ON</sub> и паразитных емкостей помимо снижения его зависимости

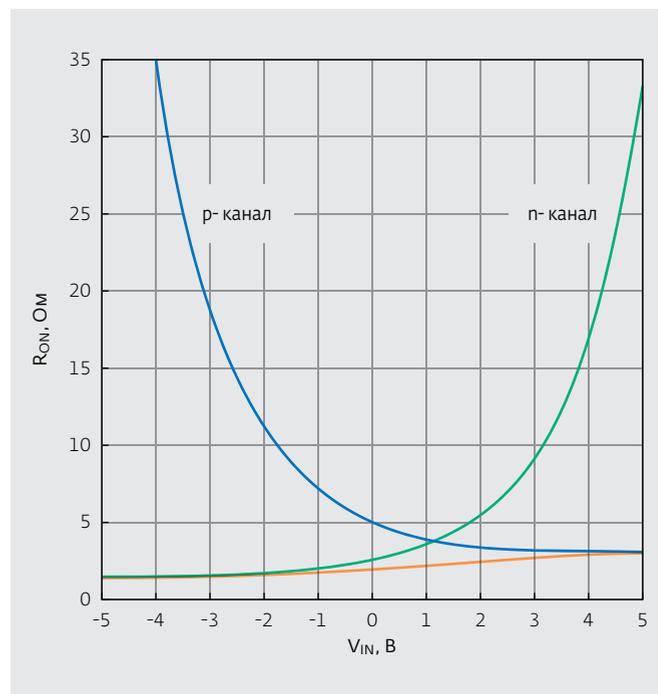
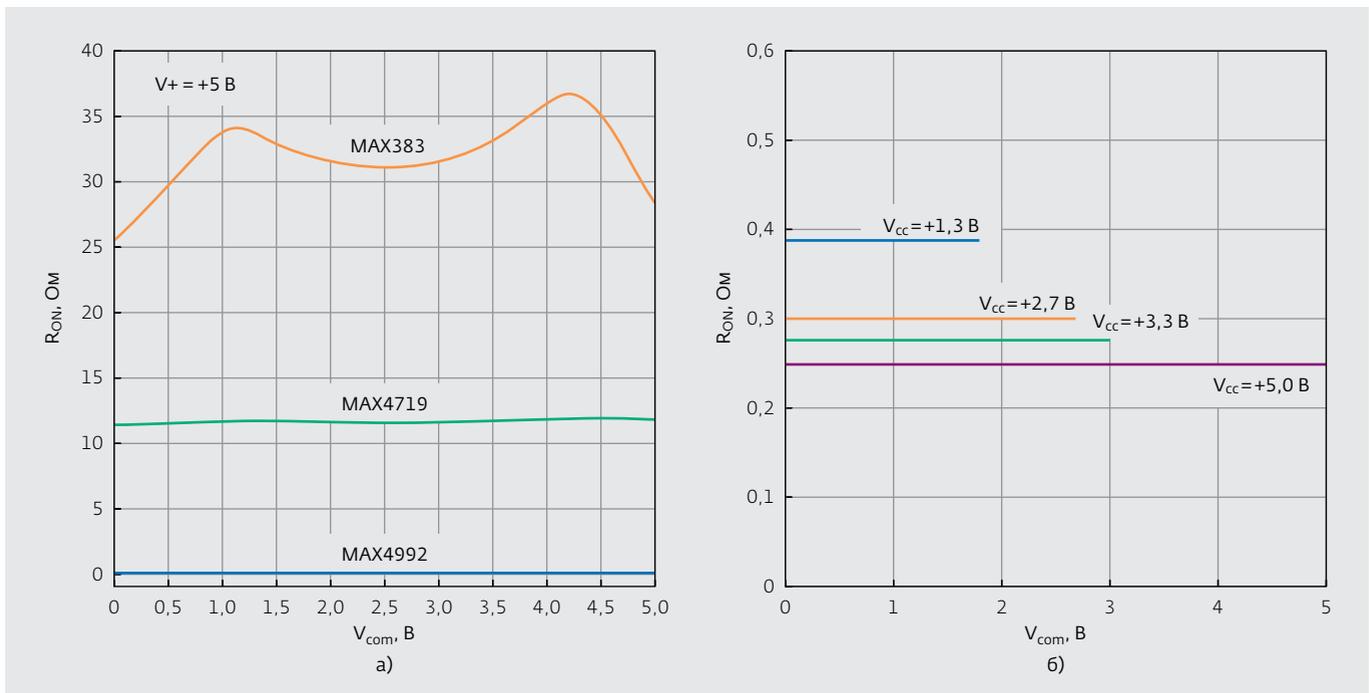


Рис.2. Зависимость R<sub>ON</sub> от входного напряжения для n- и p-канальных транзисторов и ключа в целом



**Рис.3.** Зависимость  $R_{ON}$  от коммутируемого сигнала: а – для разных типов ключей последнего поколения, работающих при напряжении питания 5 В; б – для MAX4992 при однополярном питании (уменьшение  $R_{ON}$  при повышении напряжения питания)

от температуры и напряжения – основная цель разработки новых типов аналоговых ключей.

Напряжение питания первых аналоговых ключей составляло  $\pm 20\text{ В}$ , типичное значение  $R_{ON}$  – порядка нескольких сотен ом. У новейших образцов  $R_{ON}$  равно примерно 0,5 Ом при значительно меньших значениях напряжения питания (табл.1). Значение  $R_{ON}$  моделей аналоговых ключей в основном слабо зависит от коммутируемого напряжения (рис.3а), и в сильной степени – от напряжения питания (рис.3б). Рассматриваемый в этом примере ключ MAX4992 может работать при напряжении питания 1,8–5,5 В, его максимальное значение  $R_{ON}$  составляет 0,38 Ом при напряжении 1,8 В, 0,3 Ом – при 2,7 В, 0,28 Ом – при 3,3 В и всего 0,25 Ом – при 5,5 В. Для многих новейших ключей гарантируется работоспособность вплоть до напряжения питания 1,6 В. Стоит отметить малые значения  $R_{ON}$  и его изменения при однополярном питании ИС MAX4992 – не более 1 мОм.

При выборе ключа для систем с одним напряжением питания предпочтение следует отдавать моделям, специально предназначенным для работы в таком режиме. Это позволит сэкономить один вывод корпуса, поскольку для подачи отрицательного напряжения питания и подключения

земли в данном случае не нужны разные выводы. Такая экономия означает возможность "упаковать" однополюсный двунаправленный (Single-Pole/Double-Throw, SPDT) переключатель (например, MAX4714) в миниатюрный шестивыводной корпус  $\mu\text{DFN}$  площадью всего 1,6 мм<sup>2</sup>. В то же время низковольтным переключателям двухполярного сигнала нужно двухполярное питание, что, в свою очередь, требует отдельного вывода для подачи отрицательного напряжения. В таких ключах в качестве управляющих сигналов обычно используются сигналы с ТТЛ или КМОП логическими уровнями.

Во многих высококлассных аналоговых системах до сих пор применяются биполярные высоковольтные источники питания на напряжение  $\pm(15\text{ или }12)\text{ В}$ . Работа с такими источниками питания, как правило, требует дополнительного вывода для питания схемы управления, называемого выводом питания логики ( $V_L$ ), как, например, в ключе MAX14756. Этот вывод присоединяется к источнику питания цифровой части системы, напряжение которой обычно составляет 1,8 или 3,3 В. Применение отдельного источника питания для схемы управления повышает его помехоустойчивость и снижает потребляемую мощность.



Таблица 1. Параметры низкоомных ключей \*

Наименование	Функция	$R_{ON}$ (макс.), Ом	$I_{L(OFF)}$ (макс.), мА	Рассогласование $R_{ON}$ по каналам (макс.), Ом	Нелинейность $R_{ON}$ , (макс.), Ом	$t_{ON}/t_{OFF}$ (макс.), нс	Инжекция заряда (тип.), пКл	Напряжение пита- ния, В	Корпус
MAX14535E	1 DPDT; NO	0,35	10	–	0,003**	90000/ 40000	–	2,4–5,5	10-UTQFN
MAX4715/ MAX4716	1 SPST; NO/NC	0,4	1	–	0,09	18/12	20	1,6–3,6	5-SC70
MAX4735	4 SPDT	0,4	20	0,03	0,75	200/180	100	1,6–3,6	16-TQFN/ TSSOP
MAX14504	2 SPDT; двуна- прав- ленный	0,5	50	–	0,001**	60000/ 3000	–	2,3–5,5	12-WLP
MAX4626	1 SPST; NO	0,5	2	–	0,1	50/30	40	1,8–5,5	5-SOT
MAX4742	2 DPST; NC	0,8	1	0,08	0,18	24/16	28	1,6–3,6	8- $\mu$ DFN/ $\mu$ MAX®/ SOT
MAX4754	4 DPDT	0,85	3	0,35	0,4	140/50	300	1,8–5,5	16-TQFN/ UCSP
MAX4758/ MAX4759	4 DPDT/ 8 SPDT	0,85	5	0,35	0,45	140/50	40	1,8–5,5	36-TQFN; 32-UCSP/ WLP
MAX4751/ MAX4752	4 SPST; NO/NC	0,9	2,5	0,12	0,1	0/25	21	1,6–3,6	16-QFN/ 14-TSSOP
MAX4855	2 SPDT	1	2	0,12	0,275	60/40	170	2–5,5	16-TQFN
MAX4783	3 SPDT	1	2	0,4	0,2	5/15	-40	1,6–3,6	16-QFN/ TQFN/TSSOP
MAX4680/ MAX4690/ MAX4700	2 SPST; NC/NO/ NO-NC	1,25	0,5	0,3	0,3	275/175	550	$\pm(4,5-20)$	16-PDIP(N)/ SOIC(W)/ SSOP
MAX4677/ MAX4678/ MAX4679	4 SPST; NC/NO/ NO-NC	1,6	1	0,3	0,4	350/150	85	$\pm(2,7-5,5)$	16-PDIP(N)/ TSSOP
MAX4688	1 SPDT	2,5	0,5	0,4	1	30/12	40	1,8–5,5	6-UCSP
MAX4661/ MAX4662/ MAX4663	4 SPST; NC/NO/ NO-NC	2,5	0,5	0,5	0,5	275/175	300	$\pm(4,5-20)$	16-PDIP(N)/ SOIC(W)/ SSOP



Таблица 1 (продолжение). Параметры низкоомных ключей

Наименование	Функция	$R_{ON}$ (макс.), Ом	$I_{L(OFF)}$ (макс.), мА	Рассогласование $R_{ON}$ по каналам (макс.), Ом	Нелинейность $R_{ON}$ , (макс.), Ом	$t_{ON}/t_{OFF}$ (макс.), нс	Инжекция заряда (тип.), пКл	Напряжение пита- ния, В	Корпус
MAX4667	2 SPST; NC	2,5	0,5	0,4	0,4	275/175	450	±(4,5–20)	16-PDIP(N)/ SOIC(N)
MAX4706/ MAX4707	1 SPST; NC/ NO	3	1	–	0,85	20/15	5	1,8–5,5	6-μDFN/ SC70; 5-SC70
MAX4675/ MAX4676	1 SPST; NO/NC		1	–	0,7	300/110	87	±(2,7–5,5)	6-SOT
MAX4674	4 SPDT	4	0,5	0,4	0,8	8/6	10	1,8–5,5	16-QSOP/ SOIC/ TQFN/ TSSOP
MAX4664/ MAX4665/ MAX4666	4 SPST; NC/ NO/ NO-NC	4	0,5	0,5	0,5	275/175	300	±(4,5–200)	16-PDIP(N)/ SOIC(N)
MAX4739	4 SPST; NO-NC	4,5	0,5	0,4	1,2	80/40	5	1,8–5,5	14-TSSOP/ UCSP
MAX4621/ MAX4622/ MAX4623	2 SPST; NO/ 2 SPDT/ 2 DPST; NO	5	0,5	0,5	0,5	50/200	480	±(4,5–20)	16-PDIP(N)/ SOIC(N)
MAX4947/ MAX4948	6 SPDT; двуна- прав- ленный	5,5	3	0,5	1	800/800	10	1,8–5,5	24-TQFN/ 25-UCSP
MAX4729/ MAX4730	1 SPDT	5,5	2	0,15/0,34	1,5/0,95	45/26	3	1,8–5,5	6-μDFN/ SC70
MAX4670	8 SPDT; NO-NC	9	1000	0,15	0,18	400/200	20	2,7–3,6	32-TQFN
MAX14756/ MAX14757/ MAX14758	4 SPST; NC/ NO/ NO	10	2,5	0,5	0,004 <sup>**</sup>	60000/ 3000	580	±(10–35)	6-TSSOP

Примечания. ° Для получения последних данных следует обратиться к спецификации; \*\* типичное значение;

NO – нормально разомкнутый ключ; NC – нормально замкнутый ключ; SPST – однополюсный однонаправленный;

DPST – двухполюсный на одно направление.



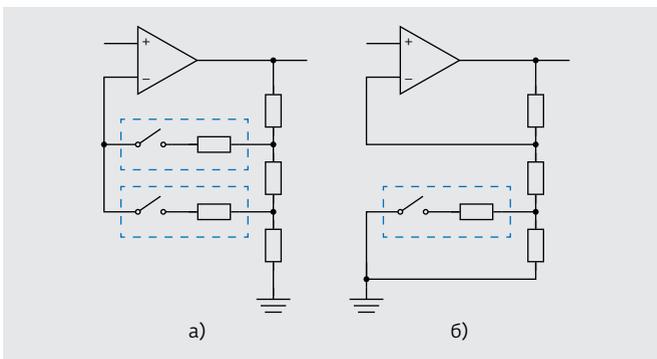


Рис.4. Схемы управления коэффициентом усиления: правильная (а) и неправильная (б)

Довольно часто разработчики недооценивают связь между уровнями входных управляющих сигналов аналоговых ключей и потребляемой ими мощностью. Однако если при входных логических сигналах с уровнями земли и напряжении питания  $V_{CC}$  (или  $V_L$ ) потребляемый ключом ток практически равен нулю, то сигналы с логическими уровнями ТТЛ при напряжении питания ключа 5 В могут вызвать увеличение потребляемого тока более чем в 1000 раз. Чтобы избежать излишнего энергопотребления, стоит отказаться от таких управляющих сигналов, оставшихся в наследство от конструкций 30-летней давности.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАИЛУЧШЕЙ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

Поскольку типичный аналоговый ключ не содержит схем подкачки заряда, которые могут расширить диапазон допустимых коммутируемых сигналов за рамки питающих напряжений, все кривые зависимости  $R_{ON}$  от  $V_{COM}$  располагаются в пределах области, ограниченной напряжением питания (см. рис.3). Выход коммутируемого сигнала за эти границы при отсутствии специальной защиты может необратимо повредить микросхему ключа, так как вызовет неконтролируемый рост тока внутренних защитных диодов. В обычных условиях эти диоды служат для защиты схемы от воздействия коротких электростатических разрядов величиной до  $\pm 2$  кВ\*. Наличие  $R_{ON}$  приводит к линейному снижению напряжения сигнала, поскольку вызывает его падение, пропорциональное протекающему через ключ току. Это изменение

напряжения необходимо учитывать при разработке конкретного устройства. Два других важных параметра, которые нужно иметь в виду, – это рассогласование сопротивлений каналов и нелинейность сопротивления  $R_{ON}$ . Рассогласование сопротивлений характеризует разницу сопротивлений каналов ключей в пределах одной микросхемы, а нелинейность  $R_{ON}$  – зависимость сопротивления одного канала ключа от напряжения сигнала. Чем меньше относительные значения этих параметров, тем более точен ключ (их типичные значения составляют 0,1 и 5 Ом, соответственно). Некоторые модели ключей разрабатываются с целью достижения минимально возможных значений указанных параметров. Например, МАХ4992 обеспечивает рассогласование сопротивлений около 3 мОм и нелинейность около 1 мОм. Идеальным ключом для коммутации звуковых и видеосигналов в портативных устройствах, а также для обработки отрицательных сигналов с напряжениями до -1,5 В является ИС МАХ14535Е благодаря минимизации  $R_{ON}$ , рассогласования каналов и нелинейности сопротивления.

В большинстве случаев можно избежать высоких коммутирующих токов за счет изменения схемы включения. Например, можно регулировать коэффициент усиления каскада ОУ с помощью резистора, включенного в цепь обратной связи. В этом случае лучше всего включать аналоговый ключ последовательно с высокоомным входом (рис.4а). Тогда значение  $R_{ON}$  и его температурную зависимость можно игнорировать, так как коммутируемые ключом токи крайне малы. Вариант же схемы, приведенной на рис.4б, менее желателен, так как в этом случае ток, протекающий через ключ, больше и зависит от значения выходного сигнала.

## КЛЮЧИ ДЛЯ КОММУТАЦИИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ И РЕЖИМ ПРИОРИТЕТНОГО РАЗМЫКАНИЯ КЛЮЧА

Одно из важных требований к ключу, предназначенному для коммутации звуковых сигналов, – отсутствие щелчков и тресков, появляющихся при коммутации импульсами, которые проходят в акустическую систему. Щелчки чаще всего вызывают переходные процессы при включении и выключении питания. Независимо от качества работы схемы в нормальных условиях наличие щелчков при включении/выключении обычно воспринимается пользователем как показатель низкого качества устройства. Устранить щелчки можно за счет увеличения времени включения

\* Более подробно этот будет вопрос рассмотрен в подразделе "Ключи с защитой от статического электричества" Руководства по выбору аналоговых КМОП-ключей, часть 2.



Таблица 2. Параметры бесщелчковых переключателей \*

Наименование	Функция	$R_{ON}$ (макс.), Ом	$I_{L(OFF)}$ (макс.), нА	Рассогласование $R_{ON}$ по каналам (макс.), Ом	Нелинейность $R_{ON}$ , (макс.), Ом	$t_{ON}/t_{OFF}$ (макс.), нс	Инжекция заряда (тип.), пКл	Напряжение питания, В	Корпус
MAX4992	2 SPDT; двухнаправленный	0,5	100	0,003	0,001	150000/2000	–	1,8–5,5	10-UTQFN
MAX4744/ MAX4746H	2 SPDT	0,95	15	0,1	0,55	560/540**	4	1,8–5,5	10- $\mu$ DFN
MAX4910	4 SPDT	0,8	–	0,1	0,35	150/1000	300	1,8–5,5	16-TQFN
MAX4764/ MAX4765	2 SPDT	0,85	2	0,1	0,4	0/70	150	1,8–5,5	10-TDFN-EP/ UCSP
MAX4908/ MAX4930	2 SP3T	0,8	50	0,1	0,35	–	–	1,8–5,5	14-TDFN-EP
MAX4901/ MAX4902	2 SPST; NO	1	6	–	0,25	100/100	125	1,8–5,5	8-TDFN-EP; 9-UCSP
MAX4571/ MAX4573	11 SPST; NO	35	0,2	3	6	8000/300**	–	2,7–5,25	28-QSOP/ SOIC(W)/ SSOP
MAX4562/ MAX4563	2 SPST + 2 SPDT	30	1	5	5	12000/3000**	–	2,7–5,5	16-QSOP

Примечания. \* Для получения последних данных следует обратиться к спецификации; \*\* типичное значение;

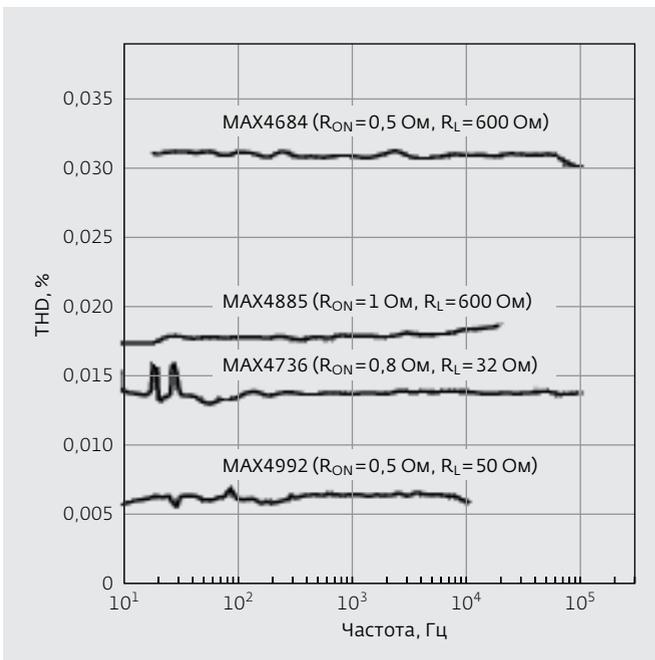
NO – нормально разомкнутый ключ.

и выключения ключа ( $t_{ON}$  и  $t_{OFF}$ ). Этот метод уменьшает амплитуду импульсов при перезарядке емкостей схемы. Обычно значения  $t_{ON}$  и  $t_{OFF}$  ключей для коммутации звуковых сигналов лежат в пределах от 15 нс до 1 мкс, но в специальных "бесщелчковых" переключателях это время может быть увеличено до 1 мс (табл.2). В ряде таких переключателей для подавления щелчков используются дополнительные шунтирующие ключи и режим приоритетного размыкания (производится раньше замыкания). В ИС MAX4744 для разрядки всех емкостей используется встроенный шунтирующий ключ (см. рис.4). Это предотвращает возникновение любых переходных импульсов напряжения, которые могут попасть в динамики. Режим приоритетного размыкания гарантирует, что переключатель разорвет

одно соединение до того, как подключит другое. При этом необходимо, чтобы  $t_{ON}$  было больше  $t_{OFF}$ . Правда, в некоторых альтернативных вариантах, наоборот, время выключения  $t_{OFF} > t_{ON}$ . При изменении коэффициента усиления важно, чтобы оба переключателя не были одновременно разомкнуты. В противном случае, цепь обратной связи будет разорвана и усилитель выйдет за границы нормального режима работы.

Изменение уровня сигнала может привести к изменению  $R_{ON}$ , и, следовательно, к потерям в ключе. Это увеличивает нелинейные искажения. Рассмотрим ключ с  $R_{ON}=100$  Ом и нелинейностью 10 Ом. При работе такого ключа на нагрузку в 600 Ом его коэффициент нелинейных искажений составит 1,67%. Коэффициент искажений – критичный параметр для звуковых





**Рис.5.** Зависимость THD от частоты для некоторых аналоговых ключей

устройств, так как характеризует качество или верность воспроизведения сигнала, проходящего через ключ (рис.5). Коэффициент нелинейных искажений, или полный коэффициент гармонических искажений (Total Harmonic Distortion, THD), а также максимальное значение THD определяются с помощью следующих формул:

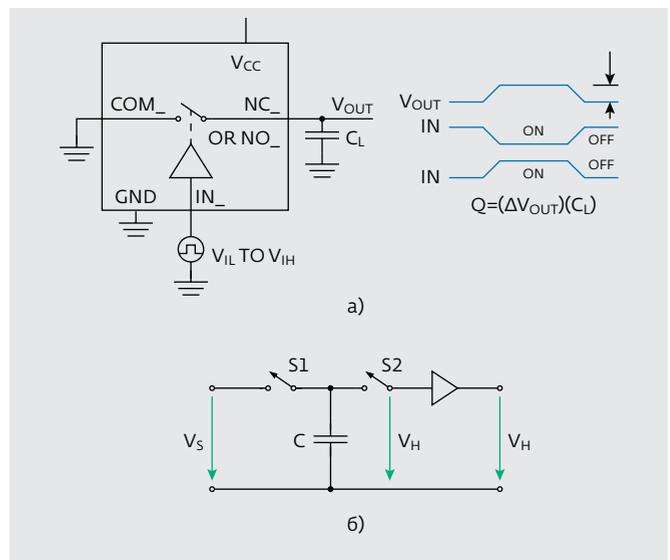
$$THD(\%) = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}}{a_1} 100\% ;$$

$$THD_{MAX}(\%) = \frac{R_{FLAT(ON)}}{R_{LOAD}} 100\% \approx \frac{10\% \cdot R_{ON}}{R_{LOAD}} 100\% ,$$

где  $R_{LOAD}$  - сопротивление нагрузки ключа.

### МАЛОЕ ЗНАЧЕНИЕ $R_{ON}$ И УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОМ ИНЖЕКЦИИ ЗАРЯДА

Далеко не во всех случаях нужно, чтобы  $R_{ON}$  было мало. Однако когда это необходимо, следует принимать во внимание несколько дополнительных обстоятельств. Схемы с малым сопротивлением ключа следует изготавливать на кристаллах большего размера. Входная емкость ключа, заряд и разряд которой требует больших токов и, соответственно, больших затрат энергии при каждом переключении, должна быть большой. Время



**Рис.6.** Появление напряжения ошибки на аналоговом выходе вследствие инjectionи заряда из цепи управления (а); применение прецизионных аналоговых ключей в типовой схеме выборки/хранения (б)

перезарядки зависит от сопротивления схемы и определяется постоянной времени  $\tau = RC$  ( $R$  и  $C$  - сопротивление и емкость нагрузки, соответственно). В обычных обстоятельствах время перезарядки составляет несколько десятков наносекунд, однако значения времени включения и выключения схем с большим  $R_{ON}$  меньше. Соотношение сопротивления ключа и входной емкости ряда аналоговых ключей с одними и теми же типом корпуса и разводкой выводов могут различаться. Например, значение  $R_{ON}$  ИС MAX4501 и MAX4502 с небольшими значениями  $t_{ON}/t_{OFF}$  относительно высокое, тогда как  $R_{ON}$  MAX4514 и MAX4515, время включения/выключения которых больше, намного меньше.

Уменьшение  $R_{ON}$  сопровождается еще одним неприятным эффектом - более интенсивной инjectionи заряда, вызванной высокими токами перезарядки емкости затвора МОП-транзистора. Часть заряда добавляется (или забирается) в проводящий канал при каждом включении или выключении ключа (рис.6а). Для ключей, соединенных со схемой с высоким входным сопротивлением, это приводит к значительному изменению коммутируемого сигнала. Малая паразитная емкость  $C_L$  при отсутствии нагрузки вызывает изменение напряжения на выходе, и инjectionируемый заряд может быть выражен как  $Q = \Delta V_{OUT} C_L$ . Устройства выборки/хранения, выходное напряжение которых в процессе аналого-цифрового

# Акселерометры на малые ускорения с цифровым выходом



Среди недорогих датчиков движения производства Analog Devices имеется несколько приборов, предназначенных для подключения к цифровым системам без согласующих аналоговых схем (за исключением, пожалуй, цепей питания, которые должны быть свободны от шумов). Для простых систем они имеют важные преимущества перед датчиками с аналоговым выходом:

- благодаря интеграции в одном корпусе всех цепей датчика и АЦП не требуется выводить аналоговый сигнал с низким выходным сопротивлением для последующего согласования с АЦП, что положительно сказывается на общем потреблении и результирующем уровне шума всей системы. Также упрощается и компоновка системы;
- встроенный блок цифровой обработки позволяет определять некоторые события без участия центрального процессора системы, разгружая тем самым систему и экономя электроэнергию. Таким образом определяются касание, двойное касание, активность, отсутствие активности, свободное падение, изменение ориентации;
- специальные программируемые логические выходы позволяют управлять внешними устройствами по сигналу детектора событий (в том числе включать питание внешних устройств). Собственное потребление

акселерометра при этом может быть менее 300 нА (см. рис.);

- встроенный отключаемый буфер FIFO также разгружает процессор;
- совместное использование настраиваемого детектора событий и буфера FIFO позволяет "отмотать" время назад, получить выборку на моменты времени "до", "во время" и "после" события, даже если управляющий процессор в это время находился в состоянии сна;
- возможность оперативного выбора диапазона измерений и разрешения;

- возможность оперативного выбора соотношения потребление/полоса.

Наличие вывода синхронизации позволяет синхронизировать выборки с различных сенсоров либо подстроить частоту выборки под требуемую. Акселерометры имеют стандартные интерфейсы I2C или SPI. Приборы позволяют обнаруживать изменение ориентации относительно вектора  $g$  менее чем на  $0,25^\circ$  в покое. Кроме специальных версий приборы выполнены в корпусах LGA с температурным диапазоном  $-40-85^\circ\text{C}$ .

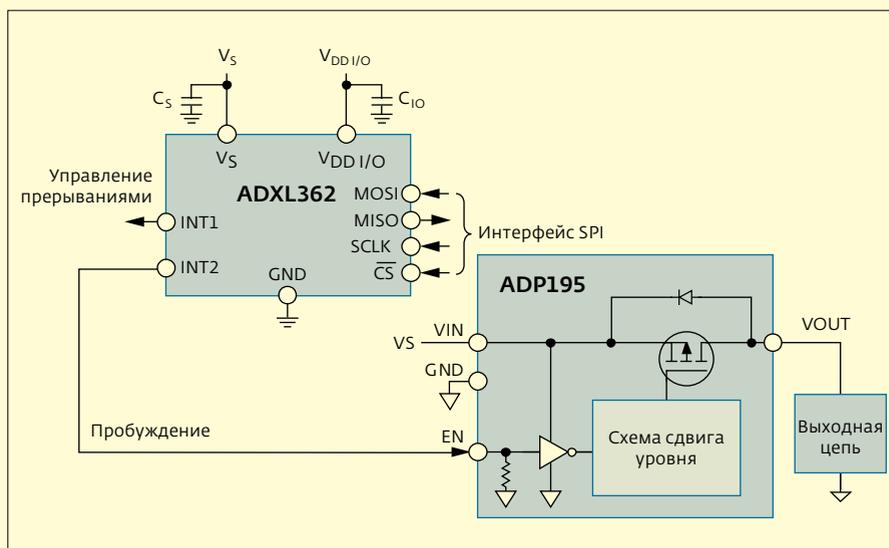


Схема включения акселерометра ADXL362

## Основные технические характеристики акселерометров Analog Devices

Компонент	Напряжение питания, В ядра интерфейса	Активное потребление ядра, мкА	Диапазоны измерения, g	Частоты выборки, Гц	Шум, $\chi Y(Z)$ , $\text{мкг}\sqrt{\text{Гц}}$	Разрешение, бит (мг/МЗР)	Размер корпуса, мм	Примечания (оптимизация)
ADXL345	2,0–3,6	1,7–3,6	23–140	2/4/8/16	0,1–3200	3 (4,3) СКЗ мг	3×5×1	Есть AQEC-версия
ADXL346	1,7–2,7	1,7–2,7	23–140	2/4/8/16	0,1–3200	4,3 (6) СКЗ мг	3×3×1	(Размер/потребление)
ADXL312	2,0–3,6	2,0–3,6	55–170	1,5/3/6/12	0,1–3200	340 (470)	5×5×1,45	Сертифицирован AEC-Q100
ADXL343	2,0–3,6	1,7–3,6	23–140	2/4/8/16	0,1–3200	4,3(4,3) СКЗ мг	3×5×1	(Цена)
ADXL344	1,7–2,7	1,7–2,7	23–140	2/4/8/16	0,1–3200	6(6) СКЗ мг	3×3×1	(Цена /размер/потребление)
ADXL350	2,0–3,6	1,7–3,6	45–170	1/2/4/8	6,25–3200	105 (175)	3×4×1,2	(По шумам)
ADXL362	1,6–3,5	1,6–3,5	1,4–13	2/4/8	12,5–400	175 (250)	3×3,25×1,06	Датчик температуры, только SPI (шум/потребление)

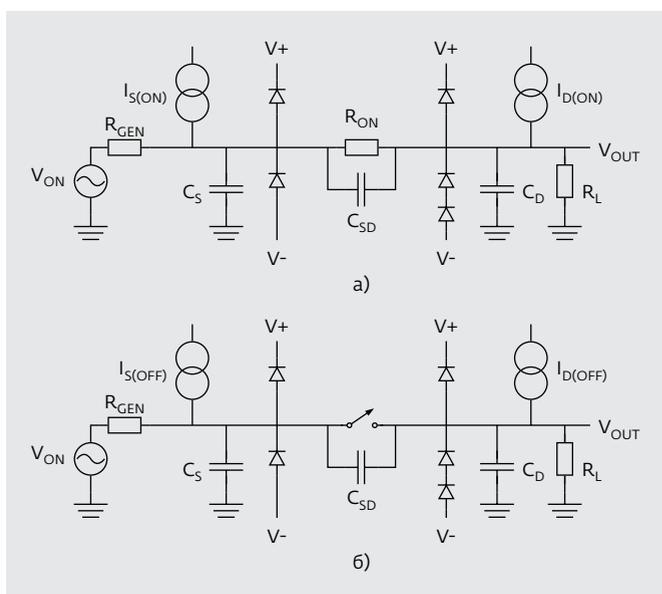


Рис.7. Эквивалентная схема ключа: а – в открытом состоянии; б – в закрытом состоянии

преобразования должно быть постоянным, – хороший пример влияния этого эффекта на качество работы системы (рис.6б). Замыкание ключа S1 вызывает заряд буферного конденсатора С входным напряжением  $V_S$ . Емкость конденсатора равна всего нескольким пикофарадам, и значение  $V_S$  в течение всего времени, пока замкнут ключ S1, равно напряжению конденсатора. При замыкании ключа S2 в начале каждого цикла преобразования "сохраненное" напряжение поступает на вход буферного усилителя. Высокое входное сопротивление буферного усилителя позволяет поддерживать неизменное значение напряжения конденсатора  $V_H$  в течение всего цикла преобразования. Для минимизации времени выборки емкость конденсатора должна быть небольшой, а сопротивление ключа S1 – малым. Однако эффект инжекции заряда может вызвать изменение напряжения запоминающего конденсатора  $V_H$ , равное нескольким милливольтам, искажая показания АЦП.

### ВЛИЯНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ НА ЗНАЧЕНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В малосигнальных моделях аналогового ключа в замкнутом или разомкнутом состояниях (рис.7) большая часть токов утечки протекает через внутренние паразитные диоды и таким образом вносит свой вклад в значение выходного напряжения. Токи утечки зависят от температуры и при ее повышении примерно на каждые  $10^\circ\text{C}$  удваиваются.

Наличие диодов защиты от электростатических разрядов увеличивает токи утечки.

Выходное напряжение ключа в открытом состоянии зависит от тока утечки, значения  $R_{ON}$ , его изменения при изменении сигнала, сопротивления нагрузки и сопротивления источника сигнала и рассчитывается по формуле:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \left( \frac{R_L}{R_{GEN} + R_{ON} + R_L} \right) + I_{LKG} \cdot \left( \frac{(R_{GEN} + R_{ON}) \cdot R_L}{R_{GEN} + R_{ON} + R_L} \right).$$

Для двунаправленных ключей значение тока утечки  $I_{LKG}$  равно току истока или тока стока МОП-транзистора в зависимости от того, какой из выводов (стока или истока) – выходной. Выходное напряжение в выключенном состоянии зависит только от тока утечки и вычисляется по формуле  $V_{OUT} = I_{LKG} R_L$ .

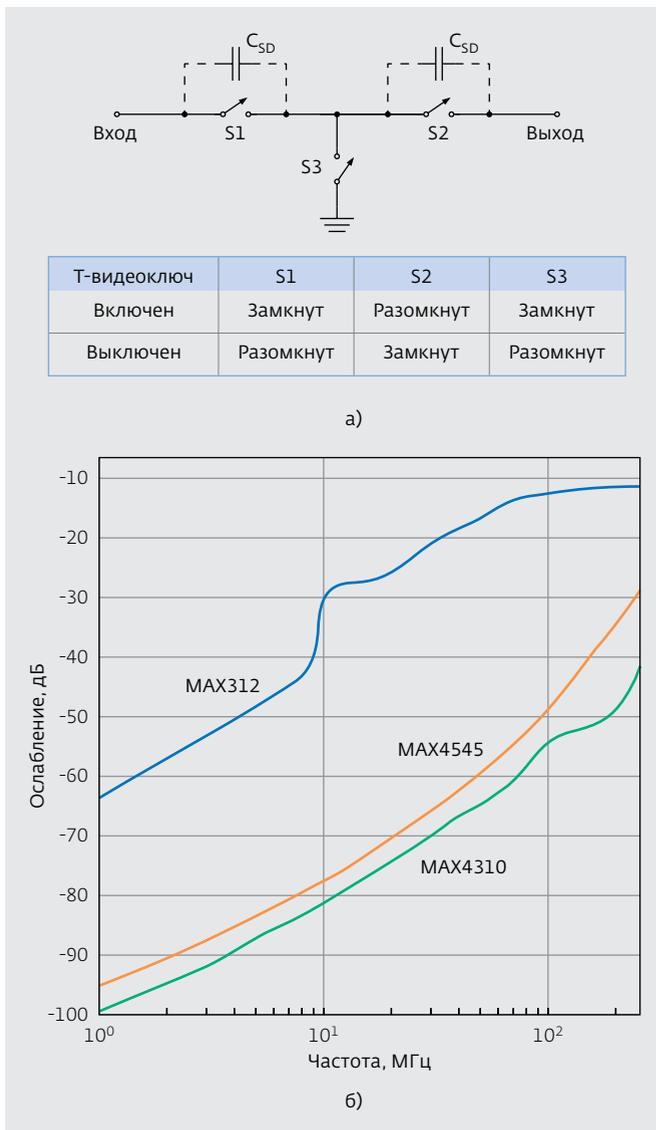
В большинстве спецификаций значения тока утечки во включенном/выключенном состояниях приводятся для наихудших условий. При превышении входным напряжением предельных значений, задаваемых напряжениями источников питания, паразитные диоды вызывают увеличение тока утечки через подложку. В результате ток источников питания через этот канал возрастет, что может привести к необратимому повреждению микросхемы. Следовательно, разработчик должен предотвращать превышение предельных значений тока потребления, установленных для данного типа ИС. В устройствах с использованием ОУ или АЦП, где переключаются высокоомные цепи и требуются малые напряжения смещения, необходимо применять ключи с малыми токами утечки.

### ОСОБЕННОСТИ КЛЮЧЕЙ ДЛЯ КОММУТАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И ВИДЕОСИГНАЛОВ

При коммутации видеосигналов важное значение имеет соотношение  $R_{ON}$  и паразитных емкостей. При использовании обычных ключей с высоким  $R_{ON}$  для компенсации их потерь могут потребоваться дополнительные каскады усиления сигнала. Однако уменьшение  $R_{ON}$  ведет к росту паразитных емкостей и тем самым к сужению полосы пропускания и искажению видеосигнала. Для сохранения полосы пропускания ключей необходимо применять буферные каскады, что увеличивает число компонентов в схеме.

Построение ключа только на n-канальных транзисторах расширяет полосу пропускания, так как размеры паразитных элементов и корпуса уменьшаются, позволяя, кроме того, разместить на той же площади больше ключей. Однако





**Рис. 8.** Т-образный ключ для коммутации ВЧ-сигналов (а) и сравнение коэффициентов изоляции в выключенном состоянии в зависимости от частоты Т-образного (МАХ4545, МАХ4310) и стандартного (МАХ312) ключей (б)

использование только п-канальных ключей жестко ограничивает значение коммутируемого сигнала рамками напряжений питания ключа. Выход за эти пределы вызывает сильное ограничение сигнала, значительно искажающее его форму. При выборе такого ключа для своего устройства следует удостовериться в том, что задаваемый им диапазон разрешенных значений сигналов достаточен для того, чтобы любые возможные в устройстве сигналы проходили без искажений.

При необходимости коммутации множества видеосигналов разных источников, например, в системах видеонаблюдения или системах

безопасности, ключевыми параметрами являются коэффициент изоляции (развязка между входом и выходом) в выключенном состоянии и переходное затухание между каналами. Когда ключ разомкнут, уровень сигнала, проникающего со входа на выход, характеризует коэффициент изоляции. На высоких частотах, присутствующих в видео- или радиочастотным устройствам, сигнал в закрытом ключе проходит через паразитную емкость между истоком и стоком ( $C_{DS}$ ). Использование ключа в высокоомных цепях также способствует уменьшению коэффициента изоляции при разомкнутом ключе.

Для коммутации видеосигналов и сигналов на частотах свыше 10 МГц хорошо подходит так называемая Т-образная топология ключа, образуемая включением третьего ключа между точкой соединения двух последовательно соединенных ключей и землей (рис.8а). Коэффициент изоляции такой конструкция значительно больше, чем у обычного одиночного ключа. Межконтактное проникновение сигнала в разомкнутом Т-ключе определяется паразитными емкостями и возрастает с ростом частоты (рис.8б). В многоканальных ключах паразитные емкости приводят к проникновению сигналов в соседние каналы, увеличивая уровень перекрестных помех.

В открытом состоянии Т-образного ключа, приведенного на рис.8а, ключи S1 и S2 замкнуты, а S3 – разомкнут; в выключенном состоянии замыкается ключ S3, а S1 и S2 – размыкаются. В выключенном состоянии сигнал вместо прохождения на выход через последовательно соединенные емкости сток-исток ключей S1 и S2 замыкается на землю через открытый ключ S3. Ослабление сигнала (коэффициент изоляции) в разомкнутом ключе Т-типа (например, МАХ4545) на частоте 10 МГц достигает выдающегося значения – 80 дБ против 36 дБ в обычном ключе (например, МАХ312) (рис.8б).

Наконец, следует рассмотреть буферизованные и небуферизованные видеоключи. Для стандартных, так называемых пассивных видеоключей могут потребоваться дополнительные схемные компоненты. Ключи же со встроенным буфером, известные как активные ключи, объединяют в одном корпусе собственно ключ и буферный каскад, уменьшающий взаимовлияние сигналов. Интегрированные мультиплексоры-усилители наподобие МАХ4310 при использовании их для коммутации ВЧ-сигналов обеспечивают высокий коэффициент изоляции в выключенном состоянии.

*Продолжение статьи будет опубликовано в следующем номере журнала "Электроника: НТБ".*

