

## УМЕНЬШЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ, ВНОСИМЫХ АНАЛОГОВЫМИ КЛЮЧАМИ

**В** статье приведена краткая информация об исследованиях искажений, вносимых аналоговыми ключами. Проведен сравнительный анализ схем компенсации нелинейных искажений в статическом и динамическом режимах работы ключей. Сформулированы рекомендации по использованию схем компенсации нелинейных искажений, вносимых аналоговыми ключами.

В. Макаренко

В современных высококачественных системах усиления и обработки звука искажения, вносимые аналоговым трактом, не должны превышать величины 0.001%, и желательно иметь их еще меньшей величины. Как известно, коммутация аналоговых сигналов осуществляется с помощью аналоговых ключей и необходимо минимизировать искажения, вносимые ими в процессе работы тракта обработки звука.

Как известно, аналоговые ключи, построенные на комплементарных МОП-транзисторах, вносят нелинейные искажения в тракт обработки сигналов. Это связано с тем, что сопротивление открытого ключа зависит от приложенного напряжения, т.е. является нелинейным элементом [1].

В [1] приведена структурная схема ключа (рис. 1) и зависимость сопротивления открытого ключа TS12A12511 от амплитуды коммутируемого напряжения (рис. 2).

Кроме того, эта зависимость меняется при изменении сопротивления нагрузки, т.е. зависит от тока, протекающего через аналоговый ключ.

По аналогичным [1] схемам построены и аналоговые ключи других производителей, например, ключи AD7510DI...AD7512DI, выпускаемые компанией Analog Devices [2]. Изменение сопротивления открытого ключа носит такой же характер, как и показанный на рис. 1, хотя абсолютные значения для каждого типа ключей индивидуальны.

Чтобы исследовать зависимость искажений, вносимых аналоговыми ключами, от со-

### REDUCE THE DISTORTION INTRODUCED BY ANALOG SWITCHES

**Abstract** – The article provides a summary of the studies the distortions introduced by the analog switch. A comparative analysis of compensation schemes distortion in static and dynamic modes of operation keys. Recommendations on the use of non-linear distortion compensation schemes introduced by analog switches are given.

V. Makarenko

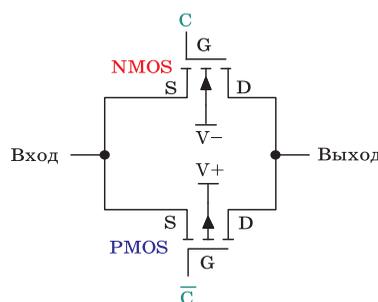


Рис. 1. Структурная схема аналогового ключа

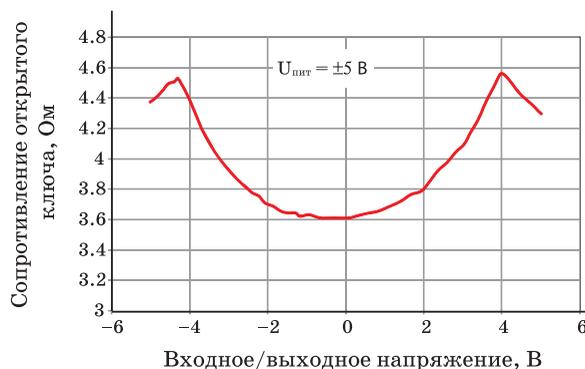


Рис. 2. Зависимость сопротивления открытого ключа от амплитуды коммутируемого напряжения

противления нагрузки, включенной на выходе ключа, воспользуемся простой моделью (рис. 3). В программе NI Multisim есть достаточно большой выбор ИМС аналоговых ключей различных производителей. Так в 12-й версии программы в библиотеке Mixed их насчитывается 230 наименований, а в 14-й версии – 357. Т.е.

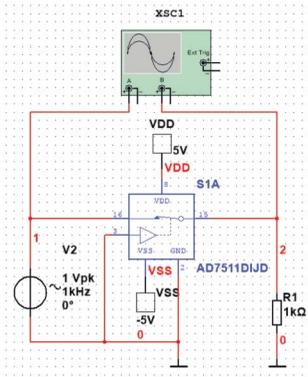


Рис. 3. Модель для исследования искажений, вносимых ключом AD7511 (Analog Devices)

выбор достаточно широк.

Проведем исследование ключа с помощью Фурье-анализа в точке 2 (точка соединения выхода ключа с нагрузкой) при фиксированной величине входного напряжения, равной 1 В, различных значениях сопротивления нагрузки и частоты сигнала. Кроме спектра сигнала в выбранной для анализа точке в результате анализа рассчитывается и значение коэффициента гармоник (THD на рис. 4). Результаты моде-

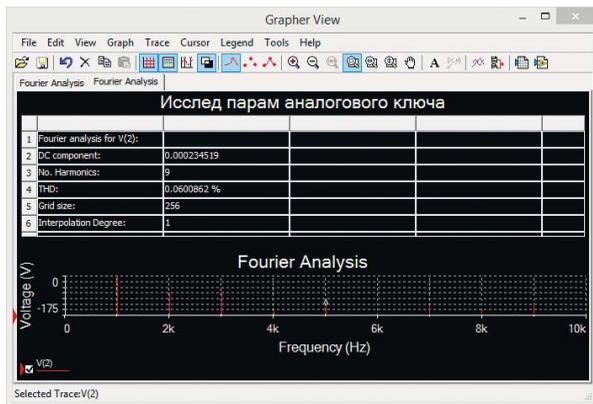


Рис. 4. Результаты анализа искажений, вносимых ключом AD7511, при сопротивлении нагрузки 1 кОм

лирования сведены в табл. 1.

Закономерность изменения  $K_r$  от сопротив-

Таблица 1. Зависимость искажений, вносимых ключом AD7511, от сопротивления нагрузки и частоты сигнала

$f_{вх}$ , кГц	1			3			10		
$R_H$ , кОм	0.1	1	10	0.1	1	10	0.1	1	10
$K_r$ , %	0.51	0.06	0.0072	0.51	0.06	0.0072	0.51	0.06	0.0072

ления нагрузки аналогична приведенной в [1].

Для сравнения параметров различных типов ИМС аналоговых ключей были проведены измерения искажений, вносимых ключами ADG723 ( $K_r=0.0107\%$  при  $R_H=1$  кОм и  $K_r=0.001\%$  при  $R_H=10$  кОм), ADG783 ( $K_r=0.012\%$  при  $R_H=1$  кОм), DG411 производства Intersil ( $K_r=0.015\%$  при  $R_H=1$  кОм).

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что характеристики различных аналоговых ключей очень похожи и характер изменения искажений при изменении сопротивления нагрузки совпадает. При уменьшении сопротивления нагрузки в 10 раз во столько же раз увеличивается коэффициент гармоник.

Для компенсации искажений в [1] предложено включить аналоговый ключ в цепь обратной связи операционного усилителя, как показано на рис. 5.

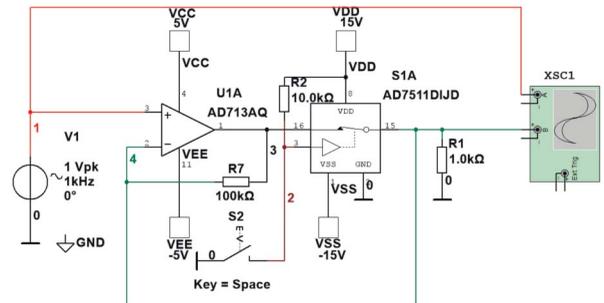
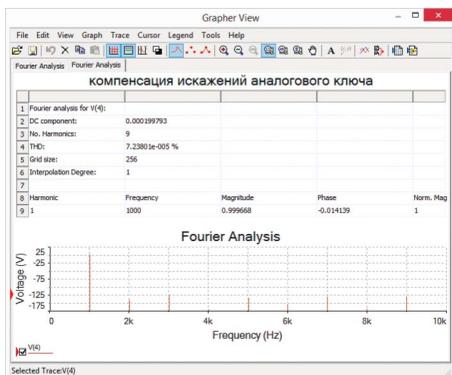


Рис. 5. Схема включения аналогового ключа AD7511 для компенсации искажений

Результаты испытаний показали, что коэффициент гармоник на выходе такой схемы не превышает  $7,23 \cdot 10^{-5}\%$  (рис. 6), т.е. введение ключа AD7511 [2] в цепь ООС операционного усилителя AD713 [3] позволяет снизить коэффициент гармоник почти в 1000 раз.

Для проверки влияния параметров ОУ на получаемый результат были проведены испытания схемы (рис. 5) с ОУ типа ADA4075 [4]. В

результате получен  $K_r = 0.0001245\%$ , т.е. параметры самого ОУ существенно влияют на полученный результат. При использовании ОУ HA7-2850-9 (HA2850 Intersil)  $K_r = 6,396 \cdot 10^{-5}\%$ .



**Рис. 6. Результаты анализа искажений, вносимых ключом AD7511, в схеме с компенсацией искажений**

Сравним основные параметры ОУ AD713, ADA4075 и HA2850 [5] (табл. 2).

Из сравнения этих параметров можно сделать вывод о том, что скорость нарастания выходного напряжения в значительной мере влияет на эффективность компенсации искажений.

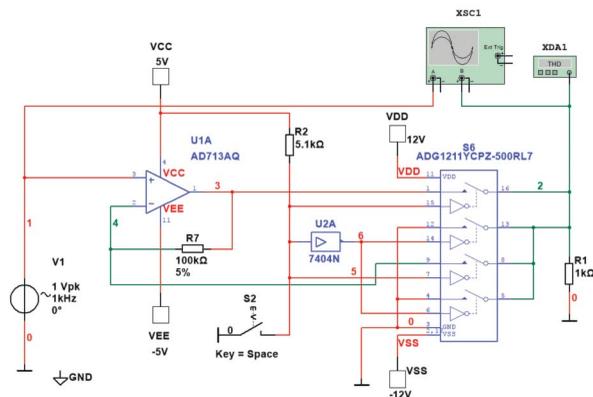
Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что искажения аналоговых ключей могут быть в значительной степени скомпенсированы включением в цепь обратной связи ОУ. Но возникает другая проблема. При разомкнутом ключе уровень прохождения сигнала становится недопустимо большим.

Исследование прямого прохождения сигнала через отдельно включенный ключ AD7511 показало, что при разомкнутом ключе, сопротивлении нагрузки 1 кОм, частоте входного

сигнала 1 кГц и входном сигнале 1 В на выход проходит сигнал с уровнем 20 мкВ, что соответствует затуханию 94 дБ.

При тех же параметрах сигнала и включения ключа в цепь ОС ОУ уровень ослабления сигнала составляет всего 32 дБ, что делает практически непригодной такую схему.

Для устранения этого недостатка необходимо использовать схему с коммутацией входа и выхода ОУ, как показано на рис. 7.



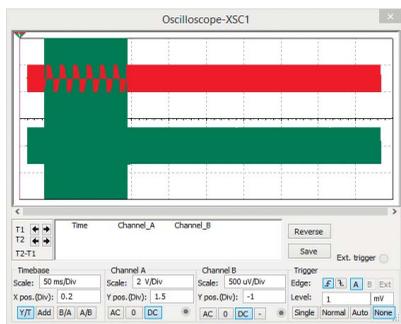
**Рис. 7. Увеличение переходного затухания закрытого ключа в схеме с компенсацией искажений**

Из-за отсутствия в базе элементов Multisim ключей AD7512 (4 группы на переключение) эксперимент проведем с ключом ADG1211 [6]. На рис. 8 приведены осциллограммы сигнала на входе и выходе ключа в двух режимах работы – открытом и закрытом ключе.

Из рис. 8 следует, что размах сигнала на выходе при разомкнутом ключе составляет 800 мкВ, а размах входного сигнала – 2 В. Откуда несложно вычислить величину затухания, вносимого ключом, которая составляет 68 дБ. Этот же ключ без схемы компенсации нели-

**Таблица 2. Сравнение основных параметров ОУ типа AD713, ADA4075 и HA2850**

Параметр	AD713	ADA4075	HA2850
Уровень нелинейных искажений ИМС, %	0.0003	0.0002	0.02
Полоса пропускания, МГц	4	6.5	470
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	20	12	340
Коэф. усиления без ОС на частоте 1 кГц, дБ	70	75	80
$K_r$ в схеме компенсации искажений ключа AD7511, %	$7,23 \cdot 10^{-5}$	$1.25 \cdot 10^{-4}$	$6,396 \cdot 10^{-5}$



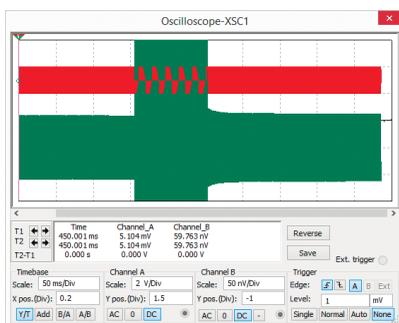
**Рис. 8. Измерение переходного затухания закрытого ключа ADG1211 в схеме с компенсацией искажений**

нейных искажений обеспечивает переходное затухание 58.4 дБ.

Этот анализ показывает, что такое включение существенно увеличивает переходное затухание ключа, даже по сравнению с отдельно взятым ключом без схемы компенсации нелинейных искажений. Но переходное затухание 68 дБ величина недостаточная для высококачественных систем обработки звука и звукоусиления.

Поэтому проведем еще несколько экспериментов с другими моделями ключей. ИМС ADG513 обеспечивает переходное затухание 72 дБ (при таких же значениях испытательных сигналов и используемого ОУ, как и при испытаниях ADG1211). Результат ожидаем, так как ключи ADG1211 и ADG513 имеют сходные характеристики.

А вот испытания модели ключа DG303 [7] (Intersil) показали значительно лучший результат. Переходное затухание составило 144 дБ (рис. 9). Размах сигнала на выходе разомкну-



**Рис. 9. Измерение переходного затухания закрытого ключа DG303 в схеме с компенсацией искажений**

того ключа составил 120 нВ.

Этот же ключ без схемы компенсации искажений обеспечивает переходное затухание 117 дБ, что является очень хорошим результатом. Результат проверки искажений также подтвердил отличный результат – коэффициент гармоник составил  $4.904 \cdot 10^{-5}\%$ . При испытаниях был использован ОУ типа LM7301 (собственный коэффициент гармоник 0.006%). Для сравнения коэффициент гармоник с ОУ типа AD713 составил в этой схеме  $6.3 \cdot 10^{-5}\%$ .

Остается только выяснить какие параметры аналоговых ключей определяют величину переходного затухания разомкнутого ключа. Для этого сопоставим параметры ключей ADG1211 и DG303. Они весьма похожи. Например, сопротивление открытого ключа ADG1211 составляет 150 Ом, а DG303 – 75 Ом. Но в то же время сопротивление открытого ключа ADG513 составляет 50 Ом, а результат значительно хуже. Т.е. напрямую, исходя из параметров ключа, определить какой из них обеспечит лучший результат невозможно. Скорее всего эти характеристики зависят от топологии схемы ключа, которая в технической документации не приводится. Следовательно, следует подбирать ключ либо экспериментально, либо проводить моделирование и искать наиболее подходящий вариант.

Для более полного представления о свойствах такой схемы компенсации искажений необходимо проверить ее на различных частотах входного сигнала и проанализировать ее работу в динамическом режиме.

Нелинейные искажения схемы с ключом DG303 составляют  $5.76 \cdot 10^{-5}\%$  на частоте 10 кГц.

Для проверки поведения схемы в динамическом режиме в нее введен генератор импульсов для управления ключом (рис. 10). Результаты работы схемы можно увидеть на рис. 11.

Как следует из рис. 11, переходные процессы практически незаметны и для звуковых сигналов никакого значения не имеют. Более точный анализ переходных процессов с помощью Transient Analysis показал, что время переходных процессов составляет примерно 100 нс (рис. 12).

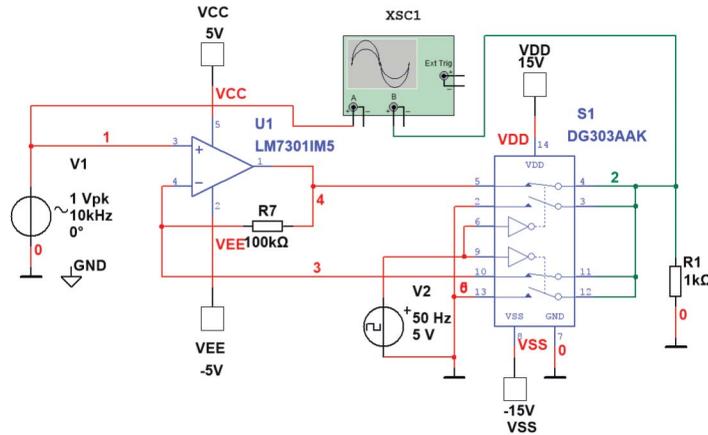


Рис. 10. Схема для исследования аналогового ключа DG303 в динамическом режиме

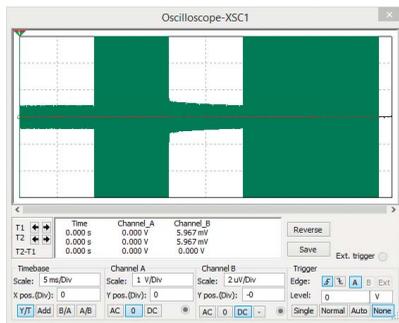


Рис. 11. Осциллограмма сигнала на выходе ключа DG303

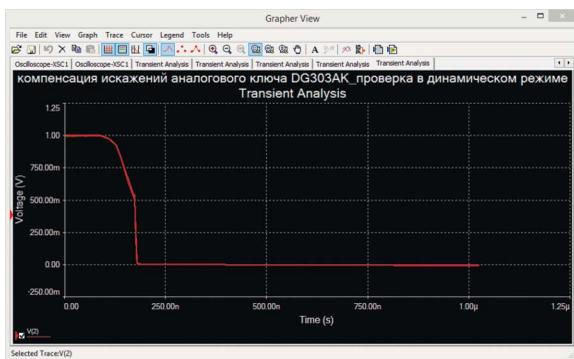


Рис. 12. Результаты анализа переходных процессов на выходе ключа DG303

### ВЫВОДЫ

1. Проведенные эксперименты показывают, что параметры аналоговых ключей могут быть значительно улучшены путем включения их в цепь обратной связи операционного усилителя.

2. При выборе ОУ для построения схемы компенсации нелинейных искажений предпочтение следует отдавать широкополосным маломощным усилителям с высокой скоростью нарастания выходного напряжения.

3. По характеристикам, приведенным в технической документации на аналоговые ключи, невозможно определить или спрогнозировать какой из них обеспечит наилучшие характеристики. Поэтому для выбора ИМС ключей и ОУ необходимо либо провести моделирование схемы с различными ключами, либо провести экспериментальные исследования с использованием различных ключей, что значительно более трудоемко.

### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Caldwell Reducing distortion from CMOS analog switches / Analog Applications Journal, AAJ 1Q 2015, p. 4-7.
2. [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7510DI\\_7511DI\\_7512DI.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7510DI_7511DI_7512DI.pdf).
3. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD713.pdf>.
4. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4075-2.pdf>.
5. [http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/208/56675\\_DS.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/208/56675_DS.pdf).
6. [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG511\\_512\\_513.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG511_512_513.pdf).
7. [http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/90/494429\\_DS.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/90/494429_DS.pdf).