

**АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ**

*Проанализирована применимость преобразователей различного типа в системах активного управления акустическими полями. Рассмотрены особенности реализации и параметры параллельных и сигма-дельта преобразователей. Проанализированы особенности обоих типов преобразователей и их влияние на качественные характеристики систем активного гашения акустического шума. Показано, что, несмотря на невысокие технические характеристики, параллельные преобразователи имеют ряд преимуществ при работе в составе реальных систем активного гашения акустического шума.*

Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП/ЦАП) используются в системах активного гашения (САГ) шума и вибраций для ввода и вывода сигналов на элементы приемно-измерительного блока. Системы активного гашения шума являются системами управления в реальном времени и все шире используются для защиты человека и технических систем от интенсивных акустических и вибрационных воздействий (активные системы снижения шума на транспорте, в системах вентиляции, активные системы виброзащиты для высокоточного оборудования и т.д.). Принцип функционирования таких систем состоит в непрерывной регистрации и анализе входного шумового сигнала и выработке управляющего воздействия, противофазного исходному. Эффективность работы САГ во многом зависит от качественных характеристик регистрации сигнала и формирования управляющих воздействий, поэтому выбору и моделированию АЦП/ЦАП при синтезе САГ придается важное значение. Для лучшего понимания принципов работы преобразователей, их влияния на характер работы САГ в реальном времени и реально достижимое качество гашения (достигнутое снижение уровня звукового давления или вибрации в заданной точке) рассмотрим принципы работы САГ как на уровне модельной проработки, так и на уровне элементной реализации.

Несмотря на то, что частоты сигналов управления САГ достаточно низки (в большинстве случаев 20...1000Гц), тем не менее, для сохранения достаточной точности при операциях аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования требуется обработка данных с частотой дискретизации не менее 8...12кГц и числом разрядов не менее 14...16 [1]. Выбор разрядности и тактовой частоты обусловлен тем

фактом, что при указанных параметрах АЦП/ЦАП обеспечивается реальное отношение сигнал/шум порядка 60...75 дБ в полосе до 1 кГц. При учете роста шумов квантования с понижением уровня сигнала достаточная точность преобразования сохраняется при уровне входного сигнала приблизительно до –50 дБ. Однако даже современные параллельные АЦП имеют разрядность 12...14 бит.

Здесь необходимо учитывать, что САГ, как правило, работают лишь в узком участке динамического диапазона — в верхней его части и собственный динамический диапазон системы не превышает 40 дБ. Современные аналоговые узлы системы имеют более широкий динамический диапазон, и для подавления шумов преобразования, неизбежно возникающих при более низких уровнях внешнего сигнала, необходимо применение специальных мер (например, режима “gate” в предварительных каскадах усиления).

При выборе преобразователей для САГ можно руководствоваться соответствующими оценками метрологических характеристик, которые регламентируются ГОСТ 24736–81, ОСТ 1100783–84 и др. Сюда входят: число разрядов, время преобразования, нелинейность и дифференциальная нелинейность, амплитудно-частотная характеристика. Однако при работе в составе САГ к преобразователям предъявляется ряд дополнительных требований, определяющих такие параметры САГ, как максимальное качество гашения в заданной полосе частот, уровень вносимых шумов за пределами полосы подавления, динамический и частотный диапазоны устойчивости системы. Эти требования обусловлены работой САГ в реальном режиме времени, влиянием шумов квантования преобразователей на работу адаптивных алгоритмов и реакцией системы на импульсные и случайные сигналы.

К числу этих дополнительных параметров можно отнести:

*время преобразования  $t_{пр}$*  — интервал времени от начала преобразования АЦП/ЦАП до появления на выходе кода или тока (напряжения), соответствующего входному воздействию. Определяется типом преобразователя и наличием/отсутствием схемы выборки/хранения;

*число эффективных разрядов  $N_{эфф}$*  учитывает все виды погрешностей преобразования. Любые ошибки преобразователя, обусловленные дифференциальной и интегральной нелинейностями, пропуском кодов выступают как составляющие некоторой суммарной среднеквадратической погрешности. На этот параметр определяющее влияние оказывают тип используемого преобразователя и внешние элементы обвязки;

*переходную характеристику  $g(t)$* , определяющую реакцию преобразователя на скачок напряжения единичной амплитуды. Зависит

от типа преобразователя и параметров применяемых аналоговых и цифровых низкочастотных (НЧ) фильтров.

В настоящее время в составе блока преобразователей САГ чаще всего применяются следующие типы АЦП:

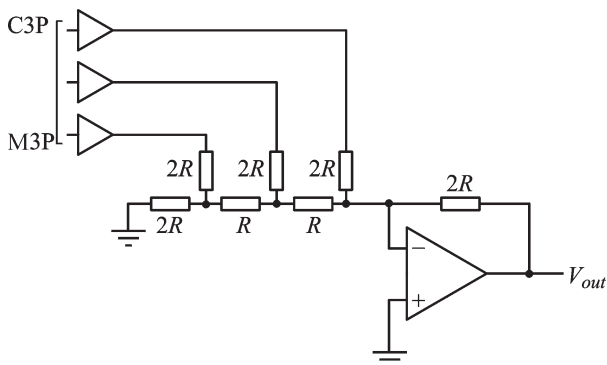
— *параллельные АЦП*, в которых входной сигнал одновременно сравнивается с эталонными уровнями линейки компараторов, формирующих на выходе двоичный код. В таком АЦП число компараторов равно  $2^N - 1$ , где  $N$  — разрядность цифрового кода. Недостатком АЦП данного типа является необходимость увеличения в 2 раза числа компараторов для каждого следующего разряда точности. Для 4-разрядного АЦП необходимо 16 компараторов, для 12-разрядного — 4096.

— *sigma-delta АЦП* как вариант АЦП, работающего на частоте  $F_s$ , значительно (в 64 раза и более) превышающей частоту дискретизации  $F_d$  выходного цифрового сигнала. Компаратор такого АЦП выдает значения пониженной разрядности (обычно однобитовые), сумма которых в интервале дискретизации  $F_d$  пропорциональна величине отсчета. Последовательность однобитовых значений подвергается цифровой фильтрации и понижению частоты квантования (децимация), в результате чего получается серия отсчетов с заданной разрядностью и частотой дискретизации  $F_d$ .

Современные ЦАП в основном строятся по трем схемам:

— *взвешивающие ЦАП* с суммированием взвешенных токов или напряжений, когда каждый разряд входного слова вносит соответствующий своему двоичному весу вклад в получаемый аналоговый сигнал; такие ЦАП называют также параллельными или многоразрядными (multibit) (рис. 1);

— *sigma-delta ЦАП* с предварительной интерполяцией и выдачей малоразрядных (обычно однобитовых) значений на схему формирования эталонного заряда, которые со столь же высокой частотой добавляются к выходному сигналу. Такие ЦАП также называются bitstream.



**Рис. 1. Структура параллельного ЦАП с резистивной матрицей R-2R**

— ЦАП с *широтно-импульсной модуляцией* (ШИМ). На схему выборки/хранения аналогового сигнала выдаются импульсы постоянной амплитуды и переменной длительности. На этом принципе основана работа преобразователей MASH (Multi-stage Noise Shaping — многокаскадное формирование шума) фирмы Matsushita. Свое название эти ЦАП получили из-за применения в них нескольких последовательных каскадов формирования шума.

Основой работы сигма-дельта преобразователей является использование выборки с запасом по частоте. Интерполяция может быть аналоговой, когда с повышенной частотой делаются выборки исходного сигнала, или цифровой, когда между уже существующими цифровыми отсчетами вставляются дополнительные, рассчитанные путем интерполяции. Другой способ получения значений промежуточных отсчетов состоит во вставке нулей, после чего вся последовательность подвергается цифровой фильтрации, за счет чего достигается сглаживание формы сигнала без улучшения разрешения по частоте. Изначально интерполяция использовалась для снижения требований к аналоговому входному/выходному фильтру. При повышении частоты дискретизации зеркальные частоты пропорционально отодвигаются от основного сигнала, и аналоговый фильтр может иметь гораздо меньшую крутизну среза. Другое преимущество интерполяции состоит в том, что ошибки амплитудного квантования (шум квантования), распределенные по всему спектру квантуемого сигнала, при повышении частоты дискретизации распределяются по более широкой полосе частот, так что на долю основной полосы приходится меньшее количество шума. Собственная мощность шума квантования определяется по формуле [2]

$$\sigma_c^2 = \frac{\Delta^2}{12},$$

где  $\Delta$  — шаг квантования. При относительно больших амплитудах входного сигнала энергия шума квантования равномерно распределяется по всему спектру от 0 до  $F_s/2$ . В этом случае спектральная плотность мощности шума квантования  $P_c(f)$  задается как

$$P_c(f) = \frac{\sigma_c^2}{F_s},$$

где  $F$  — частота квантования (рис. 2).

Таким образом, эффективное отношение сигнал/шум преобразователя можно увеличить, повышая частоту дискретизации и используя методы формирования шума, что позволяет распределить энергию шума по более широкой полосе частот и снизить уровень шума в полосе  $0 \dots F_s/2$ . Каждое удвоение частоты дискретизации снижает уровень шума квантования на 3 дБ; поскольку один двоичный разряд

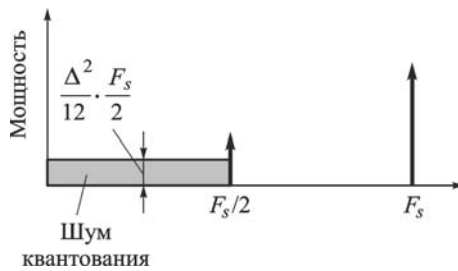
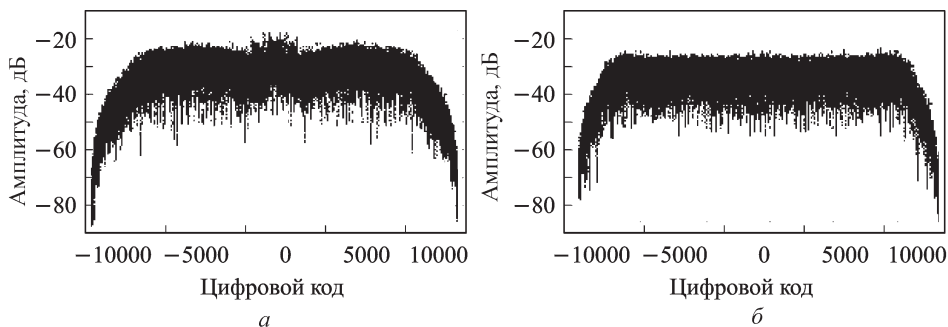


Рис. 2. Снижение шумов квантования с помощью интерполяции

эквивалентен 6дБ шума, то каждое учетверение частоты позволяет уменьшить разрядность преобразователя на единицу. Интерполяция вместе с увеличением разрядности отсчета, интерполяцией отсчетов с повышенной точностью и выводом их на ЦАП надлежащей разрядности позволяет несколько повысить отношение сигнал/шум. По этой причине даже в 16-разрядных системах нередко применяются 18- и 20-разрядные ЦАП совместно с цифровыми фильтрами, осуществляющими интерполяцию. Однако при работе со случайными и псевдослучайными сигналами сигма-дельта преобразователи заметно уступают параллельным, поскольку несут заложенный в самом принципе преобразования недостаток — изменение статистических параметров сигнала на этапе преобразования, что, в принципе, несущественно при работе с детерминированными сигналами, но нежелательно при работе со случайными сигналами, которыми по своей сути являются сигналы управления в САГ.

При повышении тактовой частоты в десятки раз (обычно от 64 до 512) становится возможным уменьшить разрядность ЦАП без ощутимой потери качества сигнала; ЦАП с меньшим числом разрядов имеет также лучшую линейность на детерминированных сигналах [3]. В пределах число разрядов может быть сведено к одному. Форма выходного сигнала таких ЦАП представляет собой полезный сигнал, обрамленный значительным высокочастотным шумом, который подавляется аналоговым фильтром. В отличие от простого широкополосного шума, вносимого ошибками квантования, шум квантования представляет собой гармонические искажения сигнала, наиболее заметные в верхней части спектра. Искажения, вносимые шумом квантования, можно уменьшить, добавляя к сигналу обычный белый шум (случайного или псевдослучайного сигнала) с амплитудой в половину младшего значащего разряда; такая операция называется дизеринг (dithering) (рис. 3, а, б). Это приводит к незначительному увеличению уровня шума, зато ослабляет корреляцию ошибок квантования с высокочастотными компонентами сигнала. Дизеринг применяется также перед округлением отсчетов при уменьшении их разрядности (например, при цифровой фильтрации).



**Рис. 3.** Уменьшение искажений, вносимых шумом квантования (а), за счет использования дизеринга (б)

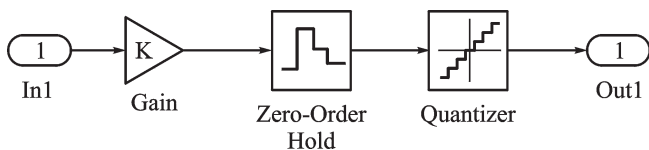
Для улучшения отношения сигнал/шум и снижения влияния ошибок квантования, которое в случае 1-разрядного преобразователя получается довольно высоким, также применяется метод формирования шума через схемы обратной связи по ошибке и цифровой фильтрации. В результате применения этого метода основная энергия шума вытесняется в область, выше половины частоты  $F_s$ , и практически весь шум удаляется из полосы исходного аналогового сигнала.

По существу дизеринг и формирование шума являются частными случаями одной технологии с той разницей, что в первом случае используется белый шум с равномерным спектром, а во втором — шум со специально сформированным спектром.

Для оценки степени применимости двух наиболее распространенных сегодня типов преобразователей (параллельных и сигма-дельта) в САГ рассмотрим их параметры, учитывая предъявляемые требования. Сравнение параметров целесообразно проводить как с использованием результатов экспериментальных исследований, так и с помощью математических моделей в среде MATLAB [4].

Смоделируем простейший параллельный АЦП (рис. 4).

Функционально модель включает в себя блок предварительного усиления (Gain), блок выборки/хранения (Zero-Order Hold) и блок квантования по уровню (Quantizer). Блок предварительного усиления необходим для приведения уровня входных сигналов к максимальному для блока квантования (до ограничения) размаху  $\pm 1$ . В свойствах блоков выборки/хранения и квантования по уровню можно задать частоту дискретизации. В данной версии MATLAB разработанная структура имеет число эффективных разрядов, эквивалентное 16 битам.



**Рис. 4.** Модель параллельного АЦП в среде MATLAB

Параметры схемы выборки/хранения во многом определяют задержку  $\tau$ , вносимую АЦП/ЦАП при преобразовании. Для параллельных ЦАП при сравнении его выхода  $y(t)$  и входа  $y(\tau t)$  становится очевидным, что для каждого цифрового кода его выход задерживается на  $\tau$  (один такт), т.е.  $\tau = 1/F_d$ , — ЦАП имеет задержку нулевого порядка.

В частотных координатах задержка преобразования вносит частотные искажения по закону  $\sin x/x$ , где  $x = \omega\tau/2$ , или апертурные искажения. Среднюю ошибку, вносимую этим видом искажений, при заданной частоте можно оценить в процентном отношении следующим образом:

$$(1 - \sin x/x) \times 100 \%$$

Для задержки нулевого порядка функция  $\sin x/x$  спадает приблизительно на 4 дБ на частоте  $F_s/2$ , что дает среднюю ошибку приблизительно в 36 %. Апертурную ошибку можно скомпенсировать с помощью внешней частотной коррекции.

Модель сигма-дельта АЦП с 64-кратной интерполяцией (рис. 5) функционально состоит из следующих блоков:

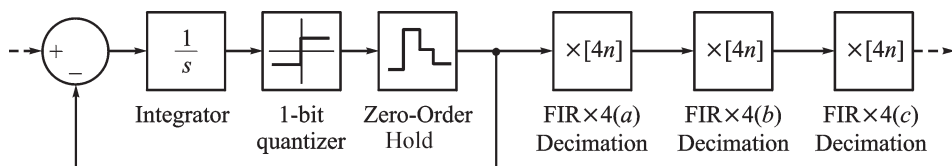
- разностного блока;
- интегратора (Integrator);
- компаратора (1-разрядного АЦП) (1-bit quantizer);
- блока выборки/хранения (Zero-Order Hold);
- блоков децимации (Decimation), осуществляющих поблочное последовательное 4-кратное прореживание входного сигнала и включающих в себя НЧ КИХ-фильтр.

Как было указано ранее, одними из важнейших параметров преобразователей, влияющим на эффективность работы всей САГ в целом, являются вносимые ими задержки сигнала.

Все возникающие на этапе обработки сигнала задержки можно разделить на три группы (рис. 6):

- задержки блока обработки ( $\tau_0$ );
- задержки объекта управления ( $\tau_y$ );
- задержки АЦП и ЦАП ( $\tau_{пр}$ ).

Очевидно, что задержка  $\delta_p$  мало зависит от применяемых типов компенсаторов и датчиков, т.е.  $\delta_p$  можно считать константой. Задерж-



**Рис. 5. Модель сигма-дельта АЦП в среде MATLAB**

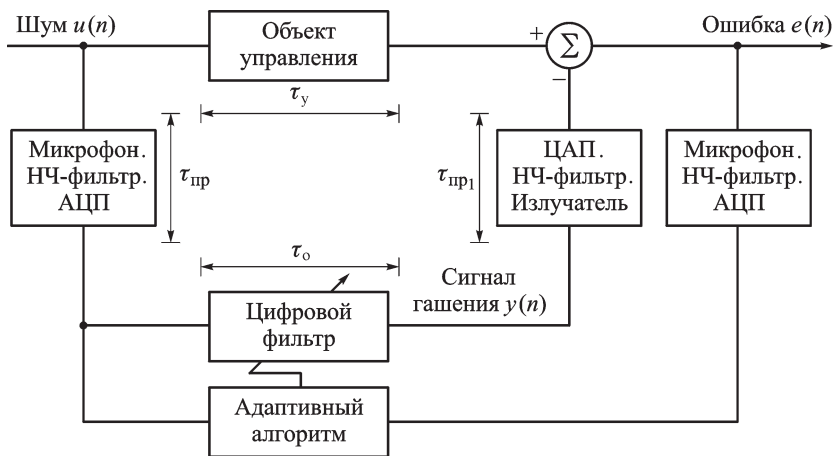


Рис. 6. Распределение задержек сигнала в обобщенной модели САГ

ки сигнала, вносимые блоком управления, определяются производительностью используемых средств цифровой обработки и вычислительными требованиями алгоритмов. Если производительность аппаратных вычислительных средств напрямую зависит от достигнутого при их производстве технологического уровня, то выбор тех или иных алгоритмов является многокритериальной задачей и требует проведения всестороннего анализа. Используя упрощенные алгоритмы, можно уменьшить задержки, но увеличить время сходимости или снизить качество гашения.

С помощью созданных в среде MATLAB моделей оценим вносимые обоими типами преобразователей задержки. Для этого подадим на их входы последовательность прямоугольных импульсов с частотой следования 700 Гц. Результат преобразования можно контролировать на экране виртуального осциллографа (рис. 7, 8).

Результаты моделирования показывают, что преобразователи параллельного типа имеют существенно меньшее время преобразования по сравнению с сигма-дельта преобразователями. Если для параллельных преобразователей время преобразования не превышает одного отсчета, то для сигма-дельта преобразователя оно составляет около 100 мкс. Это подтверждается и экспериментально — для сигма-дельта АЦП при тактовой частоте 32 кГц задержка составляет около 4 отсчетов, т.е. 125 мкс. Это значение определяется помимо тактовой частоты одноразрядного преобразователя, также и порядком НЧ-фильтра в блоке децимации.

Что касается числа эффективных разрядов, определяемого экспериментально из соотношения сигнал/шум преобразователя, то здесь, если не принимать во внимание элементы обвязки, на первый план выходят три составляющие (рис. 9): шумы квантования, интермодуляция и джиттер.



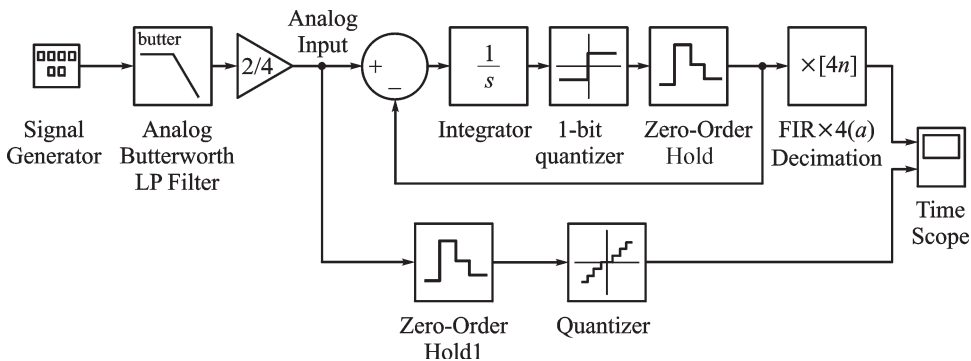


Рис. 7. Модель для исследования задержки преобразования АЦП

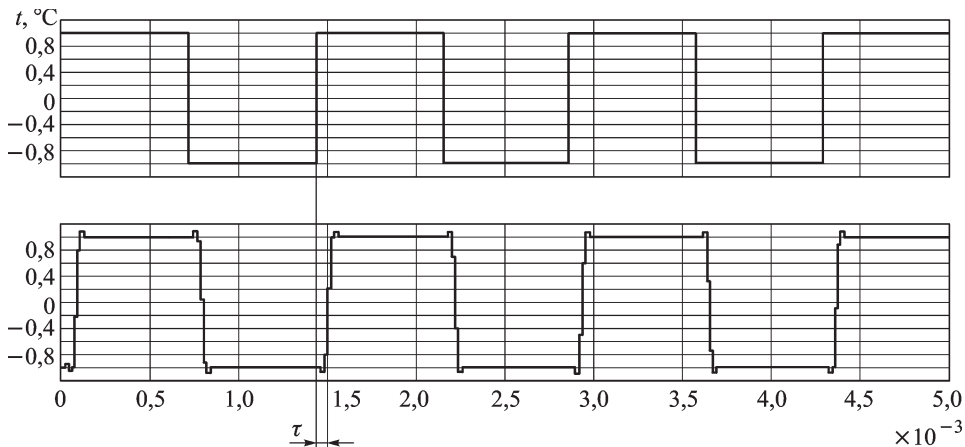


Рис. 8. Результаты оцифровки тестового сигнала преобразователями различного типа

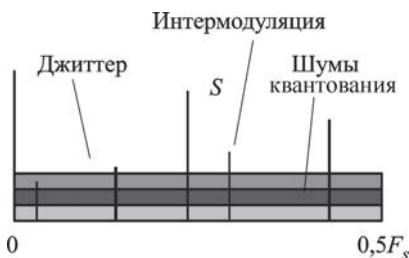
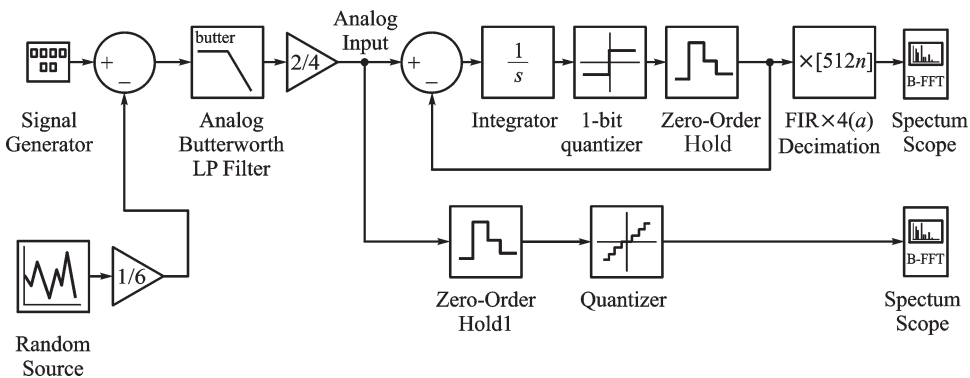


Рис. 9. Состав шумов преобразования

Рассмотрим специфику каждой составляющей применительно к параллельным и сигма-дельта преобразователям.

Шум квантования определяет теоретический предел точности преобразования и зависит от числа разрядов, т.е. от размера шага разрядной сетки преобразователя. Интермодуляционные искажения обусловлены взаимодействием полезного сигнала с зеркальными частотами, кратными  $F_s$ , и приводят к появлению в спектре оцифрованного сигнала большого числа комбинационных частот. Проведем оценку шума квантования и интермодуляционных искажений с помощью разработанных в MATLAB моделей (рис. 10).

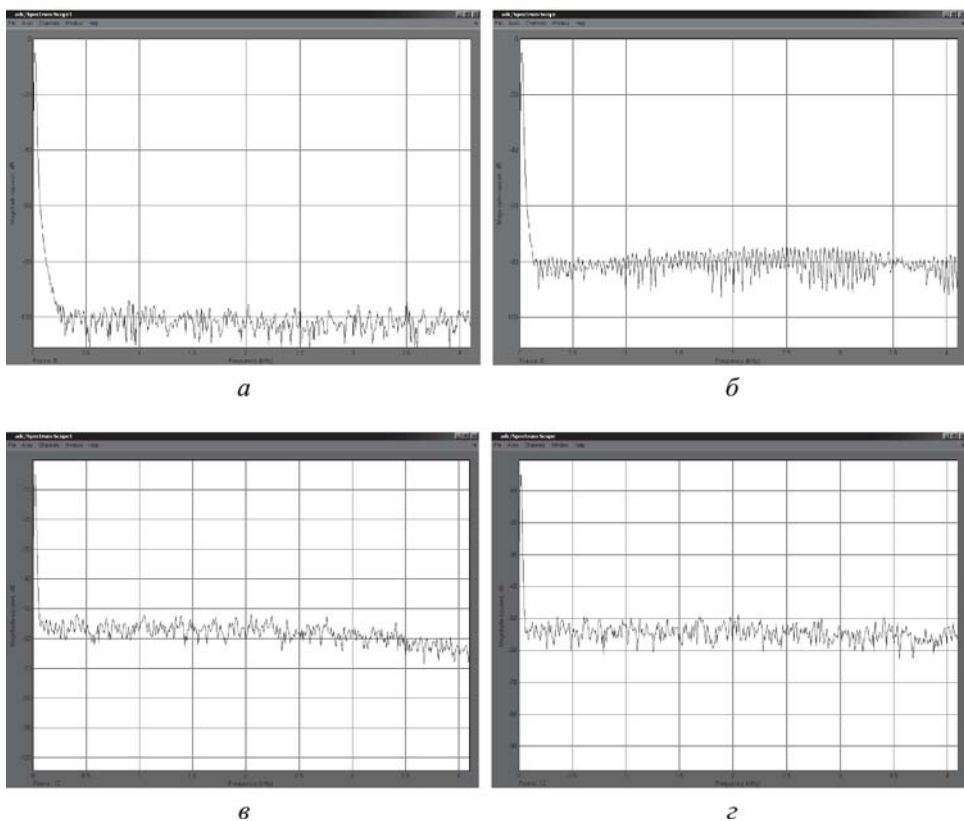
В данном случае реализована модель сигма-дельта преобразователя с тактовой частотой 2,048 МГц и 512-кратной децимацией. Результаты моделирования при наличии только узкополосного синусои-



**Рис. 10. Модель для оценки уровня шумов квантования и интермодуляционных искажений**

дальнего сигнала 20 Гц с относительным уровнем  $-6$  дБ показаны на рис. 11, а, б.

Спектр параллельного АЦП без интерполяции близок к белому шуму с максимальным относительным уровнем  $-95$  дБ, близким к теоретическому пределу. В спектре же сигма-дельта АЦП, несмотря



**Рис. 11. Спектр шумов квантования и интермодуляционных искажений параллельного (а, в) и сигма-дельта (б, г) АЦП при наличии узкополосного (а, б) и широкополосного псевдослучайного (в, г) сигналов**

на высокий порядок НЧ КИХ-фильтра в блоке децимации (200), заметен ряд комбинационных частот с плотным спектром и относительным уровнем  $-76$  дБ. Несколько другая картина наблюдается при подмешивании к синусоиде  $20$  Гц псевдослучайного сигнала с полосой  $0 \dots F_s/2$  и амплитудой  $-50$  дБ (рис. 11, в, з).

В данном случае спектр шума обеих реализаций не имеет ярко выраженных составляющих, однако если для параллельного АЦП относительный уровень не превышает  $-53$  дБ при выраженной зависимости  $\sin x/x$ , то для сигма-дельта АЦП он равен  $-47$  дБ. Таким образом, очевидно, что если при наличии случайной составляющей в полезном сигнале отношение сигнал/шум для параллельных и сигма-дельта преобразователей различается на  $6$  дБ, то на детерминированных сигналах разница превышает  $12$  дБ, что эквивалентно уменьшению числа эффективных разрядов более чем на  $2$ . Таким образом, на низкочастотных сигналах для сигма-дельта преобразователей с эквивалентным числом разрядов  $16$  число эффективных разрядов не превышает  $14$ .

Случайный сигнал при восстановлении из цифровой последовательности дельта-сигма демодулятором меняет статистические характеристики и обогащается модуляционным шумом, который коррелирован с самими сигналом. Преобразователи параллельной структуры лишены указанных недостатков по принципу своей работы, но имеют очень существенный с точки зрения фирм-производителей недостаток — большую себестоимость ввиду сложности изготовления и настройки кристалла. Поэтому такие микросхемы вытесняются из производственных программ даже крупных фирм.

Рассмотрим далее влияние джиттера на точность преобразования. Эта проблема не раз поднималась в литературе, но, как правило, применительно к высокочастотным системам, где значения джиттера сравнимы с временем преобразования, например в телекоммуникации. В НЧ прецизионных преобразователях этот параметр зачастую не рассматривается как влияющий на точность преобразования, однако, как будет показано далее, это совсем не так.

При временной и амплитудной дискретизациях энергия сигнала передается импульсами с периодом следования для формата CD-DA  $22,67$  мкс. При этом, если считать период следования импульсов постоянным, вносится ошибка квантования, равная половине младшего значащего разряда. Предельное значение джиттера, приводящее к ошибке в  $1$  младший значащий разряд, вычисляется как пиковое значение временной нестабильности (джиттера) момента преобразования

$$T_{\max} = \arcsin \frac{1}{2^n f_{\max}}$$

где  $n_0$  — разрядность данных;  $f_{\max}$  — максимальная частота в спектре преобразованного сигнала. Нетрудно подсчитать, что при непосредственном использовании данных стандарта CD-DA (16 разрядов и полоса до 22,05 кГц) для сохранения младшего разряда допустим джиттер до 173 пс (рис. 12, а).

Это значение джиттера вполне достижимо в преобразователях без использования интерполяции. Например, джиттер системы, состоящей из цифрового приемника

DIR1703 Texas Instruments и параллельного ЦАП AD1866 Analog Devices не превышает 100 пс. При введении цифровой фильтрации с повышением разрядности до 20 бит и 8-кратной интерполяцией значение допустимого джиттера сокращается до 1,35 пс (рис. 12, б), что реально недостижимо в современных условиях, поскольку каждый из элементов цепочки приемник–цифровой фильтр–ЦАП имеет собственный джиттер, как минимум на порядок больший. К тому же необходимо учесть округление результатов интерполяции в цифровом фильтре. Даже при использовании специализированных ИМС для цифровой фильтрации, например SM5847 с внутренней разрядностью 32 бита, на выходе происходит округление результатов до 20 бит. В однокристалльных системах с интегрированным цифровым фильтром внутренняя разрядность, как правило, не превышает 20 бит. Таким образом, очевидно, что использование интерполяции при наличии джиттера приводит к значительному снижению разрешения преобразователя в области малых сигналов.

В заключение рассмотрим импульсную характеристику параллельных и сигма-дельта преобразователей. Поскольку в реальных САГ сигналы управления носят, как правило, случайный характер, то отклик на импульсные сигналы во многом определяет параметры системы в части устойчивости и эффективности. В параллельных преобразователях заметен дискретный характер преобразования при выводе синусоидальных сигналов (рис. 13), однако при наличии сглаживающего НЧ-фильтра и при работе в частотном диапазоне ниже  $F_s/20$  (типичный рабочий диапазон САГ) этот фактор можно не учитывать.

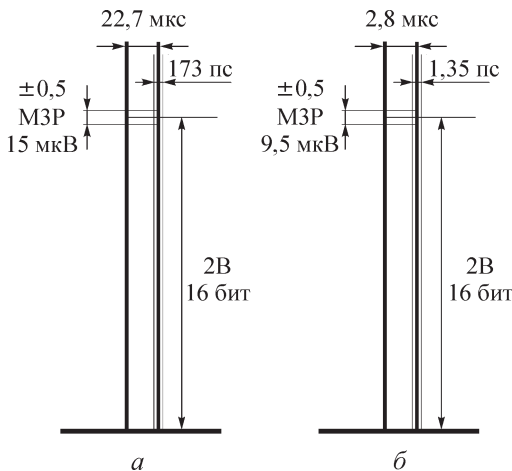


Рис. 12. Временные параметры работы 16-битового ЦАП без интерполяции (а) и 20-битового ЦАП с 8-кратной интерполяцией (б)



Рис. 13. Оциллограмма синусоиды 1 кГц на выходе параллельного ЦАП без интерполяции и аналоговой фильтрации

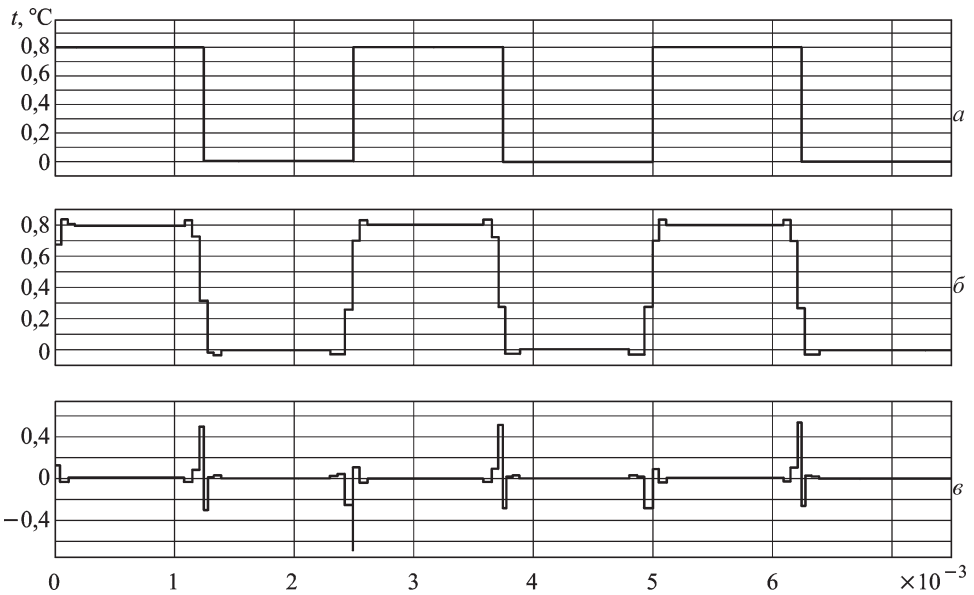


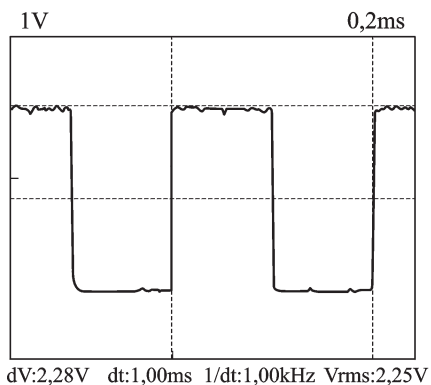
Рис. 14. Реакция преобразователей различного типа на импульсный сигнал

Для оценки импульсной характеристики преобразователей воспользуемся моделью, изображенной на рис. 10. В данном случае частота дискретизации составляет 8 кГц, частота следования импульсов 700 Гц (рис. 14, а).

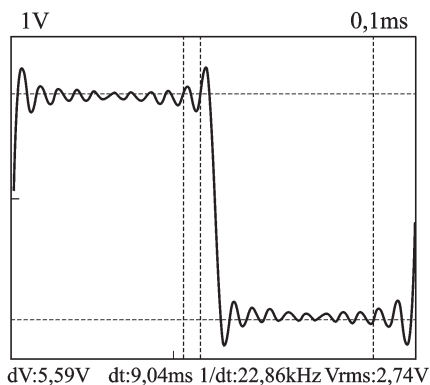
Как можно заметить, параллельный преобразователь не искажает форму сигнала (рис. 14, б). На выходе сигма-дельта преобразователя наблюдаются значительные выбросы как по переднему, так и по заднему фронтам, достигающие 5 % амплитуды импульсов (рис. 14, в). В данном случае результаты моделирования явно коррелируют с экспериментальными данными. На рис. 15 показаны оциллограммы вывода последовательности импульсов параллельным ЦАП без интерполяции и сигма-дельта ЦАП с 8-кратной интерполяцией.

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- параллельные преобразователи имеют переходную характеристику, близкую к идеальной, время установления не превышает 1...2 отсчета; переходная характеристика сигма-дельта преобразователей



*a*



*б*

**Рис. 15. Осциллограммы последовательности импульсов на выходе параллельного ЦАП без интерполяции (а) и сигма-дельта ЦАП с 8-кратной интерполяцией (б)**

имеет сложный вид, зависящий от целого ряда факторов (порядка формирователей шума, коэффициента интерполяции и т.д.), и в общем случае содержит пре- и постэхо;

— реальное отношение сигнал/шум у параллельных преобразователей в зависимости от характера сигнала на 5...10 дБ больше, чем у сигма-дельта преобразователей, что соответствует увеличению числа эффективных разрядов  $N_{эфф}$  на 1...2 разряда при равной эквивалентной разрядности;

— сигма-дельта преобразователи имеют время преобразования  $t_{пр}$ , равное 3...4 отсчетам; время преобразования параллельных АЦП/ЦАП составляет 1 отсчет.

Естественно, на фазовые и временные характеристики преобразователей значительное влияние оказывают параметры входного/выходного аналогового НЧ-фильтра. Для ЦАП без интерполяции от качества его исполнения, примененных компонентов и точности номиналов во многом зависит результирующее качество восстановления сигнала. Однако наиболее существенное влияние оказывает тип аппроксимации характеристики фильтра. В литературе этот вопрос рассмотрен весьма подробно [5], поэтому далее остановимся лишь на аспектах применимости тех или иных типов фильтров в составе блока преобразователей САГ.

Фазолинейные фильтры Бесселя обеспечивают требуемое затухание в полосе задержания лишь при высоком порядке (10...14) фильтра. Определение минимально необходимого порядка фильтра является многокритериальной задачей. Применительно к задаче активного гашения фильтры высокого порядка неприемлемы из-за значительных фазовых искажений на краю частотного диапазона и сложных переходных процессов. К тому же они требуют очень точного подбора элемен-

тов с минимальными допусками. Таким образом, при использовании преобразователей с высокой  $F_s$  или преобразователей с интерполяцией наиболее целесообразно использование фазолинейных фильтров Бесселя 4...7-го порядка, либо фильтров Баттерворта 3...4-го порядка в преобразователях с низкой тактовой частотой.

При работе САГ в диапазоне, меньшем  $F_s/20$ , возможно применение преобразователей без восстанавливающего фильтра. В таком режиме наиболее полно проявляются преимущества параллельных преобразователей по времени преобразования и импульсной характеристике. Необходимо лишь проконтролировать устойчивость последующих усилительных каскадов к высокому уровню ультразвуковых помех.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О л с с о н Г., П и а н и Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
2. А й ф и ч е р Э., Д ж е р в и с Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание / Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 992 с.
3. К а h r s М., В r a n d e n b u r g К. Application of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics. Kluwer Academic Publishers, New York, 2002. – 571 p.
4. Д ъ я к о н о в В. П. MATLAB 6.5+Simulink 5/6. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
5. Х о р о в и ц П., Х и л л У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 704 с.

Статья поступила в редакцию 26.02.2008

Станислав Григорьевич Семенцов родился в 1976 г., окончил Дагестанский государственный технический университет в 1998 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Конструирование и технология производства электронной аппаратуры” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 18 научных работ в области систем управления акустическими полями, цифровой обработки сигналов, электроакустики.

S.G. Semencov (b. 1976) graduated from the Dagestan State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Construction and Manufacturing Technology of Electronic Apparatus” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 18 publications in the field of systems of control of acoustic fields, digital signal processing, electroacoustics.