

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи в системах активного гашения

Аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи используются в системах активного гашения (САГ) для ввода и вывода сигналов на элементы приемно-измерительного блока. 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 величину реально достижимого качества гашения, рассмотрим принципы их работы, как на уровне модельной проработки САГ, так и на уровне элементной реализации.

Несмотря на то, что частоты сигналов управления САГ достаточно низки (в большинстве случаев 20-1000 Гц), тем не менее, для сохранения достаточной точности при операциях аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, требуется обработка данных с частотой дискретизации не менее 8-12 кГц и числе разрядов не менее 14-16. 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. Учитывая рост шумов квантования с понижением уровня сигнала, достаточная точность преобразования сохраняется при уровне входного сигнала приблизительно до -50 дБ. Однако даже современные параллельные аналого-цифровые преобразователи 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, режим 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 и фазочастотная характеристики (АЧХ и ФЧХ). 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.

К числу этих параметров можно отнести:

1. 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.

2. Число эффективных разрядов - ($N_{эф}$). Число эффективных разрядов учитывает все виды погрешностей преобразования. Любые ошибки преобразователя, обусловленные дифференциальной и интегральной нелинейностями, пропуском кодов выступают как составляющие некоторой суммарной среднеквадратической погрешности. Число эффективных разрядов можно вычислить по формуле: $N_{эф} = (C/Ш-1,76)/6,02$, получив экспериментально отношение сигнал/шум для данного преобразователя. На этот параметр определяющее влияние оказывают тип используемого преобразователя и внешние элементы обвязки.
3. Переходная характеристика $g(t)$ – определяет реакцию преобразователя на скачок напряжения единичной амплитуды, т.е. описывает поведение преобразователя на импульсных сигналах. Определяется типом преобразователя и параметрами применяемых аналоговых и цифровых НЧ-фильтров.
4. Фазовая характеристика $\varphi(f)$ – описывает фазовый сдвиг между входным/выходным сигналами преобразователя в полосе частот до $F_d/2$. Определяется типом преобразователя и элементами обвязки.

Сегодня в составе блока преобразователей САГ чаще всего применяются следующие типы преобразователей:

- **параллельные АЦП** - входной сигнал одновременно сравнивается с эталонными уровнями линейки компараторов, которые формируют на выходе двоичный код. В таком АЦП количество компараторов равно $2^N - 1$, где N - разрядность цифрового кода. Недостатком АЦП данного типа является необходимость увеличения в два раза количества компараторов для каждого следующего разряда точности. Для 4-битного АЦП необходимо 16 компараторов, для 12-разрядного уже 4096.
- **sigma-delta АЦП** - вариант АЦП, работающий на частоте F_s , значительно (в 64 и более раз) превышающей частоту дискретизации F_d выходного цифрового сигнала. Компаратор такого АЦП выдает значения пониженной разрядности (обычно однобитовые), сумма которых на интервале дискретизации F_d пропорциональна величине отсчета. Последовательность однобитных значений подвергается цифровой фильтрации и понижению частоты квантования (децимация), в результате чего получается серия отсчетов с заданной разрядностью и частотой дискретизации F_d .

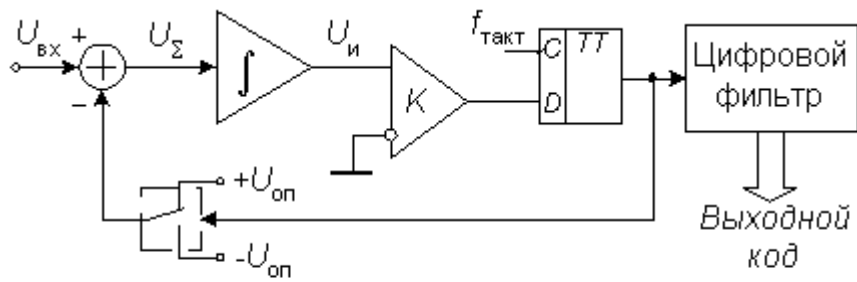


Рис. 15. Структурная схема сигма-дельта АЦП

Рис. 1. Структура сигма дельта АЦП

Современные ЦАП в основном строятся по трем схемам:

- **взвешивающие** - с суммированием взвешенных токов или напряжений, когда каждый разряд входного слова вносит соответствующий своему двоичному весу вклад в общую величину получаемого аналогового сигнала; такие ЦАП называют также параллельными или многоразрядными (multibit) (рис. 1).

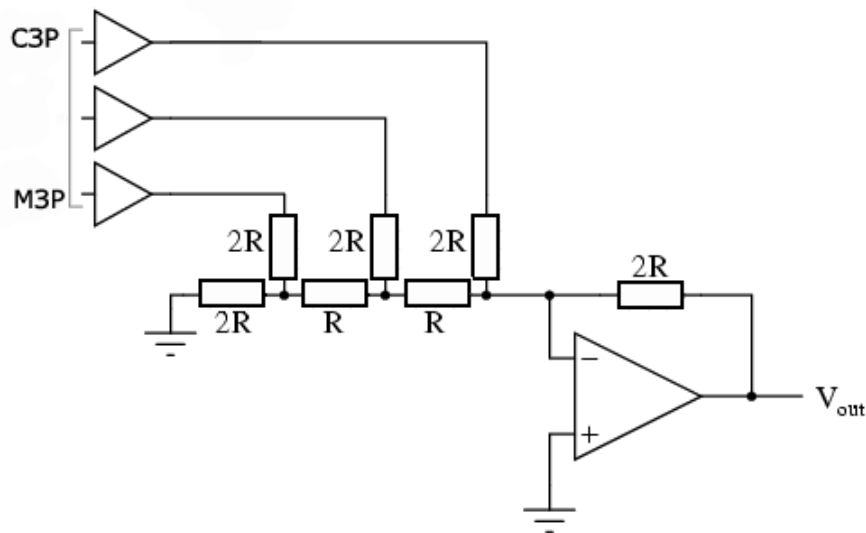


Рис. 1. Структура параллельного ЦАП с резистивной матрицей R2R.

- **sigma-delta**, с предварительной цифровой передискретизацией и выдачей малоразрядных (обычно однобитовых) значений на схему формирования эталонного заряда, которые со столь же высокой частотой добавляются к выходному сигналу. Такие ЦАП носят также название bitstream.
- **с широтно-импульсной модуляцией** (ШИМ, Pulse Width Modulation, PWM) - на схему выборки-хранения аналогового сигнала выдаются импульсы постоянной амплитуды и переменной длительности. На этом принципе работают преобразователи MASH (Multi-stage Noise Shaping - многокаскадное формирование шума) фирмы Matsushita. Свое название эти ЦАП получили по причине применения в них нескольких последовательных каскадов формирования шума.

Основой технологии sigma-delta является использование передискретизации. Передискретизация 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. В АЦП используется аналоговая передискретизация, в ЦАП - цифровая. Изначально передискретизация использовалась для снижения требований к аналоговому входному/выходному фильтру. При повышении частоты дискретизации вносимые отражения спектра пропорционально отодвигаются от основного сигнала, и аналоговый фильтр может иметь гораздо меньшую крутизну среза. Другое преимущество передискретизации 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 задается как

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

где Δ - величина шага квантования. При относительно больших сигналах 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.

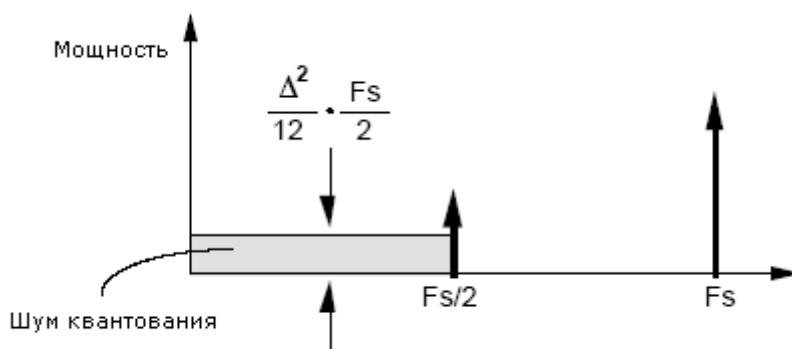


Рис. 2. Снижение шумов квантования с помощью передискретизации.

Таким образом, эффективное отношение сигнал/шум преобразователя можно увеличить за счет повышения частоты дискретизации и использования методов 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 эквивалентен

6 дБ шума, каждое учетверение частоты позволяет уменьшить разрядность преобразователя на единицу. Передискретизация 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 с передискретизацией. 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, которыми по сути своей являются сигналы управления в САГ.

При использовании передискретизации в десятки раз (обычно - 64х..512х) становится возможным уменьшить разрядность ЦАП без ощутимой потери качества сигнала; ЦАП с меньшим числом разрядов обладают также лучшей линейностью (на детерминированных сигналах). В пределе количество разрядов может быть сведено к одному. Форма выходного сигнала таких ЦАП представляет собой полезный сигнал, обрамленный значительным количеством высокочастотного шума, который, тем не менее, эффективно подавляется простейшим 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 путем добавления к сигналу обычного белого шума (случайного или псевдослучайного сигнала), с амплитудой в половину младшего значащего разряда; такая операция называется dithering (рис. 3). Это приводит к незначительному увеличению уровня шума, зато ослабляет корреляцию ошибок квантования с высокочастотными компонентами сигнала. Dithering применяется также перед округлением отсчетов при уменьшении их разрядности (например, при цифровой фильтрации).

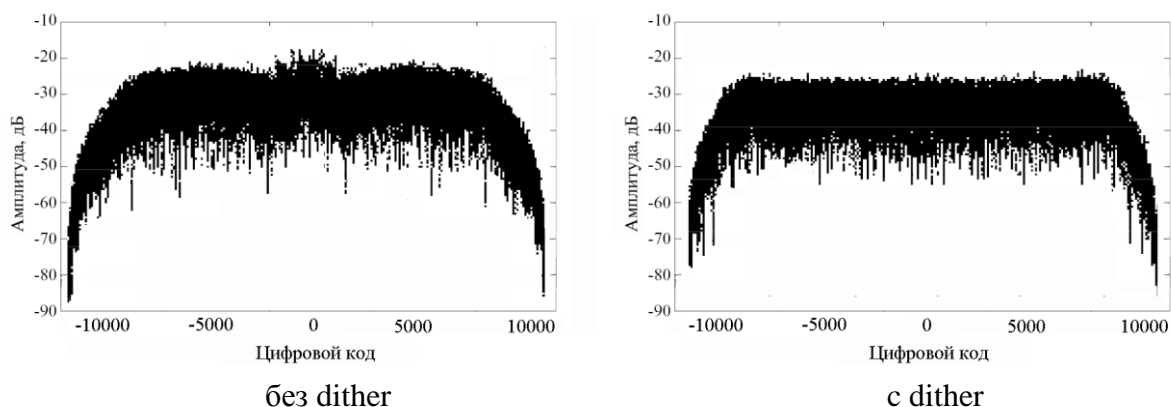


Рис.3. Увеличение линейности преобразования за счет использования dither

Для улучшения соотношения сигнал/шум и снижения влияния ошибок квантования, которое в случае однобитового преобразователя получается довольно высоким, также применяется метод формирования шума (noise shaping) 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, dithering 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 на сегодня типов преобразователей (параллельных и сигма-дельта) в САГ рассмотрим их параметры с учетом предъявляемых выше требований. Сравнение параметров целесообразно проводить как с использованием экспериментальных исследований конкретных реализаций, так и с помощью математических моделей в среде MATLAB.

Смоделируем простейший параллельный АЦП (рис. 4).

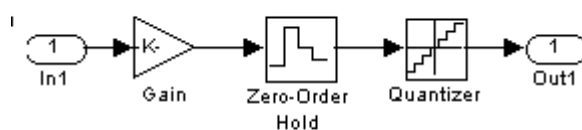


Рис. 4. Модель параллельного АЦП в среде MATLAB

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 ± 1 . В свойствах блоков выборки/хранения и квантования по уровню можно задать частоту дискретизации. В данной версии MATLAB подобная структура имеет число эффективных разрядов эквивалентное 16 битам.

Параметры схемы выборки-хранения во многом определяют задержку τ , вносимую АЦП/ЦАП при преобразовании. Для мультибитовых ЦАП при сравнении его выхода $y(t)$ и входа $y(\pi)$ становится очевидно, что для каждого цифрового кода его выход задерживается на τ (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 как:

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

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 частотной коррекции, пропуская сигнал через фильтр с амплитудно-частотной характеристикой обратной $\sin x/x$.

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

- разностного блока;

- интегратора;
- компаратора (1-битного АЦП);
- блока выборки/хранения;
- блоков децимации, осуществляющих поблочное последовательное четырехкратное прореживание входного сигнала.

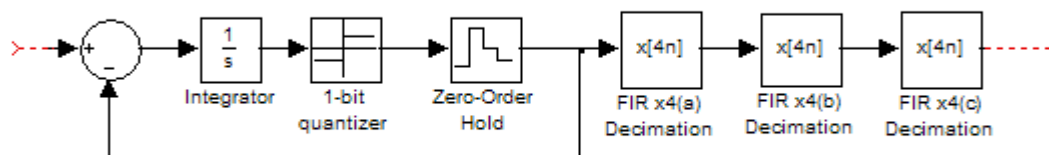


Рис. 5. Модель сигма-дельта АЦП в среде MATLAB.

Как было показано выше одним из важнейших параметров преобразователей, влияющим на эффективность работы всей системы активного гашения в целом, являются вносимые ими задержки сигнала.

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

- задержки блока обработки (τ_o);
- задержки объекта управления (τ_y);
- задержки аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (τ_{np}).

Очевидно, что задержки вносимые объектом управления мало зависят от применяемых типов компенсаторов и датчиков, т.е. величину можно δ_p считать константой. Задержки 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. Использование упрощенных алгоритмов может уменьшить задержки, но увеличить время сходимости или снизить качество гашения.

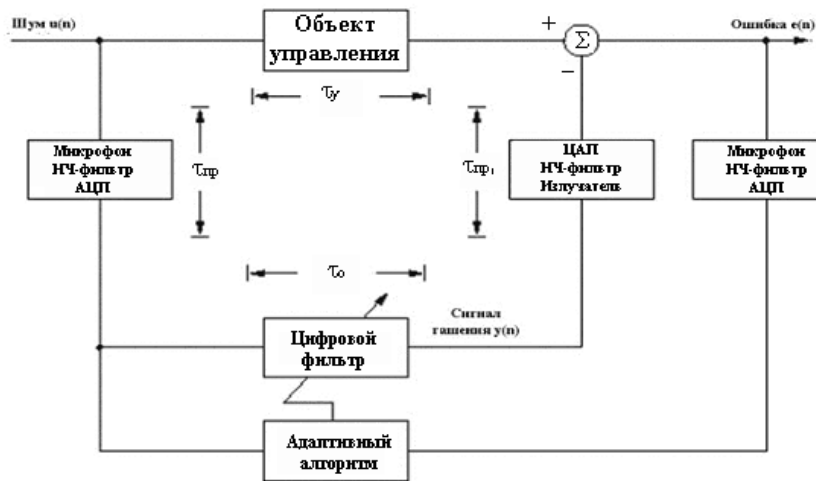


Рис.6. Распределение задержек сигнала в обобщенной модели активной системы.

С помощью созданных моделей проведем оценку вносимых обоими типами преобразователей задержек. Для этого подадим на входы обоих преобразователей последовательность прямоугольных импульсов с частотой следования 700 Гц. Результат преобразования можно контролировать на экране виртуального осциллографа (рис. 7).

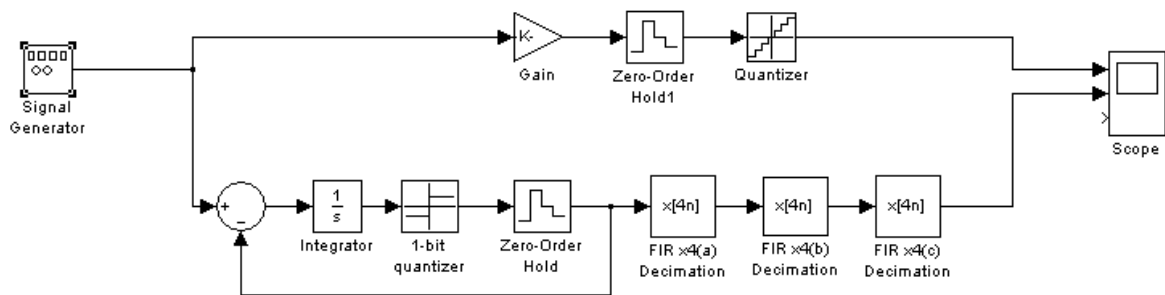


Рис. 7. Модель для исследования задержки преобразования АЦП

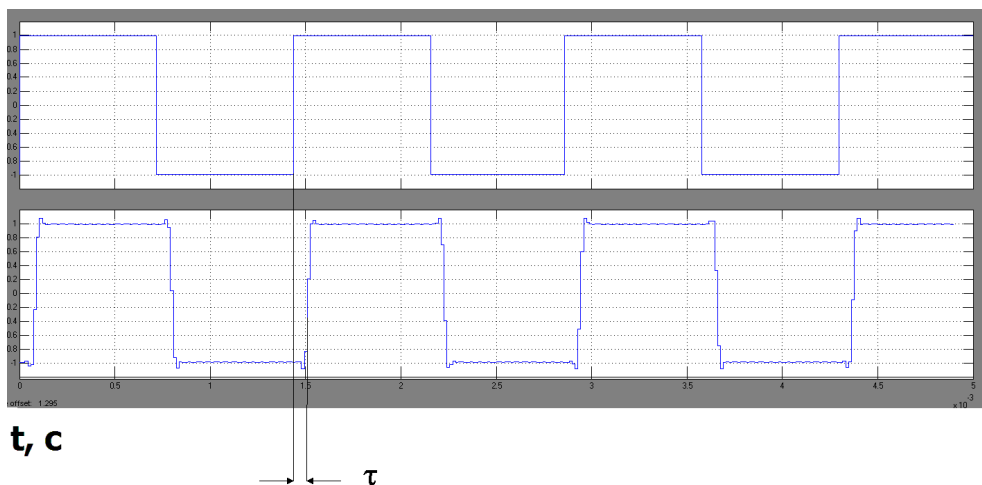


Рис. 8. Результаты оцифровки тестового сигнала преобразователями различного типа

Результаты моделирования показывают, что преобразователи параллельного типа имеют существенно меньшее время преобразования по сравнению с сигма-дельта. Если для параллельных преобразователей время преобразования не превышает 1 такт, то для сигма-дельта оно составляет около 100 мкс. Эта величина подтверждается и экспериментально – для сигма-дельта АЦП при тактовой частоте 32 кГц задержка составляет около 4 тактов, т.е. 125 мкс.

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.

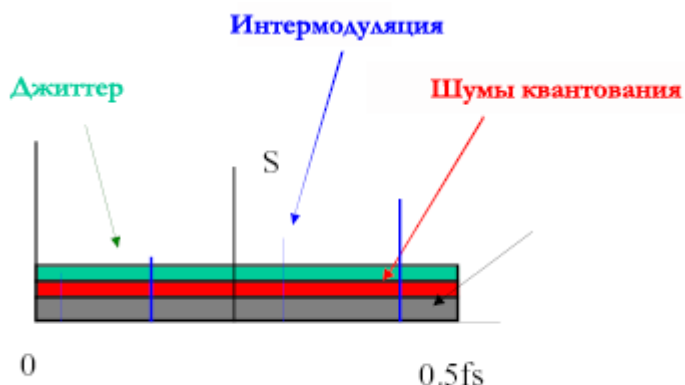


Рис. 9. Состав шумов преобразования

Рассмотрим специфику каждой из составляющих применительно к мультибитовым 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 частотой дискретизации и приводят к появлению в спектре оцифрованного сигнала помимо зеркальных частот также к возникновению большого числа комбинационных частот. Проведем оценку шума квантования и интермодуляционных искажений с помощью разработанных в MATLAB моделей (рис. 10).

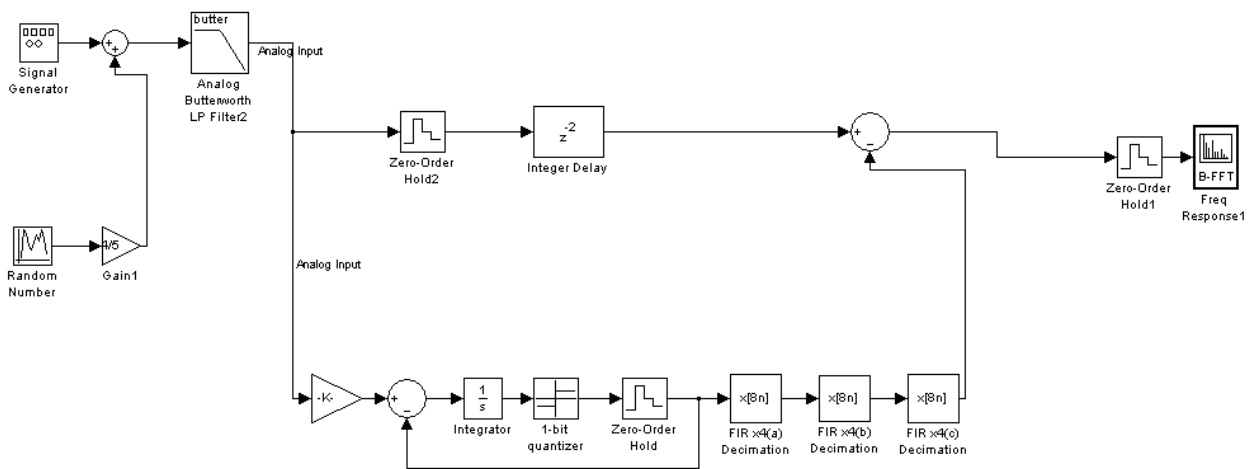


Рис. 10. Модель для оценки уровня шумов квантования и интермодуляционных искажений

В данном случае дополнительные блоки выборки/хранения необходимы для дискретизации по времени входного аналогового сигнала для правильной работы дифференцирующего блока и виртуального спектроанализатора, а блок задержки – для компенсации задержки преобразования, вносимой сигма-дельта АЦП. Результаты моделирования при наличии только узкополосного синусоидального сигнала 20 Гц с относительным уровнем -10 дБ представлены на рис. 11.

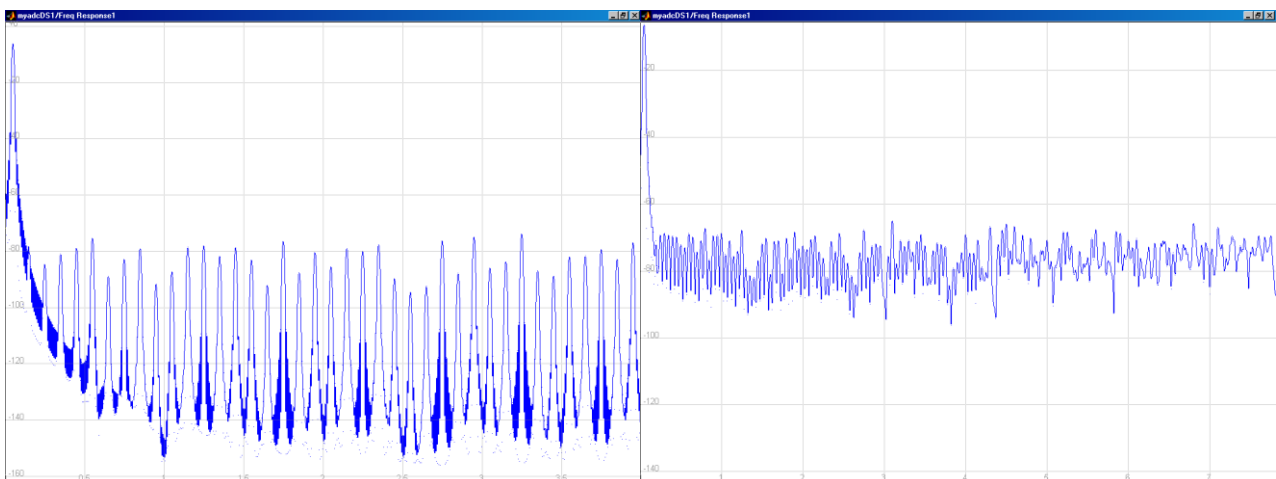


Рис . 11. Спектр шумов квантования и интермодуляционных искажений параллельного (слева) и сигма-дельта (справа) АЦП при наличии узкополосного сигнала

Спектр мультибитного АЦП без передискретизации представляет собой плотно расположенные комбинационные частоты с максимальным относительным уровнем -75 дБ и ярко выраженной зависимостью $\sin x/x$. В спектре же сигма-дельта АЦП ряд комбинационных частот с более плотным спектром (влияние передискретизации) заметен лишь на низких частотах. В области высоких частот спектр близок к белому шуму. Относительный уровень шума -70 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. 12).

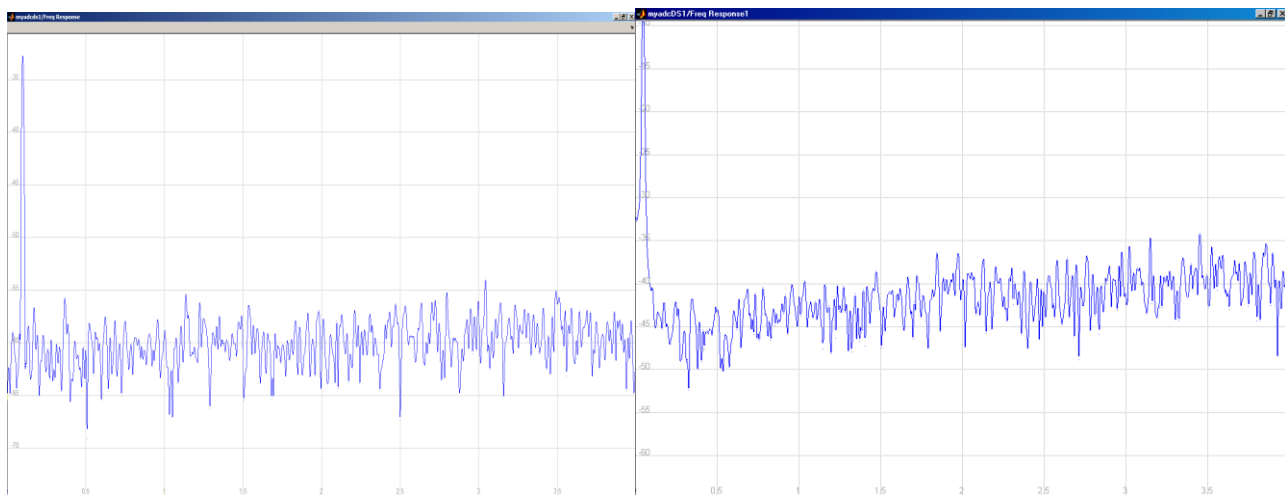


Рис. 12. Спектр шумов квантования и интермодуляционных искажений параллельного (слева) и сигма-дельта (справа) АЦП при наличии широкополосного псевдослучайного сигнала

В данном случае спектр шума обеих реализации не имеет ярко выраженных составляющих, однако если для параллельного АЦП относительный уровень не превышает -53 дБ, то для сигма-дельта он равен -49 дБ на низких частотах и -42 на высоких, т.е. уровень шума равномерно нарастает со скоростью 1 дБ/окт. Таким образом очевидно, что если на детерминированных сигналах мультибитные и сигма-дельта преобразователи вносят практически одинаковый уровень шума, то при наличии случайной составляющей разница достигает 10 дБ в области частот около $F_s/2$. Ухудшение отношения сигнал/шум на 10 дБ эквивалентно уменьшению числа эффективных разрядов более чем на $1,5$, т.е. для сигма-дельта преобразователей с эквивалентным числом разрядов 16 число эффективных разрядов не превышает $14,5$.

Случайный сигнал при восстановлении из цифровой последовательности дельта-сигма демодулятором меняет статистические характеристики и обогащается модуляционным шумом, который коррелирован с самими сигналом, а поэтому, в отличие от параллельных преобразователей, существенно влияет на качество сигнала. Например, предлагаемые фирмой Analog Devices на замену 20-разрядным мультибитовым ЦАП AD1862 новые дельта-сигма ЦАП AD1955 обладают числом эффективных разрядов на случайных сигналах по характеристике преобразования около 18 даже согласно официальным данным, а в реальных условиях (за счет неоптимальности трассировки, влиянию ВЧ-помех от модуляторов и т.п.)

оно не превышает 17. Паспортное отношение сигнал/шум таких преобразователей (122...132 дБ) будет действительно иметь место, но при работе на стационарном детерминированном сигнале - синусоиде и характеризует скорее возможности современной полупроводниковой технологии по дробовому и избыточному НЧ-шуму.

Преобразователи параллельной структуры лишены вышеописанных недостатков по принципу своей работы, но имеет очень существенный с точки зрения фирмы-производителя недостаток – большую себестоимость ввиду сложности изготовления и настройки кристалла. Например, технологический цикл производства параллельного ЦАП включает в себя разнородные операции как на этапе производства (создание технологически несовместимых матрицы резисторов и полупроводниковых ключей), так и на этапе контроля, настройки и тестирования (лазерная или электроннолучевая настройка матрицы и ключей). В результате такие микросхемы вытесняются из производственных программ даже крупных фирм приборами, не требующими столь сложных техпроцессов, но, к сожалению, уже и не столь качественными.

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

При временной и амплитудной дискретизации 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. Предельная величина джиттера, приводящая к ошибке в 1 младший значащий разряд, вычисляется по формуле:

$$T_{\max} = \arcsin \left(\frac{1}{2^n} \right),$$

где T_{\max} - пиковое значение временной нестабильности (джиттера) момента преобразования, N – Разрядность данных, бит, f_{\max} - максимальная частота в спектре преобразованного сигнала. Нетрудно подсчитать, что при непосредственном использовании данных стандарта CDDA (16 разрядов и полоса до 22,05 кГц) для сохранения младшего разряда допустим джиттер до 173 пс (рис. 13).

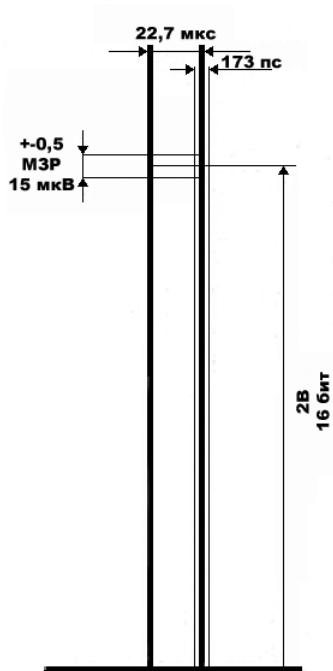


Рис. 13. Временные параметры работы 16-битного ЦАП без передискретизации

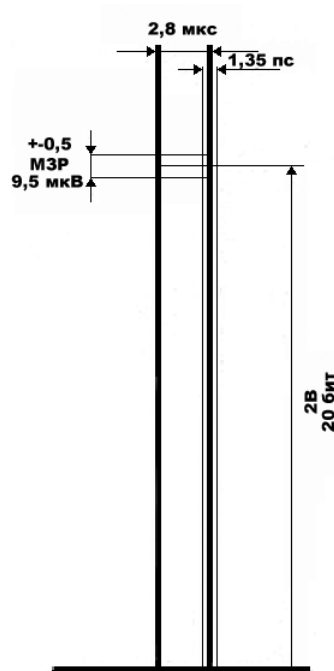


Рис. 14. Временные параметры работы 20-битного ЦАП с 8-кратной передискретизацией

Эта величина джиттера вполне достижима в преобразователях без использования передискретизации. Например, джиттер системы, состоящей из цифрового приемника DIR1703 Texas Instruments и мультибитового ЦАП AD1866 Analog Devices не превышает 100 пс. При введении цифровой фильтрации с повышением разрядности до 20 бит и 8-кратной передискретизации величина допустимого джиттера сокращается до 1,35 пс (рис. 14). Эта цифра реально недостижима 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 с повторной передискретизацией. В однокристалльных системах с интегрированным цифровым фильтром внутренняя разрядность, как правило, не превышает 20 бит. Таким образом, очевидно, что использование передискретизации при наличии джиттера приводит к значительному снижению разрешения преобразователя в области малых сигналов.

В заключении рассмотрим переходную характеристику параллельных и сигма-дельта преобразователей. Поскольку в реальных САГ сигналы управления носят, как правило, случайный характер отклик на импульсные сигналы во многом определяет параметры системы в части устойчивости и эффективности. В параллельных преобразователях заметен дискретный характер преобразования синусоидальных сигналов (рис. 15), 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.

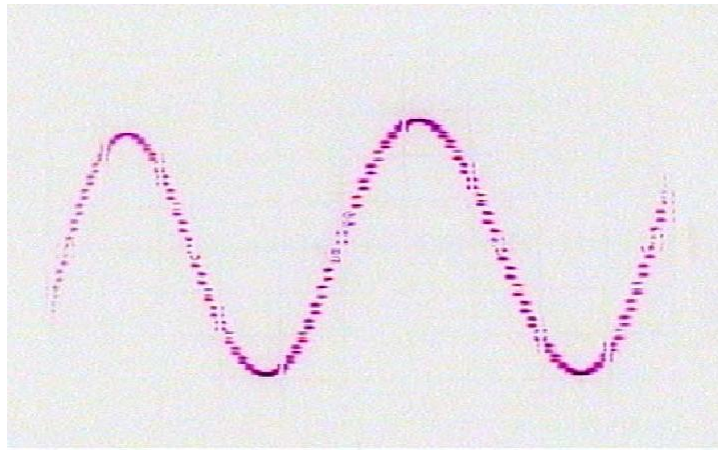


Рис. 15. Вывод синусоиды 1 кГц через мультибитовый ЦАП без передискретизации

Для оценки переходной характеристики преобразователей воспользуемся моделью, изображенной на рис. ?. В данном случае частота дискретизации составляет 8 кГц, частота следования импульсов 700 Гц (рис. 16).



Рис. 16. Реакция преобразователей различного типа на импульсный сигнал

Как можно заметить параллельный преобразователь не искажает форму сигнала. На выходе сигма-дельта преобразователя наблюдаются значительные выбросы как по переднему, так и по заднему фронтам достигающие 6% от амплитуды импульсов. В данном случае результаты моделирования явно коррелируют с экспериментальными данными. На рис. 17 показаны осциллограммы вывода последовательности импульсов мультибитным ЦАП без передискретизации и сигма-дельта ЦАП с 8-кратной передискретизацией.

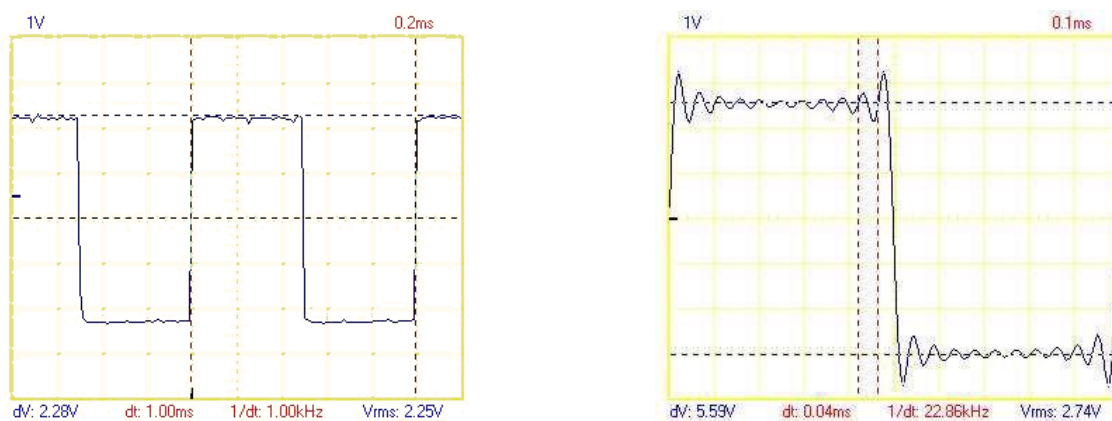


Рис. 17. Осциллограммы вывода последовательности импульсов мультибитным ЦАП без передискретизации и сигма-дельта ЦАП с 8-кратной передискретизацией.

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- параллельные преобразователи имеют линейную фазовую характеристику, фазовая характеристика сигма-дельта преобразователей нелинейна, особенно на краях полос;
- мультибитовые преобразователи имеют переходную характеристику близкую к идеальной, время установления не превышает 1 - 2 отсчета; переходная характеристика сигма-дельта преобразователей имеет сложный вид, зависящий от целого ряда факторов (порядок формирователей шума, коэффициент передискретизации и т.д.), и общем случае содержит пре- и постэхо;

Естественно на фазовые и временные характеристики преобразователей значительное (а зачастую и определяющее) влияние оказывают параметры входного/выходного аналогового НЧ-фильтра. Для ЦАП без передискретизации 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, поэтому далее остановимся лишь на аспектах применимости тех или иных типов фильтров в составе САГ. С точки зрения уровня подавления помех выше $F_s/2$ наиболее подходящим является инверсный фильтр Чебышева. К сожалению, фазочастотная характеристика такого фильтра существенно нелинейна, да и групповое время задержки непостоянно. Поэтому применение такого фильтра приводит к существенному ухудшению передачи фазовых и временных соотношений в сигнале. Фильтр Баттерворта имеет меньшую крутизну спада АЧХ, но более линейную фазовую характеристику. Линейно-фазовые фильтры Бесселя обеспечивают требуемое затухание в полосе задержания лишь при высоком порядке (10-14). Определение минимально необходимого порядка фильтра является многокритериальной задачей. Теоретически для достижения заявленного для формата CD-DA отношения сигнал/шум 90 дБ необходимо подавление ультразвуковых составляющих как минимум на 50 дБ, т.е. аналоговый фильтр как минимум восьмого порядка [?]. Применительно к задаче активного гашения фильтры высокого порядка неприемлемы по

причине значительных фазовых искажений на краю частотного диапазона и сложных переходных процессов. К тому же они требуют очень точного подбора элементов с минимальными допусками. В принципе, проблемы с линейностью ФЧХ можно решить, применив специальный фазовый корректор. Но это также приводит к ухудшению импульсной характеристики блока преобразователей. Таким образом при использовании преобразователей с высокой F_s или преобразователей с передискретизацией наиболее целесообразно использование фазолинейных фильтров Бесселя 5-7 порядка, либо фильтров Баттерворта 3-4 порядка в преобразователях с низкой тактовой частотой. В качестве примера практической реализации рассмотрим реализацию налогового фильтра для ЦАП с 4-кратной передискретизацией. При использовании четырехкратной передискретизации ослабление сигнала, обусловленное апертурными искажениями, составляет на частотах 20 и 156,4 кГц (ближайшая к основной полосе зеркальная частота) соответственно $-0,184$ и -18 дБ. Принимая допустимое ослабление в полосе пропускания равным 0,5 дБ и минимальное ослабление в 50 дБ за пределами полосы можно найти минимально необходимый порядок фильтра n с заданной характеристикой. Для баттервортовской аппроксимации $n = 3$.