

СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП

АРХИТЕКТУРА, ПРИНЦИПЫ, КОМПОНЕНТЫ

Сигма-дельта АЦП (Σ - Δ -АЦП) – один из наиболее востребованных сегодня типов аналогово-цифровых преобразователей. Они эффективны в тех задачах, где не требуются большие частоты дискретизации, но необходимо высокое разрешение сигнала. Приборы этого типа выпускают многие компании, спектр современных Σ - Δ -АЦП весьма широк. Однако для многих разработчиков эти АЦП остаются классом приборов нового типа, принцип действия которых не вполне ясен. Разберемся.

Основная идея, положенная в основу архитектуры Σ - Δ -АЦП – как с помощью одноразрядных преобразований добиться высокой (многоразрядной) точности измерений сигнала. Предтечей идеи Σ - Δ -АЦП можно считать принцип одноразрядной дельта-модуляции, когда текущее значение сигнала сравнивается с предыдущим, и если сигнал превысил предыдущий отсчет на некое пороговое значение, он кодируется 1, если уменьшился – 0. Такая обработка требует достаточно больших скоростей дискретизации, как правило – в 20–40 раз выше ширины полосы сигнала.

Аналогичные идеи легли в основу Σ - Δ -АЦП. Рассмотрим принцип действия этого класса приборов (рис. 1). При этом будем полагать, что входной сигнал остается неизменным во время всего цикла преобразований для одной выборки (выборка или отсчет – сформированное на выходе АЦП или модулятора мгновенное цифровое значение измеряемого сигнала).

В простейшем случае Σ - Δ -АЦП включает Σ - Δ -модулятор (выполняющий преобразование аналогового сигнала в цифровую последовательность) и выходной фильтр, преобразующий цифровую последовательность из модулятора в окончательный цифровой код.

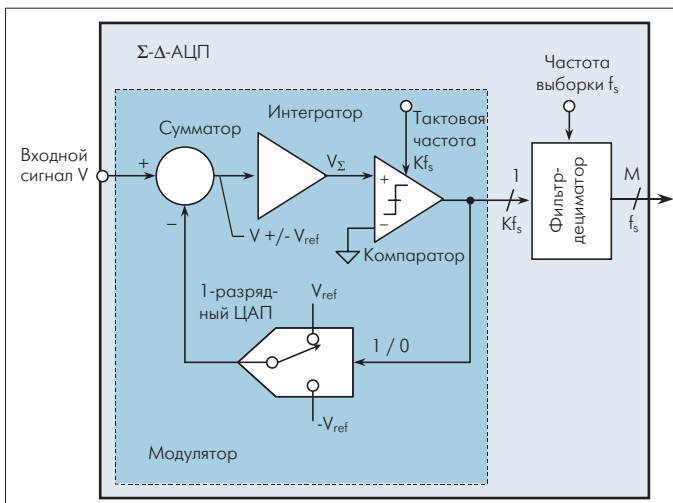


Рис. 1. Функциональная схема Σ - Δ -АЦП

И.Шахнович

Особенность Σ - Δ -АЦП – это чрезвычайно простое устройство Σ - Δ -модулятора и весьма сложный цифровой выходной фильтр, реализующий алгоритмы цифровой обработки сигналов. Тем не менее, с развитием полупроводниковых технологий реализация таких устройств на кристалле не вызывает проблем.

Как и любой АЦП, Σ - Δ -АЦП выдает оцифрованные значения сигнала в долях диапазона измерения. Измеряемый сигнал должен находиться в диапазоне от опорного напряжения V_{ref} до $-V_{ref}$ (относительно некоего установленного уровня “0”, численно равного половине диапазона измерения). Если разрядность АЦП – N бит, то весь этот диапазон разбит на интервалы (кванты) $2V_{ref}/2^N$. Очевидно, что значения V_{ref} и $-V_{ref}$ могут быть любыми, не обязательно отрицательными. Для удобства рассуждений будем полагать, что уровень “0” соответствует напряжению 0 В.

Простейший Σ - Δ -модулятор состоит из сумматора, интегратора, компаратора и одноразрядного цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Одноразрядный ЦАП фактически представляет собой коммутатор, который в зависимости от входного сигнала (1 или 0) выдает напряжение V_{ref} или $-V_{ref}$, соответственно.

Перед началом вычисления новой выборки напряжения на выходе интегратора (V_{Σ}) и на выходе ЦАП равны нулю. Сигнал с выхода сумматора V_{Σ} поступает на интегратор, где суммируется с предыдущим значением интегратора (т.е. для i-ой итерации $V_{\Sigma}(i) = V_{\Sigma}(i-1) + V_{\Sigma}$). В начальный момент входной сигнал V без изменений поступает на интегратор, поскольку на другом входе сумматора сигнала равен 0 ($V_{\Sigma}(0) = V$).

Компаратор сравнивает выходное значение интегратора V_{Σ} с уровнем “0” и выдает 1, если $V_{\Sigma} \geq 0$, и 0 при $V_{\Sigma} < 0$. Сигнал с компаратора поступает в выходной регистр, образуя последовательность одноразрядных цифровых отсчетов (выборка модулятора). Также этот сигнал попадает в ЦАП, который в зависимости от его уровня выдает V_{ref} или $-V_{ref}$. В сумматоре это значение вычитается из входного сигнала V и складывается с V_{Σ} в интеграторе. После чего процесс многократно повторяется.

Очевидно, что значение V_{Σ} в ходе оцифровки сигнала будет то нарастать, то убывать. Например, если $V_{ref} = 1$ В, а входной сигнал $V = 0,5$ В, то напряжение в интеграторе будет последовательно принимать значения 0,5; $0,5 + (0,5 - 1) = 0$; $0 + (0,5 - 1) = -0,5$; $-0,5 + (0,5 + 1) = 1$; $1 + (0,5 - 1) = 0,5$ и т.д. Через четыре итерации V примет исходное значение $V = 0,5$ В. На выходе компаратора при этом формируется последовательность 11011101... Если входное напряжение равно 0,7 В, длина цикла будет иной (20 итераций). Нетрудно

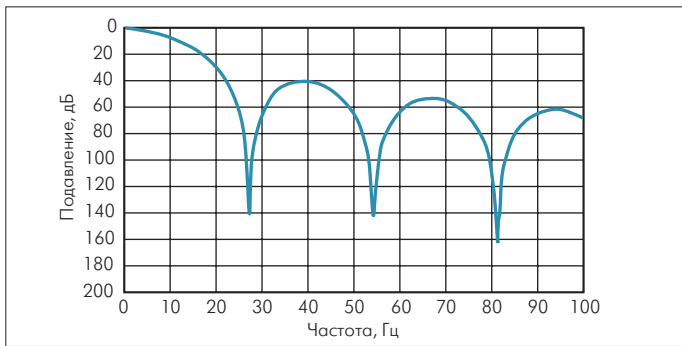


Рис.2. Пример АЧХ фильтра Σ - Δ -АЦП

но заметить, что если $V = -V_{ref}$, выходная последовательность будет состоять только из нулей, а если $V = V_{ref}$ - только из единиц. При $V = 0$ на выходе компаратора будет 101010...

Математически механизм работы модулятора можно представить следующим образом. Пусть значение V_{Σ} в ходе преобразования k раз было меньше "0" и n раз больше или равным нулю; $n + k = N$, где N - общая длина кодовой последовательности для одной выборки. Очевидно, что $V_{\Sigma}(N) = V + n(V - V_{ref}) + k(V + V_{ref})$; $V_{\Sigma}(0) = V$.

Предположим, что через какое-то число итераций $N \neq 0$ напряжение на интеграторе вновь принимает исходное значение: $V_{\Sigma}(N) = V$. Тогда можно записать: $V = V(1 + n + k) + V_{ref}(k - n)$;

$$V = V_{ref}(n - k) / (n + k) = V_{ref}(2n / N - 1). \quad (1)$$

Таким образом, отношение числа единиц к общей длине циклической последовательности n/N однозначно определяет измеряемое напряжение V как часть диапазона измерений V_{ref} .

Циклическое изменение напряжения в интеграторе обусловлено отрицательной обратной связью в Σ - Δ -модуляторе. Длительность цикла зависит от соотношения значений V , V_{ref} и точности их представления. Ее можно определить из формулы (1) при условии, что N и n - целые числа. В нашем примере при $V = 0,7$ В наименьшее значение $N = 20$, соответственно $n = 17$.

Если длина выборки сигнала в модуляторе достаточно велика, можно гарантировать, что она окажется в несколько раз больше самой длинной циклической последовательности N . Поэтому даже если она не кратна N , все равно "лишние" отсчеты (биты) существенно не искажают статистику и не повлияют на результат измерения V .

Таким образом, с помощью всего лишь одноразрядного преобразования в заданном диапазоне напряжений можно измерить входной сигнал с любой точностью. Но очевидно, что чем выше точность, тем больше отсчетов необходимо в выборке модулятора для одного сигнала. И если частота следования многозарядных выборок f_s (т.е. скорость выдачи результатов измерения сигнала АЦП) должна удовлетворять теореме Котельникова и по крайней мере вдвое превышать ширину полосы частот сигнала F ($f_s \geq 2F$), то частота одноразрядных отсчетов гораздо выше: $f_{mod} = Kf_s$, где K - коэффициент передискретизации (избыточной дискретизации). Коэффициент K может варьироваться в достаточно широких пределах, от единиц до тысяч. Именно этот факт и является одним из существенных ограничений частотных свойств Σ - Δ -АЦП, ставя в обратную зависимость их разрешение (число разрядов в выборке) и диапазон рабочих частот.

Сформированную выходную двоичную последовательность модулятора необходимо преобразовать в двоичный код заданной разрядности M (меньшей, чем в исходной выборке). Простейший способ - это использовать счетчик фиксированной разрядности M (например, 8-разрядный). Счетчик на каждой итерации (т.е. с частотой

той Σ - Δ -модулятора $f_{mod} = Kf_s$) опрашивает выход компаратора и суммирует число единиц в последовательности длиной $2^M - 1$. В случае $M = 8$ такой счетчик будет обрабатывать выборки длиной 256 бит, накапливая значение n из формулы (1). Фактически он будет формировать 255 отсчетов на диапазон $-V_{ref} \dots V_{ref}$, представляя их в дополнительном коде: $00000000 = -V_{ref}$; $10000000 = 0$ В, $11111111 = (254/255)V_{ref}$. Причем счетчик не только преобразует (кодирует) выборку модулятора, но и сокращает число отсчетов, понижая частоту конечной выборки. Операция сокращения числа отсчетов (прореживания выборки) называется децимацией.

В реальных Σ - Δ -АЦП вместо двоичных счетчиков используют цифровые фильтры-дециматоры нижних частот с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Как правило, передаточная функция таких фильтров (в частотной области) имеет вид

$$H(f) = \left[\frac{\sin(D \cdot \pi \cdot f / f_{mod})}{D \cdot \sin(\pi \cdot f / f_{mod})} \right]^3, \text{ где } D - \text{коэффициент децимации,}$$

$f_s = f_{mod} / D$ (рис.2). Очевидно, что коэффициенты передискретизации K и децимации D однозначно связаны, однако в реальных АЦП программируемым (изменяемым) параметром является коэффициент децимации D при фиксированной тактовой частоте модулятора f_{mod} . Коэффициенты КИХ-фильтра выбирают так, чтобы пики режекции приходились на частоты сети питания (50 и 60 Гц) и их гармоники.

Цифровые фильтры выполняют четыре основных функции. Во-первых, они интегрируют и усредняют выборку (функция интеграции). Кроме того, они без потери информации понижают частоту выходных отсчетов (децимация). Также цифровые фильтры подавляют (на 100-120 дБ) помехи (прежде всего - наводки от силовой сети электропитания) в полосе полезного сигнала. Наконец, они ограничивают частотную полосу выходного сигнала, устраняя паразитные шумы за ее пределами.

Важная особенность Σ - Δ -АЦП - это существенное увеличение отношения сигнала к шуму квантования по сравнению с другими видами АЦП. В других типах АЦП избыточная частота дискретизации приводит к тому, что спектральная плотность шумов квантования оказывается равномерно распределенной по всей полосе сигнала выборки (от 0 до $Kf_s / 2$) и значительная их часть вырезается цифровым НЧ-фильтром, поскольку полоса сигнала ограничена частотой $f_s / 2$ (рис.3) [1]. В отличие от них Σ - Δ -модулятор транспонирует шум квантования в область частот выше рабочей полосы сигнала. Поскольку Σ - Δ -модулятор - это по сути ФНЧ, повысить его характеристики (добротность) можно, используя принцип каскадирования, т.е. увеличивая порядок фильтра. Схематически это реализуется добавлением

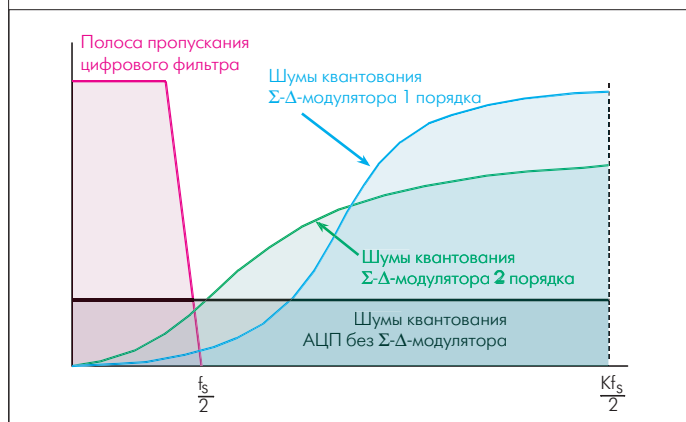


Рис.3. Принцип подавления шумов квантования в Σ - Δ -АЦП

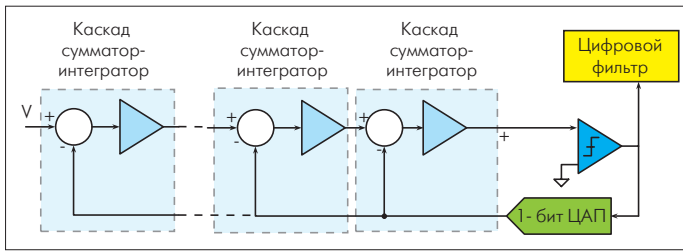


Рис.4. Σ - Δ -модулятор высокого порядка

каскадов сумматор – интегратор (рис.4).

Данная особенность Σ - Δ -АЦП выделяет их из всего многообразия аналого-цифровых преобразователей, поскольку важно обеспечить хорошее отношение сигнал/шум (S/N) в рабочей полосе до стадии цифровой фильтрации. Ибо каким бы ни был цифровой фильтр, удалить шумы квантования в собственной полосе пропускания (где и находится сигнал) он не может. А отношение сигнал/шум определяет эффективное число разрядов оцифровки $ENOB = (S/N \text{ (дБ)} - 1,76) / 6,02$. Повышая число каскадов модулятора и коэффициент передискретизации, можно добиваться высоких значений ENOB (рис.5) – т.е. разрешающей способности АЦП.

Увеличить динамические характеристики Σ - Δ -АЦП можно за счет применения многоразрядных ЦАП и АЦП вместо одnorазрядных ЦАП и компараторов. Однако усложнение этих элементов (прежде всего – формирование прецизионного ЦАП) влечет ухудшение линейности их характеристик и противоречит принципу простоты аналоговой части Σ - Δ -АЦП. Поэтому наиболее распространены приборы этого типа с одnorазрядным преобразованием, хотя в последние несколько лет ведущие производители начали выпускать Σ - Δ -АЦП с многоразрядными ЦАП и АЦП в модуляторе.

За счет простоты реализации модулятора Σ - Δ -АЦП обладают отличными линейными характеристиками, поскольку все аналоговые элементы (интегратор со встроенными конденсаторами, компаратор, источник опорного напряжения и др.) выполнены на одном кристалле. Динамический диапазон интегратора мал, поэтому он работает в линейной области. Фактически исчезает необходимость в технологической подстройке параметров аналоговой части при изготовлении ИС (если используются одnorазрядные ЦАП и компаратор), поскольку сама аналоговая часть чрезвычайно проста. Вся сложность обработки возложена на цифровой фильтр, коэффициенты которого можно легко записать (и переписать) в память АЦП. Программно устанавливаемый коэффициент децимации позволяет выбрать нужно соотношение между шириной рабочей полосы АЦП и требуемым отношением сигнал/шум, тем самым задавая эффективное число разрядов при оцифровке сигнала. Еще одна немаловажная особенность АЦП этого класса – низкое энергопотребление (при небольших частотах дискретизации), до 2,5 мВт и ниже, вплоть до сотен микроватт.

Однако за все надо платить, и обратная сторона достоинств Σ - Δ -

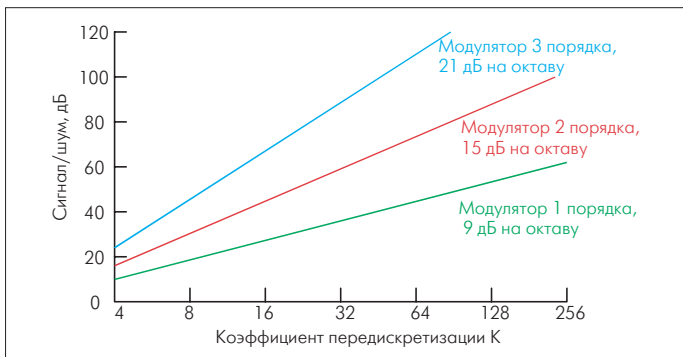


Рис.5. Отношение сигнал/шум для Σ - Δ -модуляторов [1]

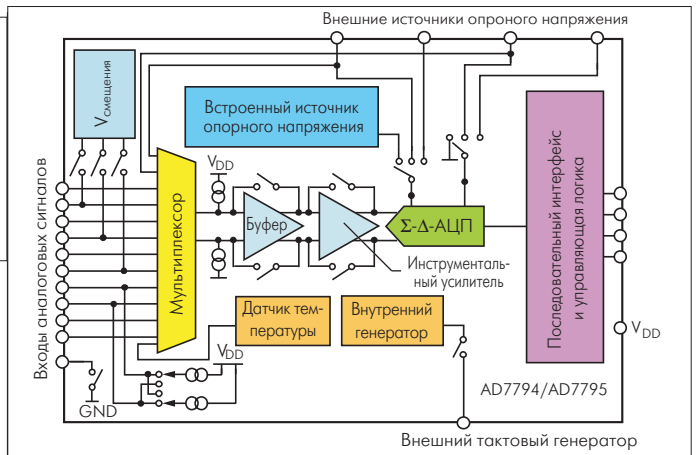


Рис.6. Σ - Δ -АЦП AD7794/95

АЦП – относительно низкая скорость обработки сигнала. Частоты дискретизации Σ - Δ -АЦП редко превышают сотни килогерц. Это обусловлено не только неизбежно высокими коэффициентами передискретизации, но и задержками в цифровых КИХ-фильтрах (от единиц до сотен микросекунд). Тем не менее, области применения Σ - Δ -АЦП весьма обширны – от низкочастотных прецизионных измерений до аудиоаппаратуры.

Сегодня производители СБИС выпускают самые разнообразные Σ - Δ -АЦП, от 8- до 24-разрядных, с частотами дискретизации от единиц герц до 10 МГц, одно- и многоканальные, со встроенными усилителями входных сигналов, с однополярными и дифференциальными аналоговыми входами, с мощностью потребления от ватта до 200–500 мкВт, с одnorазрядными и многоразрядными Σ - Δ -модуляторами. Рассмотрим некоторые из этих устройств на примере продукции ведущих фирм-производителей – компаний Analog Devices и Texas Instruments.

МИКРОСХЕМЫ Σ - Δ -АЦП

Типичный представитель семейства Σ - Δ -АЦП – СБИС AD7794 и AD7795 компании Analog Devices (рис.6) [2]. Они различаются только разрядностью представления данных (24 и 16 бит, соответственно). Эти приборы предназначены для высокоточных измерений. Частота выборки у них невелика – от 4, 17 до 470 Гц. Однако чрезвычайно мало и энергопотребление – порядка 400 мкВт при напряжении питания от 2,7 до 5,25 В.

АЦП помимо Σ - Δ -модулятора оснащены встроенным источником

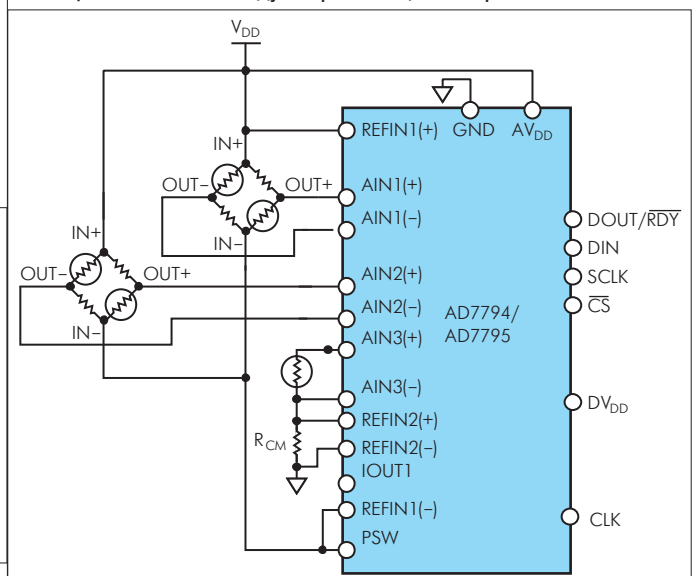


Рис.7. Пример применения AD7794 в схеме расходомера

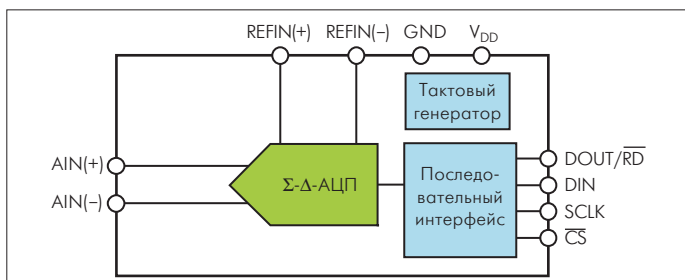


Рис. 8. Σ-Δ-АЦП AD7788/89

опорного напряжения (1,17 В), тактовым генератором, цифровым фильтром, буфером входного сигнала и инструментальным усилителем. Предусмотрено 3 пары дифференциальных аналоговых входов, сигналы которых могут буферизироваться – подключаться к операционному усилителю с высоким входным сопротивлением, что важно при работе с внешними датчиками резистивного типа (например, датчиками давления или температуры в виде резисторного моста). Если подключен внешний источник опорного напряжения, специальный детектор определяет, находится ли опорное напряжение в допустимом диапазоне (выше 0,3 В). Измеренные результаты транслируются через последовательный интерфейс.

Если входной сигнал мал, его можно усилить с помощью встроенного инструментального усилителя. Коэффициент его усиления K_y задается программно в диапазоне от 1 до 128 как 2^N . Встроенный усилитель перед Σ-Δ-модулятором помогает существенно увеличить отношение сигнал/шум и тем самым повысить эффективное разре-

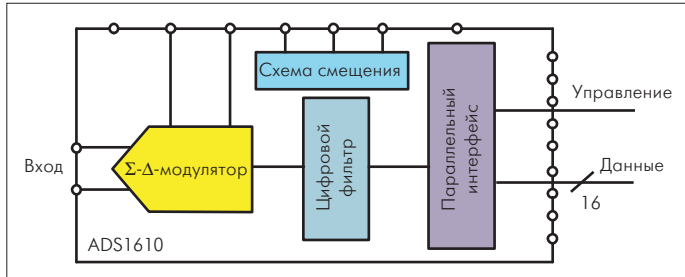


Рис. 9. Σ-Δ-АЦП ADS1610

шение сигнала ENOB.

АЦП может работать как в униполярном, так биполярном режиме (дифференциальное напряжение на входе изменяется либо от 0 до V_{max} , либо от $-V_{max}$ до V_{max}). В зависимости от этого выходные отсчеты АЦП представлены либо в прямом коде: $V = (2^N \cdot V \cdot K_y) / V_{ref}$, либо в смещенном: $V = 2^{N-1} \cdot (V \cdot K_y / V_{ref} + 1)$. N – разрядность выборки, для AD7795 $N = 24$. Отметим, что речь идет именно о дифференциальном напряжении, абсолютные значения напряжений на входах должны быть положительными. Для этого используется встроенный генератор напряжения смещения. АЦП оснащены системой автоматической калибровки, позволяющей корректировать результат каждого измерения (независимо по каждому каналу) посредством калибровочных коэффициентов смещения нуля и масштабирования.

Основное назначение Σ-Δ-АЦП данного типа – высокочастотные из-

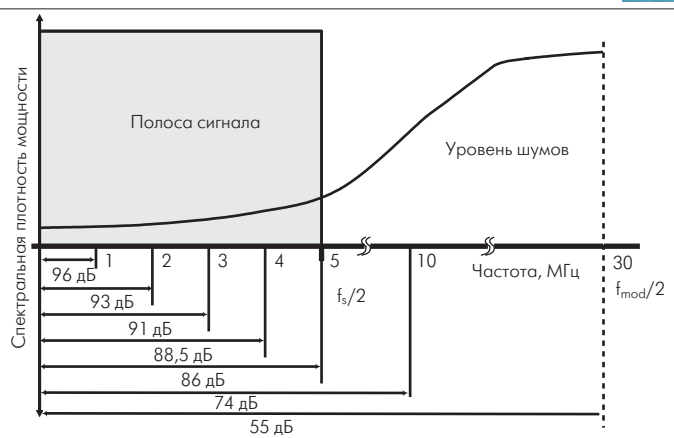


Рис. 11. Отношение сигнал/шум ADS1610 при различных частотах дискретизации

мерения медленно изменяющихся сигналов (давление, температура, скорость потока и т.п.) в сложной помеховой обстановке (встроенные промышленные системы, внешние датчики и др.).

Мы столь подробно остановились на АЦП AD7795 как на приборе, вобравшем в себя все функциональные элементы современных Σ-Δ-АЦП. Отметим чрезвычайно низкую потребляемую мощность данных приборов и их низкую стоимость АЦП AD7794/95 – 5,8 и 4,4 долл., соответственно (здесь и далее мы указываем цену, приведенную производителем в США для партий от 1000 шт.).

Компания Analog Devices выпускает АЦП и с меньшим потреблением – на уровне 225 мкВт. Это АЦП AD7788 и AD7789 – функционально очень простые приборы, также 16- и 24-разрядные, с частотой дискретизации 16,6 Гц. Они оснащены одной парой дифференциальных входов и от рассмотренных СБИС AD7794/95 отличаются существенно упрощенной структурой (рис.8). Цена приборов – 1,99 и 2,95 долл. Аналогичен им и 24-разрядный АЦП AD7787, обладающий той же мощностью потребления, но оснащенный встроенным буфером входного сигнала (цена – 3,95 долл.).

Компания Analog Devices производит и относительно высокоскоростные Σ-Δ-АЦП. Например, AD7760 – это 24-разрядный Σ-Δ-АЦП с частотой выборки до 2,5 МГц, причем динамический диапазон на такой частоте составляет 100 дБ. АЦП содержит один дифференциальный входной канал, встроенный операционный усилитель и калибровочные регистры. В Σ-Δ-модуляторе используется многоразрядная обработка, тактовая частота модулятора – 40 МГц. Цифровую фильтрацию реализуют три КИХ-фильтра-дециматора, причем коэффициенты последнего из них может задавать пользователь. Общий коэффициент децимации изменяется от 8 до 256. Групповая задержка цифровых фильтров составляет 12 мкс при коэффициенте децимации $D = 8$ и 358 мкс при $D = 256$. Напряжение питания АЦП – 5 В, максимальная потребляемая мощность – 958 мВт. Интерфейс данных – параллельный 16-разрядный. Стоит такой АЦП 34,95 долл.

Еще более быстродействующий, но 16-разрядный Σ-Δ-АЦП производит другой лидер в области АЦП – компания Texas Instruments [3]. Это СБИС ADS1610 с частотой дискретизации до 10 МГц и такто-

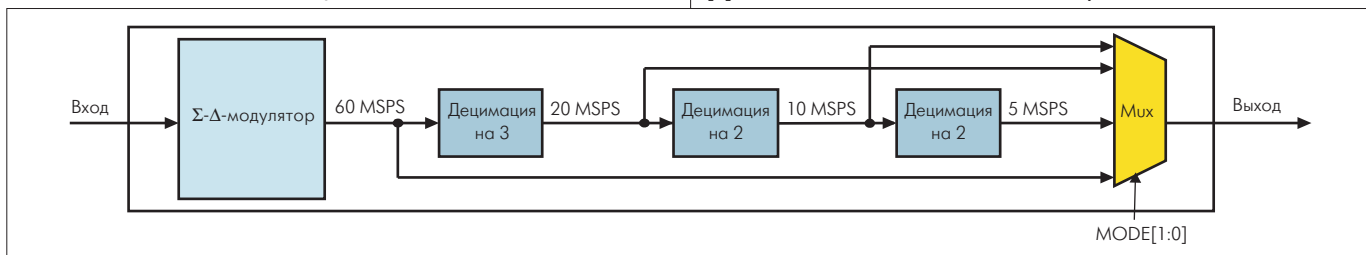


Рис. 10. Цифровая фильтрация в Σ-Δ-АЦП ADS1610

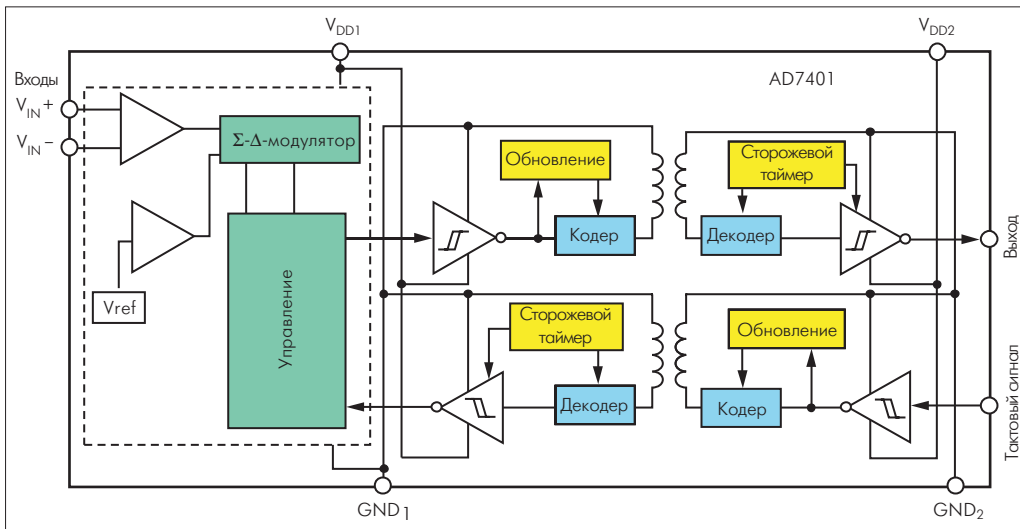


Рис. 12. Функциональная схема Σ - Δ -АЦП AD7401 с цифровой гальванической развязкой

частотой 16 МГц. Максимальная мощность потребления – 100 мВт. Особенность этой простой СБИС – выход оцифрованного потока и вход сигнала от внешнего тактового генератора гальванически развязаны с функциональными узлами СБИС (рис. 12). Для этого используется фирменная технология iCoupler. Цена СБИС – 4 долл. Характерная область применения такого АЦП – системы управления мощными устройствами, например электродвигателями.

Аналогичные Σ - Δ -модуляторы выпускает и компания Texas Instruments. Например, ИС

AD1208 – Σ - Δ -модулятор второго порядка с буферизованным дифференциальным входом, дифференциальным цифровым выходом и тактовой частотой до 10 МГц. Стоит такой прибор 2,95 долл.

Важная область применения Σ - Δ -АЦП – обработка аудиосигналов. Именно здесь необходимо сочетание низкого уровня шумов, большого динамического диапазона, высокой точности представления и низкой стоимости при относительно небольших требуемых частотах выборки. Характерный представитель данного класса Σ - Δ -АЦП – AD1871, двухканальная сдвоенная ИС АЦП, адаптированная для обработки звукового стереосигнала (рис. 13). Каждый канал включает собственный программируемый входной усилитель (от 0 до 12 дБ с шагом 3 дБ), Σ - Δ -модулятор и цифровой фильтр. Частота дискретизации – до 96 кГц. Разрядность представления – 16/20/24 бита. Динамический диапазон – 105 дБ.

Модулятор – второго порядка, с многоразрядной обработкой. Его тактовая частота 6,144 МГц подобрана, исходя из стандартного для аудиосистем ряда частот дискретизации: 32, 48 и 96 кГц (6,144 МГц = 128 · 48 кГц). Возможны и иные частоты дискретизации, например 44,1 кГц, что реализуется посредством цифрового фильтра.

СБИС AD1871 оснащена последовательным трехпроводным интерфейсом, который обеспечивает совместимость как с популярными аудио интерфейсами, так и с DSP. Напряжение питания СБИС – 5 В. Стоимость – 5,63 долл. в партии от 1000 шт.

Мы очень бегло рассмотрели основные типы Σ - Δ -АЦП. Выбор примеров преимущественно из продуктов компании Analog Devices достаточно случаен, хотя и свидетельствует о ее ведущих позициях в данной области. Но ей не уступает и фирма Texas Instruments (на текущий момент она производит 49 типов Σ - Δ -АЦП). Σ - Δ -АЦП различного назначения выпускает и ряд других компаний – Linear Technology, Cirrus Logic, Maxim, Philips и т.д. Однако лидирующие позиции первых двух фирм объясняются тем, что бурное развитие Σ - Δ -АЦП в интегральном исполнении стало возможным после того, как DSP-процессоры (и аналогичные им устройства цифровой фильтрации) превратились в недорогие массовые устройства. А в этой области и Analog Devices и Texas Instruments доминируют практически безраздельно.

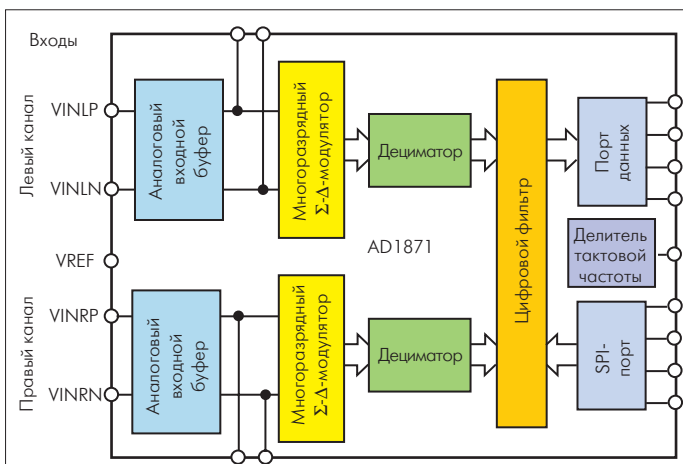


Рис. 13. Σ - Δ -АЦП AD1871 для обработки стереосигнала

AD1555 – это Σ - Δ -модулятор четвертого порядка с двумя входными дифференциальными каналами, усилителем мощности с программируемыми коэффициентами усиления (1; 2,5; 8,5; 34 и 128), встроенным источником опорного напряжения. Номинальная тактовая частота модулятора 256 кГц. Прибор отличает широкий динамический диапазон – порядка 120 дБ. Но и стоит такое устройство недешево – объявленная цена 81,56 долл. в партии от 100 шт.

СБИС AD1556 содержит двухкаскадный цифровой фильтр-дециматор с коэффициентами децимации от 16 до 1024. Соответственно, при скорости входного потока от AD1555 256 Кбит/с частота выдачи 24-разрядных кодов на выходе цифрового фильтра составляет от 16 кГц до 250 Гц. Цена в партии от 100 шт. – 27,5 долл.

Выпускаются и другие СБИС Σ - Δ -модуляторов. Например, AD7401 – Σ - Δ -модулятор второго порядка с максимальной тактовой

Литература

1. Walt Kester, Editor. Data Conversion Handbook. – Elsevier, 2005.
2. www.analog.com
3. www.ti.com