

Как работают аналогово-цифровые преобразователи

и что можно узнать из спецификации на АЦП?

В статье рассказывается об устройстве и принципах действия аналогово-цифровых преобразователей различных типов, а также об их основных характеристиках, указываемых производителями в документации.

**Вольфганг Райс,
WBC**

**Адаптированный перевод.
Печатается с разрешения
компании WBC**

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) — один из самых важных электронных компонентов в измерительном и тестовом оборудовании. АЦП преобразует напряжение (аналоговый сигнал) в код, над которым микропроцессор и программное обеспечение выполняют определенные действия. Даже если вы работаете только с цифровыми сигналами, скорее всего, вы используете АЦП в составе осциллографа, чтобы узнать их аналоговые характеристики.

Существует несколько основных типов архитектуры АЦП, хотя в пределах каждого типа существует также множество вариаций. Различные типы измерительного оборудования используют различные типы АЦП. Например, в цифровом осциллографе используется высокая частота дискретизации, но не требуется высокое разрешение. В цифровых мультиметрах нужно большее разрешение, но можно пожертвовать скоростью измерения. Системы сбора данных общего назначения по скорости дискретизации и разрешающей способности обычно занимают место между осциллографами и цифровыми мультиметрами. В оборудовании такого типа используются АЦП последовательного приближения, либо сигма-дельта АЦП.

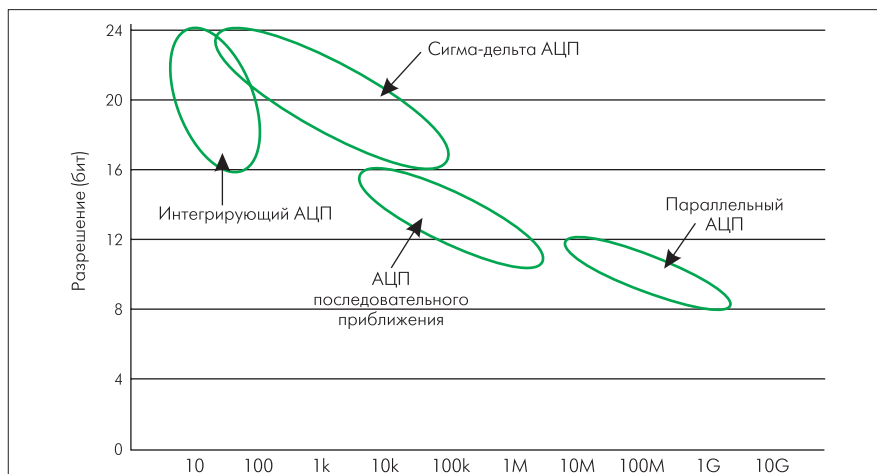


Рис. 1. Типы АЦП — разрешение в зависимости от частоты дискретизации

Существуют также параллельные АЦП для приложений, требующих скоростной обработки аналоговых сигналов, и интегрирующие АЦП с высокими разрешениями и помехоподавлением.

На рис. 1 показаны возможности основных архитектур АЦП в зависимости от разрешения и частоты дискретизации.

Параллельные АЦП

Большинство высокоскоростных осциллографов и некоторые высокочастотные измерительные приборы используют параллельные АЦП из-за их высокой скорости преобразования, которая может достигать 5Г отсчетов/с (5×10^9) для стандартных устройств и 20Г отсчетов/с для оригинальных разработок. Обычно параллельные АЦП имеют разрешение до 8 разрядов, но встречаются также 10-разрядные версии.

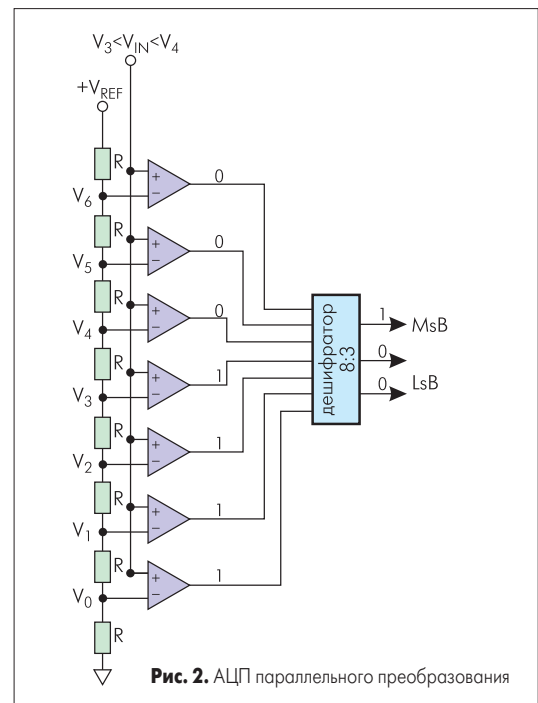


Рис. 2. АЦП параллельного преобразования

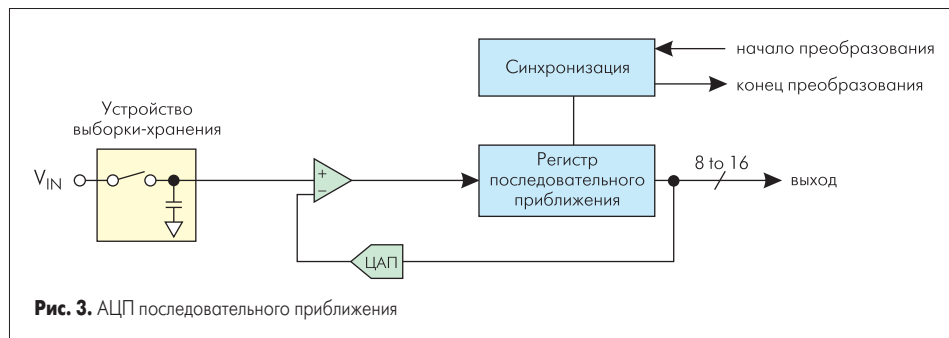


Рис. 3. АЦП последовательного приближения

Рис. 2 показывает упрощенную блок-схему 3-разрядного параллельного АЦП (для преобразователей с большим разрешением принцип работы сохраняется). Здесь используется массив компараторов, каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным напряжением. Такое опорное напряжение для каждого компаратора формируется на встроенном прецизионном резистивном делителе. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда (LSB), и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным $V_{REF}/2^3$. В результате для 3-разрядного АЦП требуется 2^3-1 или семь компараторов. А, например, для 8-разрядного параллельного АЦП потребуется уже 255 (или (2^8-1)) компараторов.

С увеличением входного напряжения компараторы последовательно устанавливают свои выходы в логическую единицу вместо логического нуля, начиная с компаратора, отвечающего за младший значащий разряд. Можно представить преобразователь как ртутный термометр: с ростом температуры столбик ртути поднимается. На рис. 2 входное напряжение попадает в интервал между V_3 и V_4 , таким образом, 4 нижних компаратора имеют на выходе «1», а верхние три компаратора — «0». Дешифратор преобразует (2^3-1) -разрядное цифровое слово с выходов компараторов в двоичный 3-разрядный код.

Параллельные АЦП — достаточно быстрые устройства, но они имеют свои недостатки. Из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность, и их целесообразно использовать в приложениях с батарейным питанием.

АЦП последовательного приближения

Когда необходимо разрешение 12, 14 или 16 разрядов и не требуется высокая скорость преобразования, а определяющими факторами являются невысокая цена и низкое энергопотребление, то обычно применяют АЦП последовательного приближения. Этот тип АЦП чаще всего используется в разнообразных измерительных приборах и в системах сбора данных. В настоящий момент АЦП последовательного приближения позволяют измерять напряжение с точностью до 16 разрядов с частотой дискретизации от 100К (100×10^3) до 1М (1×10^6) отсчетов/с.

Рис. 3 показывает упрощенную блок-схему АЦП последовательного приближения. В основе АЦП данного типа лежит специ-

альный регистр последовательного приближения. В начале цикла преобразования все выходы этого регистра устанавливаются в логический 0, за исключением первого (старшего) разряда. Это формирует на выходе внутреннего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) сигнал, значение которого равно половине входного диапазона АЦП. А выход компаратора переключается в состояние, определяющее разницу между сигналом на выходе ЦАП и измеряемым входным напряжением.

Например, для 8-разрядного АЦП последовательного приближения (рис. 4) выходы регистра при этом устанавливаются в «10000000». Если входное напряжение меньше половины входного диапазона АЦП, тогда выход компаратора примет значение логического 0. Это даст регистру последовательного приближения команду переключить свои выходы в состояние «01000000», что, соответственно, приведет к изменению выходного напряжения с ЦАП, подаваемого на компаратор. Если при этом выход компаратора по-прежнему оставался бы в «0», то выходы регистра переключились бы в состояние «00100000». Но на этом такте преобразования выходное напряжение ЦАП меньше, чем входное напряжение (рис. 4), и компаратор переключается в состояние логической 1. Это предписывает регистру последовательного приближения сохранить «1» во втором разряде и подать «1» на третий разряд. Описанный алгоритм работы затем вновь повторяется до последнего разряда. Таким образом, АЦП последовательного приближения требуется один внутренний такт преобразования для каждого разряда, или N тактов для N-разрядного преобразования.

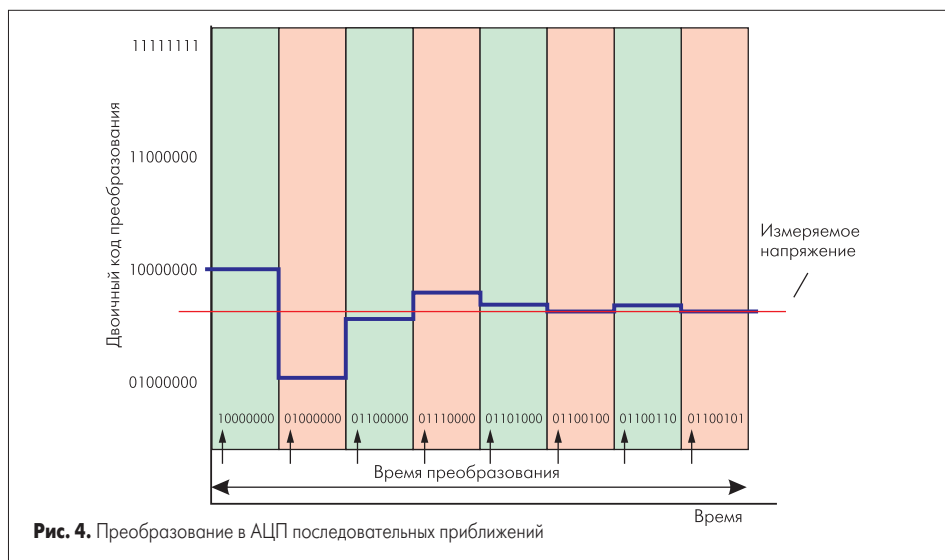


Рис. 4. Преобразование в АЦП последовательных приближений

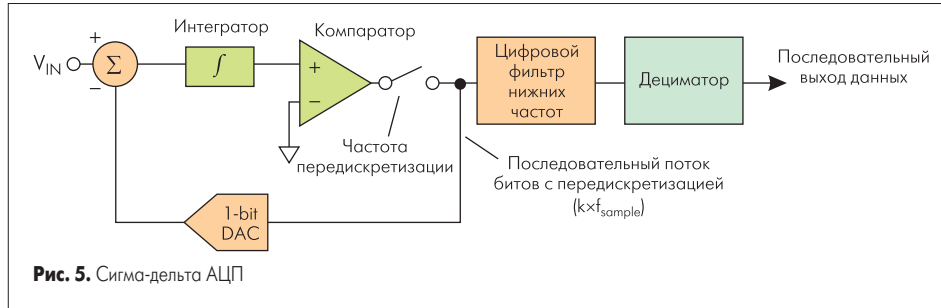
Тем не менее работа АЦП последовательного приближения имеет особенность, связанную с переходными процессами во внутреннем ЦАП. Теоретически, напряжение на выходе ЦАП для каждого из N внутренних тактов преобразования должно устанавливаться за одинаковый промежуток времени. Но на самом деле этот промежуток в первых тактах значительно больше, чем в последних. Поэтому время преобразования 16-разрядного АЦП последовательного приближения более чем в два раза превышает время преобразования 8-разрядного АЦП данного типа.

Сигма-дельта АЦП

Для проведения большинства измерений часто не требуется АЦП со скоростью преобразования, которую дает АЦП последовательного приближения, зато необходима большая разрешающая способность. Сигма-дельта АЦП могут обеспечивать разрешающую способность до 24 разрядов, но при этом уступают в скорости преобразования. Так, в сигма-дельта АЦП при 16 разрядах можно получить частоту дискретизации до 100К отсчетов/с, а при 24 разрядах эта частота падает до 1К отсчетов/с и менее, в зависимости от устройства.

Обычно сигма-дельта АЦП применяются в разнообразных системах сбора данных и в измерительном оборудовании (измерение давления, температуры, веса и т. п.), когда не требуется высокая частота дискретизации и необходимо разрешение более 16 разрядов.

Принцип работы сигма-дельта АЦП сложнее для понимания. Эта архитектура относится к классу интегрирующих АЦП. Но основная особенность сигма-дельта АЦП состоит в том, что частота следования выборок, при которых, собственно, и происходит анализ уровня напряжения измеряемого сигнала, существенно превышает частоту появления отсчетов на выходе АЦП (частоту дискретизации). Эта частота следования выборок называется частотой передискретизации. Так, сигма-дельта АЦП со скоростью преобразования 100×10^3 отсчетов/с, в котором используется частота передискретизации в 128 раз больше, будет производить выборку значений входного аналогового сигнала с частотой 12,8М отсчетов/с.



Блок-схема сигма-дельта АЦП первого порядка приведена на рис. 5. Аналоговый сигнал подается на интегратор, выходы которого подсоединены к компаратору, который в свою очередь присоединен к 1-разрядному ЦАП в петле обратной связи. Путем серии последовательных итераций интегратор, компаратор, ЦАП и сумматор дают поток последовательных битов, в котором содержится информация о величине входного напряжения.

Результирующая цифровая последовательность затем подается на фильтр нижних частот для подавления компонентов с частотами выше частоты Котельникова (она составляет половину частоты дискретизации АЦП). После удаления высокочастотных составляющих следующий узел — дециматор — прореживает данные. В рассматриваемом нами АЦП дециматор будет оставлять 1 бит из каждых полученных 128 в выходной цифровой последовательности.

Так как внутренний цифровой ФНЧ в сигма-дельта АЦП представляет собой неотъемлемую часть для осуществления процесса преобразования, время установления ФНЧ становится фактором, который необходимо учитывать при скачкообразном изменении входного сигнала. Например, при переключении входного мультиплексора или при переключении предела измерения прибора необходимо подождать, пока пройдут несколько отсчетов АЦП, и лишь потом считывать корректные выходные данные.

Дополнительным и очень важным достоинством сигма-дельта АЦП является то, что все его внутренние узлы могут быть выполнены интегральным способом на площади одного кремниевго кристалла. Это заметно снижает стоимость конечных устройств и повышает стабильность характеристик АЦП.

Интегрирующие АЦП

И последний тип АЦП, о котором пойдет здесь речь, — АЦП двухтактного интегрирования. В цифровых мультиметрах, как правило, используются именно такие АЦП, так как в этих измерительных приборах необходимо сочетание высокого разрешения и высокого помехоподавления. Идея преобразования в таком интегрирующем АЦП гораздо менее сложна, чем в сигма-дельта АЦП.

На рис. 6 показан принцип работы АЦП двухтактного интегрирования. Входной сигнал заряжает конденсатор в течение фиксированного периода времени, который обычно составляет один период частоты питающей сети (50 или 60 Гц) или кратен ему. При интегрировании входного сигнала в течение проме-

жутка времени такой длительности высокочастотные помехи подавляются. Одновременно исключается влияние нестабильности напряжения сетевого источника питания на точность преобразования. Это происходит потому, что значение интеграла от синусоидального сигнала равно нулю, если интегрирование осуществляется во временном интервале, кратном периоду изменения синусоиды.

По окончании времени заряда АЦП разряжает конденсатор с фиксированной скоростью, в то время как внутренний счетчик подсчитывает количество тактовых импульсов за время разряда конденсатора. Большее время разряда, таким образом, соответствует большему значению показаний счетчика и большему измеряемому напряжению (рис. 6).

АЦП двухтактного интегрирования имеют высокую точность и высокую разрешающую способность, а также имеют сравнительно простую структуру. Это дает возможность выполнять их в виде интегральных микросхем. Основным недостатком таких АЦП — большое время преобразования, обусловленное привязкой периода интегрирования к длительности периода питающей сети. Например, для 50-герцового оборудования частота дискретизации АЦП двухтактного интегрирования не превышает 25 отсчетов/с. Конечно, такие АЦП могут работать и с большей частотой дискретизации, но при увеличении последней помехозащищенность падает.

Спецификация АЦП

Существуют общие определения, которые принято использовать в отношении аналого-цифровых преобразователей. Тем не менее характеристики, приводимые в технической документации производителей АЦП, могут показаться довольно путанными. Правильный же выбор оптимального по сочетанию своих

характеристик АЦП для конкретного приложения требует точной интерпретации данных, приводимых в технической документации.

Наиболее часто путаемыми параметрами являются разрешающая способность и точность, хотя эти две характеристики реального АЦП крайне слабо связаны между собой. Разрешение не идентично точности, 12-разрядный АЦП может иметь меньшую точность, чем 8-разрядный. Для АЦП разрешение представляет собой меру того, на какое количество сегментов может быть поделен входной диапазон измеряемого аналогового сигнала (например, для 8-разрядного АЦП это $2^8 = 256$ сегментов). Точность же характеризует суммарное отклонение результата преобразования от своего идеального значения для данного входного напряжения. То есть разрешающая способность характеризует потенциальные возможности АЦП, а совокупность точностных параметров определяет реализуемость такой потенциальной возможности.

АЦП преобразует входной аналоговый сигнал в выходной цифровой код. Для реальных преобразователей, изготавливаемых в виде интегральных микросхем, процесс преобразования не является идеальным: на него оказывают влияние как технологический разброс параметров при производстве, так и различные внешние помехи. Поэтому цифровой код на выходе АЦП определяется с погрешностью. В спецификации на АЦП указываются погрешности, которые дает сам преобразователь. Их обычно делят на статические и динамические. При этом именно конечное приложение определяет, какие характеристики АЦП будут считаться определяющими, самыми важными в каждом конкретном случае.

Статическая погрешность

В большинстве применений АЦП используют для измерения медленно изменяющегося низкочастотного сигнала (например, от датчика температуры, давления, от тензодатчика и т. п.), когда входное напряжение пропорционально относительно постоянной физической величине. Здесь основную роль играет статическая погрешность измерения. В спецификации АЦП этот тип погрешности определяют аддитивная погрешность (Offset), мультипликативная погрешность (Full-Scale), дифференциальная нелинейность (DNL), интегральная

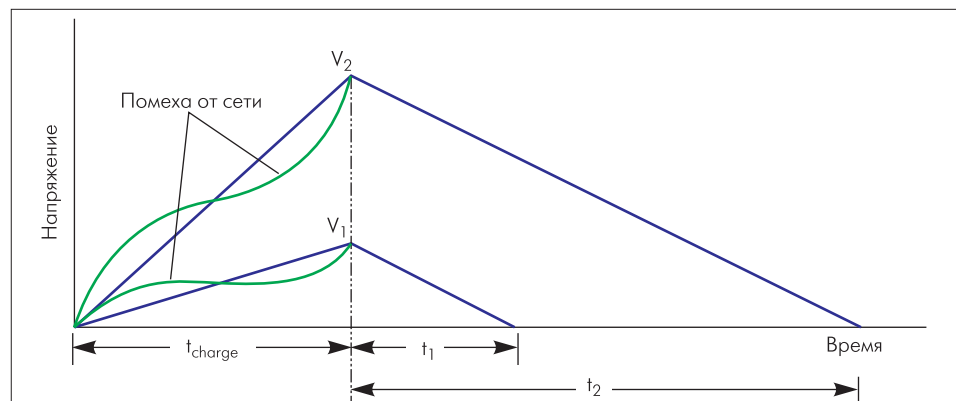
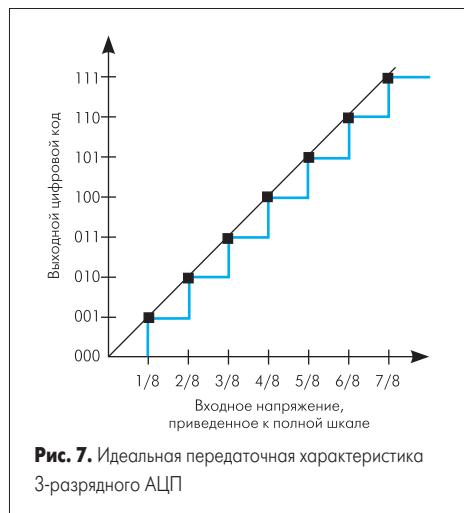


Рис. 6. Интегрирующий АЦП. Зеленым цветом показана помеха от сети (1 период)



нелинейность (INL) и погрешность квантования. Эти пять характеристик позволяют полностью описать статическую погрешность АЦП.

Идеальная передаточная характеристика АЦП

Передаточная характеристика АЦП — это функция зависимости кода на выходе АЦП от напряжения на его входе. Такой график представляет собой кусочно-линейную функцию из 2^N «ступеней», где N — разрядность АЦП. Каждый горизонтальный отрезок этой функции соответствует одному из значений выходного кода АЦП (рис. 7). Если соединить линиями начала этих горизонтальных отрезков (на границах перехода от одного значения кода к другому), то идеальная передаточная характеристика будет представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат.

Рис. 7 иллюстрирует идеальную передаточную характеристику для 3-разрядного АЦП с контрольными точками на границах перехода кода. Выходной код принимает наименьшее значение (000b) при значении входного сигнала от 0 до $1/8$ полной шкалы (максимального значения кода этого АЦП). Также следует отметить, что АЦП достигнет значения кода полной шкалы (111b) при $7/8$ полной шкалы, а не при значении полной шкалы. Таким образом, переход в максимальное значение на выходе происходит не при напряжении полной шкалы, а при значении, меньшем на наименьший значащий разряд (LSB), чем входное напряжение полной шкалы. Передаточная характеристика может быть реализована со смещением $-1/2$ LSB. Это достигается смещением передаточной характеристики влево, что



сдвигает погрешность квантования из диапазона $-1 \dots 0$ LSB в диапазон $-1/2 \dots +1/2$ LSB.

Из-за технологического разброса параметров при изготовлении интегральных микросхем реальные АЦП не имеют идеальной передаточной характеристики. Отклонения от идеальной передаточной характеристики определяют статическую погрешность АЦП и приводятся в технической документации.

Аддитивная погрешность

Идеальная передаточная характеристика АЦП пересекает начало координат, а первый переход кода происходит при достижении значения 1 LSB. Аддитивная погрешность (погрешность смещения) может быть определена как смещение всей передаточной характеристики влево или вправо относительно оси входного напряжения, как показано на рис. 9. Таким образом, в определение аддитивной погрешности АЦП намеренно включено смещение $1/2$ LSB.

Мультипликативная погрешность

Мультипликативная погрешность (погрешность полной шкалы) представляет собой разность между идеальной и реальной передаточными характеристиками в точке максимального выходного значения при условии нулевой аддитивной погрешности (смещение отсутствует). Это проявляется как изменение наклона передаточной функции, что иллюстрирует рис. 10.

Дифференциальная нелинейность

У идеальной передаточной характеристики АЦП ширина каждой «ступеньки» должна быть одинакова. Разница в длине горизонтальных отрезков этой кусочно-линейной функции



из 2^N «ступеней» представляет собой дифференциальную нелинейность (DNL).

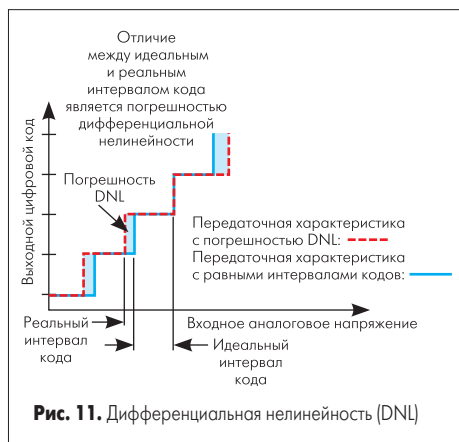
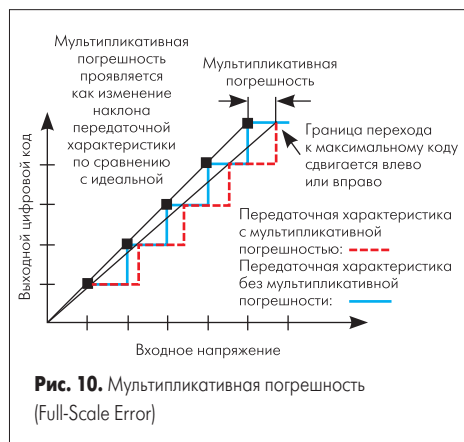
Величина наименьшего значащего разряда у АЦП составляет $V_{ref}/2^N$, где V_{ref} — опорное напряжение, N — разрешение АЦП. Разность напряжений между каждым кодовым переходом должна быть равна величине LSB. Отклонение этой разности от LSB определяется как дифференциальная нелинейность. На рисунке это показано как неравные промежутки между «шагами» кода или как «размытость» границ переходов на передаточной характеристике АЦП.

Интегральная нелинейность

Интегральная нелинейность (INL) — это погрешность, которая вызывается отклонением линейной функции передаточной характеристики АЦП от прямой линии, как показано на рис. 12. Обычно передаточная функция с интегральной нелинейностью аппроксимируется прямой линией по методу наименьших квадратов. Часто аппроксимирующей прямой просто соединяют наименьшее и наибольшее значения. Интегральную нелинейность определяют путем сравнения напряжений, при которых происходят кодовые переходы. Для идеального АЦП эти переходы будут происходить при значениях входного напряжения, точно кратных LSB. А для реального преобразователя такое условие может выполняться с погрешностью. Разность между «идеальными» уровнями напряжения, при которых происходит кодовый переход, и их реальными значениями выражается в единицах LSB и называется интегральной нелинейностью.

Погрешность квантования

Одна из наиболее существенных составляющих ошибки при измерениях с помощью АЦП — погрешность квантования — является результатом самого процесса преобразования. Погрешность квантования — это погрешность,



вызванная значением шага квантования и определяемая как 1/2 величины наименьшего значащего разряда (LSB). Она не может быть исключена в аналого-цифровых преобразованиях, так как является неотъемлемой частью процесса преобразования, определяется разрешающей способностью АЦП и не меняется от АЦП к АЦП с равным разрешением.

Динамические характеристики

Динамические характеристики АЦП обычно определяют с помощью спектрального анализа, по результатам выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) над массивом выходных значений АЦП, соответствующих некоторому тестовому входному сигналу.

На рис. 13 представлен пример частотного спектра измеряемого сигнала. Нулевая гармоника соответствует основной частоте входного сигнала. Все остальное представляет собой шум, который содержит гармонические искажения, тепловой шум, шум 1/f и шум квантования. Некоторые составляющие шума генерируются самим АЦП, некоторые могут поступать на вход АЦП из внешних цепей. Гармонические искажения, например, могут содержаться в измеряемом сигнале и одновременно генерироваться АЦП в процессе преобразования.

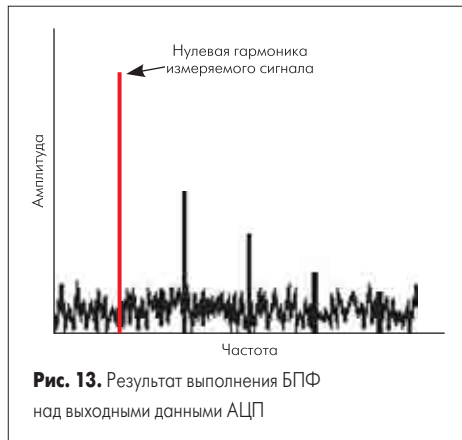


Рис. 13. Результат выполнения БПФ над выходными данными АЦП

Отношение «сигнал/шум»

Отношение «сигнал/шум» (SNR) — это отношение среднеквадратического значения величины входного сигнала к среднеквадратическому значению величины шума (за исключением гармонических искажений), выраженное в децибелах:

$$SNR (dB) = 20 \log [V_{signal}(rms)/V_{noise}(rms)]$$

Это значение позволяет определить долю шума в измеряемом сигнале по отношению к полезному сигналу.

Шум, измеряемый при расчете SNR, не включает гармонические искажения, но включает шум квантования. Для АЦП с определенным разрешением именно шум квантования ограничивает возможности преобразователя теоретически лучшим значением отношения «сигнал/шум», которое определяется как

$$SNR (dB) = 6.02 N + 1.76$$

где N — разрешение АЦП.

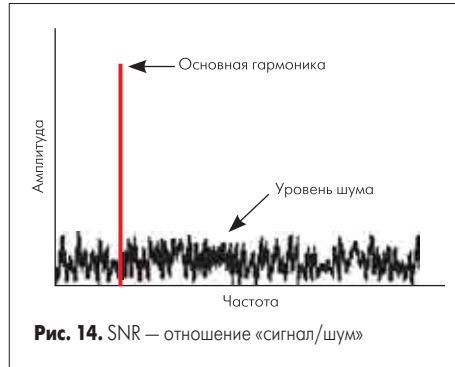


Рис. 14. SNR — отношение «сигнал/шум»

Спектр шума квантования АЦП стандартных архитектур имеет равномерное распределение по частоте. Поэтому величина этого шума не может быть уменьшена путем увеличения времени преобразования и последующего усреднения результатов. Шум квантования может быть снижен только путем проведения измерений с помощью АЦП большей разрядности.

Особенность сигма-дельта АЦП состоит в том, что спектр шума квантования у него распределен по частоте неравномерно — он смещен в сторону высоких частот. Поэтому, увеличивая время измерения (и, соответственно, количество выборок измеряемого сигнала), накапливая и затем усредняя полученную выборку (фильтр нижних частот), можно получить результат измерений с более высокой точностью. Естественно, при этом общее время преобразования будет возрастать.

Другие источники шума АЦП включают тепловой шум, шум составляющей 1/f и джиттер опорной частоты.

Общие гармонические искажения

Нелинейность в результатах преобразования данных приводит к появлению гармонических искажений. Такие искажения наблюдаются как «выбросы» в спектре частот на четных и нечетных гармониках измеряемого сигнала (рис. 15).

Эти искажения определяют как общие гармонические искажения (THD). Они определяются как

$$THD = 20 \log \left[\frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \right]$$

Величина гармонических искажений уменьшается на высоких частотах до точки, в которой амплитуда гармоник становится меньше, чем уровень шума. Таким образом, если мы

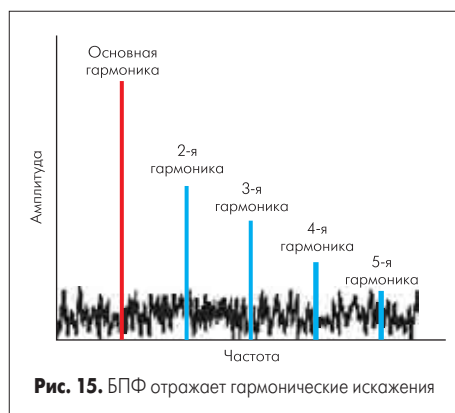


Рис. 15. БПФ отражает гармонические искажения

анализируем вклад гармонических искажений в результаты преобразования, это можно делать либо во всем спектре частот, ограничивая при этом амплитуду гармоник уровнем шума, либо ограничивая полосу частот для анализа. Например, если в нашей системе стоит ФНЧ, то высокие частоты нам просто не интересны и высокочастотные гармоники не подлежат учету.

Отношение «сигнал/шум и искажения»

Отношение «сигнал/шум и искажения» (SiNAD) более полно описывает шумовые характеристики АЦП. SiNAD учитывает величину как шума, так и гармонических искажений по отношению к полезному сигналу. SiNAD рассчитывается по следующей формуле:

$$SiNAD = 20 \log \left[\frac{V_1}{\sqrt{V_2^2 + \dots + V_n^2 + V_{noise}^2}} \right]$$

Динамический диапазон, свободный от гармоник

Динамический диапазон, свободный от гармоник, представляет собой разницу между величиной измеряемого сигнала и наибольшим пиком искажений (см. рис. 16). Этот динамический диапазон обозначается как SFDR. Он ограничен снизу амплитудой максимальной гармоники паразитных выбросов на выходе АЦП в диапазоне его рабочих частот.

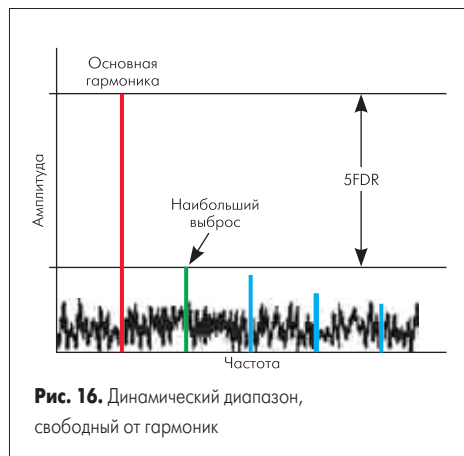
Пример спецификации АЦП

Спецификация АЦП, приводимая в технической документации на микросхемы, помогает обоснованно выбрать преобразователь

Таблица 1. Электрические характеристики C8051F064

Параметры	Условия	Типичное	Макс.
Характеристики на постоянном токе			
Разрядность, бит		16	
Интегральная нелинейность, LSB	Однопроводный	±0,75	±2
	Дифференциальный	±0,5	±1
Дифференциальная нелинейность, LSB	Гарантированная монотонность	±0,5	
Аддитивная погрешность (смещение), мВ		0,1	
Мультипликативная погрешность, % F.S.		0,008	
Температурный коэффициент усиления, ppm/°C		0,5	
Динамические характеристики (Частота дискретизации 1 Msps, AVDD, AV+ = 3,3 В)			
Сигнал/шум и искажения, дБ	Fin = 10 кГц, однопроводный	86	
	Fin = 100 кГц, однопроводный	84	
	Fin = 10 кГц, дифференциальный	89	
	Fin = 100 кГц, дифференциальный	88	
Общие гармонические искажения, дБ	Fin = 10 кГц, однопроводный	96	
	Fin = 100 кГц, однопроводный	84	
	Fin = 10 кГц, дифференциальный	103	
	Fin = 100 кГц, дифференциальный	93	
Динамический диапазон, свободный от гармоник, дБ	Fin = 10 кГц, однопроводный	97	
	Fin = 100 кГц, однопроводный	88	
	Fin = 10 кГц, дифференциальный	104	
	Fin = 100 кГц, дифференциальный	99	

Примечание: VDD = 3,0 В, AV+ = 3,0 В, AVDD = 3,0 В, VREF = 2,50 В (REFBE = 0), -40... +85 °C, если не указано иначе.



для конкретного применения. В качестве примера рассмотрим спецификацию АЦП, интегрированного в новый микроконтроллер C8051F064 производства фирмы Silicon Laboratories.



Кристалл C8051F064 представляет собой скоростной 8-разрядный микроконтроллер для совместной обработки аналоговых и цифровых сигналов с двумя интегрированными 16-разрядными АЦП последовательных при-

ближений. Встроенные АЦП могут работать в однопроводном и дифференциальном режимах при максимальной производительности до 1М отсчетов/с. На рис. 17 приведены основные характеристики АЦП микроконтроллера C8051F064. Для самостоятельной оценки возможностей C8051F064 по цифровой и аналоговой обработке данных можно воспользоваться недорогим оценочным комплектом C8051F064. Комплект содержит оценочную плату на базе C8051F064, USB-кабель, документацию, а также программное обеспечение для тестирования аналоговых динамических и статических характеристик интегрированного высокоточного 16-разрядного АЦП.

Источники информации

1. http://www.wbc-europe.com/en/services/pim_application_guide.html
2. www.silabs.com