

ВСТРАИВАЕМЫЙ АЦП ИЛИ ОТДЕЛЬНАЯ МИКРОСХЕМА?

ИМАН ЧАЛАБИ (IMAN CHALABI), Microchip Technology

В статье сравниваются встраиваемые АЦП и АЦП, производимые в виде отдельных микросхем. Достаточно подробно рассматриваются преимущества и недостатки каждого варианта, и даются рекомендации по выбору.

ВВЕДЕНИЕ

В любой более-менее сложной электронной системе разработчик наверняка столкнется с задачей сбора и обработки аналоговых сигналов. По этой причине практически в составе любого 32-бит микроконтроллера (МК) общего назначения найдется встроенный многоканальный 12-бит АЦП последовательного приближения, иногда даже два АЦП. В то же время на рынке имеется широчайший ассортимент АЦП в виде отдельных микросхем. Какой же вариант предпочесть – встроенный в МК АЦП или отдельную микросхему? Мы попытаемся ответить на этот вопрос. Начнем наш небольшой анализ с рассмотрения технологии и производительности.

ВСТРАИВАЕМЫЕ АЦП

Поскольку встраиваемый АЦП относится к периферийным модулям МК, скорее всего, он будет разрабатываться по тем же проектным нормам. В настоящее время большинство 32-бит универсальных МК выпускаются по нормам 28 нм, которые отлично подходят для цифровых модулей, обеспечивая хорошую плотность размещения транзисторов на кристалле. Однако для аналоговых модулей подобные проектные нормы едва ли можно назвать идеальным решением. Перечислим основные недостатки встраиваемых АЦП.

- Из-за компонентов меньшего размера возрастают внутренние шумы в АЦП, в частности тепловой шум.
- Конденсаторы большой емкости, используемые для уменьшения шума, заметно усложняют проектирование и производство. Дело в том, что аналоговые компоненты сложно реализовать при малых геометрических размерах кристалла.
- Конденсаторы малой емкости реализуются проще, но из-за них возникают нелинейности и увеличиваются токи утечек.
- При 28-нм технологии заметно сложнее реализовать согласование, чем

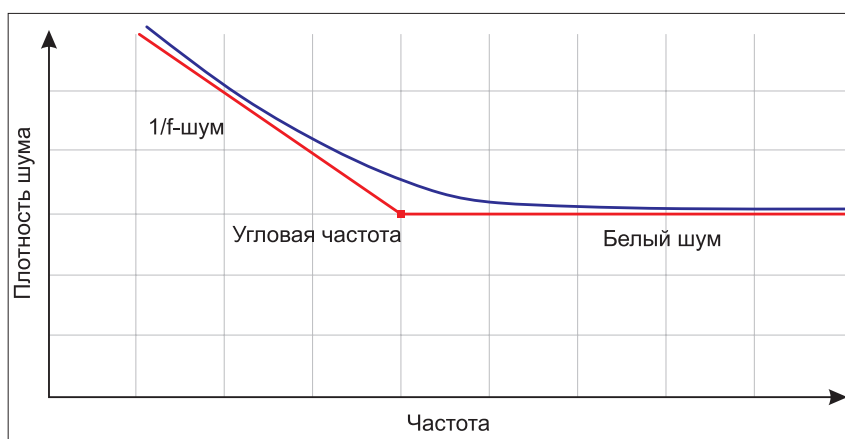


Рис. 1. Частотные характеристики шума

при 90- и 180-нм нормах. В результате при производстве могут возникнуть разбросы параметров.

- Следует иметь в виду и увеличение стоимости из-за возрастания стоимости 28-нм процесса по сравнению с 98- или 180-нм техпроцессами.

Еще одна проблема при уменьшении проектных норм заключается в возрастании шума $1/f$, который преобладает в низкой полосе частот. Обычно он преобладает в полосе 0–10 Гц. На более высоких частотах господствует белый шум (см. рис. 1). Компенсировать белый шум (но не шум $1/f$) можно методами цифровой обработки сигналов, например передискретизацией и усреднением. К сожалению, шум $1/f$ таким простым способом компенсировать нельзя.

При малых технологических нормах возрастает угловая частота, начиная с которой белый шум начинает преобладать над шумом $1/f$. Таким образом, увеличиваются шумы $1/f$, и возрастает шум преобразования. Таким образом, для уменьшения шумов приходится прибегать к относительно сложным алгоритмическим методам, что может снизить производительность системы.

Не следует также забывать, что в непосредственной близости с аналоговыми каналами АЦП на кристалле расположены цифровые узлы, создаю-

щие помехи при коммутации. Можно синхронизировать работу АЦП с главной тактовой частотой процессорного ядра, но поскольку память и другие цифровые периферийные модули работают с другой тактовой частотой, полностью избавиться от помех не удастся.

Еще одна проблема встраиваемого АЦП порождена широким диапазоном изменения температурного режима кристалла. Процессор может переходить с режима максимального энергопотребления в режим гибернации. Соответственно, меняется температура кристалла, отчего возникает температурный дрейф, вносящий свой вклад в бюджет погрешности. Схема температурной компенсации в большинстве случаев является непопулярной роскошью для МК общего назначения.

И, наконец, последний этап производства – тестирование готового компонента. Микроконтроллеры тестируются цифровыми тестовыми платформами, которые, разумеется, оптимизированы для измерения цифровых параметров и используют набор тестовых векторов. Задача этих платформ – обеспечить максимальную производительность. Платформы с высокой производительностью, скорее всего, не содержат, или содержат ограниченные по возможностям элементы аналогового тестирования.

По этой причине производитель нередко оговаривается, что характеристики аналоговых модулей гарантируются либо разработкой, либо путем определения параметров. Подобный подход едва ли можно считать удовлетворительным. Имеется еще несколько ограничений, о которых следует знать разработчикам.

- Нередко цифровые платформы проверяют функциональную работоспособность аналоговых модулей, но не имеют возможности проверить параметры модулей в зависимости от температуры.
- Параметры тестера ограничивают возможность проверки параметров АЦП. Например, если в тестере предусмотрена возможность проверки 8-бит АЦП с производительностью 100 Квыб/с, то нельзя с его помощью проверить в полном объеме 12-бит АЦП с производительностью 1 Мвыб/с.
- Производители не спешат добавлять в платформы тестирования функционал точной проверки аналоговых модулей, т. к. это приведет к существенному удорожанию процесса. Перечисленные проблемы усугубляются, если в МК встроены 16-бит АЦП.

АЦП В ОТДЕЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЕ

При проектировании АЦП в отдельной микросхеме можно использовать 180-нм топологию. В этом случае решаются все описанные выше проблемы, возникающие при 28-нм процессе, в т. ч. появляется возможность согласовать все элементы АЦП. Тем не менее и применение 180-нм топологии не лишено недостатков. При увеличении геометрических размеров компонентов уменьшается их плотность размещения на кристалле. Следовательно, вместо цифровых узлов АЦП, обеспечивающих цифровую обработку и коммутацию, приходится использовать аналоговые узлы, что увеличивает стоимость и в некоторых случаях уменьшает производительность. Однако у АЦП в отдельной микросхеме немало преимуществ. Мы перечислим их ниже.

Заметно упрощается топология кристалла, т. к. отсутствуют другие функциональные узлы, которые могут повлиять на характеристики АЦП. Шум от коммутации, создаваемый тактовой частотой, легко исключается за счет разнесения фаз рабочего цикла. Аналоговое преобразование осуществляется в моменты, когда отсутствует переключение импульсов тактовой последовательности.

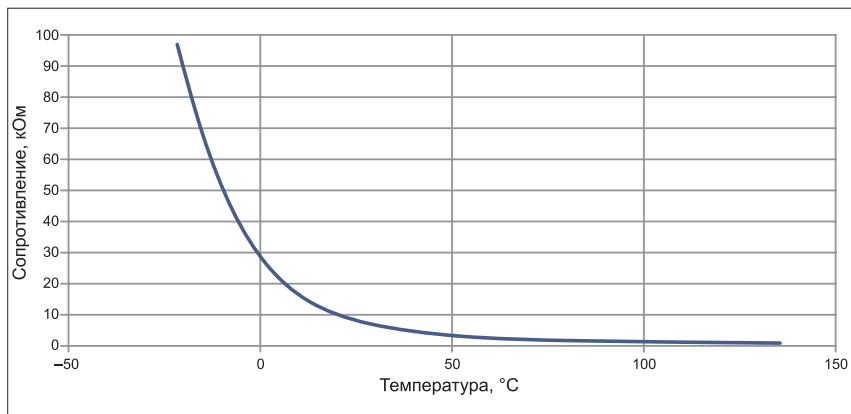


Рис. 2. График зависимости сопротивления термистора от температуры

При использовании отдельной микросхемы АЦП гораздо проще решаются проблемы с температурным дрейфом. Во-первых, на кристалле отсутствуют другие источники тепла кроме собственно АЦП. Во-вторых, в аналоговый узел проще добавить схему температурной компенсации.

Тестирование АЦП в виде отдельных микросхем производится с помощью аналоговых тестовых платформ с использованием прецизионного аналогового измерительного оборудования. С одной стороны, это обстоятельство позволяет с хорошей точностью измерить все параметры АЦП. С другой, подобный тест обходится дороже из-за необходимости регулировки и калибровки испытательного оборудования. Кроме того, требуется постоянная подстройка, чтобы на результаты измерения не повлиял температурный дрейф.

СРАВНЕНИЕ РЕШЕНИЙ

Рассмотрев особенности встраиваемых АЦП и АЦП, выпускаемых в отдельной микросхеме, разумно сравнить характеристики этих преобразователей. Рассмотрим два важнейших параметра – точность и прецизионность. Они часто воспринимаются как синонимы, но при этом имеют разные значения. Точность определяет возможность измерения величины, при котором отклонение измеренного значения от фактического не превышает заданного порога. Прецизионность означает повторяемость измерений. Высокопрецизионные приборы позволяют определить даже очень малое изменение измеряемой величины.

Рассмотрим простой пример. На разных весах вы трижды взвешиваете 1000 тройских унций золота. Первые весы показали результат 1000, 1001 и 1000. В этом случае можно говорить о высокой точности – ошибка после усреднения составит 0,03% – и высокой прецизионности, поскольку стандартное отклонение составляет

0,0005 унции. На других весах были получены следующие результаты: 1018, 1017 и 1018 унций. И на этих весах мы получили высокую прецизионность измерения: как и в предыдущем случае, стандартное отклонение составило 0,0005 унции, но о высокой точности говорить уже не приходится – ошибка составила 1,8%. Что важнее: точность или прецизионность? Ответ зависит от требований конкретного проекта, но зачастую требуется обеспечить высокое значение обоих параметров.

Таким образом, в общем случае нельзя определить, какой из двух параметров – точность или прецизионность важнее. Рассмотрим еще один показательный пример: измерение температуры с помощью термистора с отрицательным температурным сопротивлением (NTC). График зависимости сопротивления термистора от температуры приведен на рисунке 2.

Сразу бросается в глаза нелинейность характеристики, что предполагает два подхода к решению задачи. Если требуется измерять только низкие температуры, то из-за высокой крутизны характеристики достаточно использовать АЦП с малым разрешением, т. е. с малым числом разрядов; при этом удастся поддерживать приемлемую точность измерений. Однако в случае, когда необходимо измерять температуру в широком диапазоне для поддержания высокой точности измерения, потребуется АЦП с высоким разрешением. Причины такого выбора кроются в характеристике термистора NTC – при изменении температуры в диапазоне выше 20°C сопротивление термистора и, следовательно, падение напряжения на нем меняется незначительно.

Итак, если речь идет только об измерении текущего значения и не требуется регистрировать небольшие изменения температуры, то прецизионность (т. е. повторяемость результатов измерения) не очень

важна. При такой постановке вопроса точность важнее прецизионности. Но в случае, когда температура включена в контур обратной связи системы управления, на первый план выходит уже прецизионность – именно она позволит поддерживать стабильность контура обратной связи, а значит, и системы управления в целом.

Важными параметрами АЦП, влияющими на точность измерения, являются: интегральная нелинейность, дифференциальная нелинейность, смещение, дрейф смещения, коэффициент усиления и дрейф коэффициента усиления. Именно эти параметры являются источниками ошибки измерения. Чтобы определить точность АЦП, следует определить вклад в бюджет погрешностей каждого из указанных параметров. Прецизионность определяется числом эффективных битов (ENOB). Этот параметр указывает отклонение от истинного среднего значения. Другими словами, 68,3% (одно стандартное отклонение) показаний АЦП попадут в ENOB. Напомним, что стандартное отклонение STD определяется по формуле:

$$STD = \sqrt{[(\sum (X_i - X_{AV})^2)/n]},$$

где X_i – i -е измерение в массиве из n измерений; X_{AV} – среднее значение массива из n измерений.

Упростим задачу. Допустим, наш датчик температуры откалиброван и линеен. Нам требуется измерить температуру в диапазоне $-40...85^\circ\text{C}$, что соответствует диапазону выходного напряжения датчика $0-2,5\text{ В}$. Требуется точность измерения 1°C , что при полной шкале 125°C составляет $0,8\%$, или 200 мВ . Предположим, что в нашем распоряжении стандартный 12-бит АЦП с суммарной ошибкой $\pm 1\text{ МЗР}$ (младший значащий разряд). В этом случае ошибка составит $1/4096 = 0,024\%$, или в пересчете на входной сигнал 610 мкВ

Таблица. Сравнение встроенного АЦП и АЦП в отдельной микросхеме

	Встроенный АЦП (пример)	АЦП МСР33141-10 в отдельной микросхеме
Суммарная нескорректированная ошибка TUE	$\pm 1,8\%$	$\pm 0,06\%$
Точность	$3,60\%$	$0,12\%$
Прецизионность, ENOB	11,1 бит	11,8 бит

ошибка оказалась в 33 раза меньше требуемой, и мы с запасом уложились в требовния.

Теперь рассмотрим аналогичное измерение с помощью АЦП, встроенного в МК. В одном из современных МК предлагается 12-бит АЦП с производительностью 400 Квыб/с и суммарной нескорректированной ошибкой (total unadjusted error, TUE) $\pm 1,8\%$. Заметим, однако, что величина этой ошибки превышает ошибку $\pm 1\text{ МЗР}$ в 6-бит АЦП, которая составляет $1,6\%$! Таким образом, при неблагоприятных условиях, когда ошибка достигает максимальной величины, требования к точности измерения 1°C не выполняются, несмотря на высокую разрядность АЦП. Столь большая ошибка является побочным результатом технологического процесса, недостатки которого применительно к встроенному АЦП мы рассмотрели выше.

Рассмотренные примеры лишней раз убеждают в необходимости критичного подхода при изучении технической документации производителя. Тем более, из-за того что встроенный источник опорного напряжения (ИОН) может иметь высокий температурный дрейф и шумы, в некоторых случаях производители указывают параметры АЦП при использовании внешнего ИОН. В последнем случае возникает вопрос о целесообразности использования встроенного АЦП, если для его работы требуется внешний компонент.

Еще раз сравним встроенный АЦП с АЦП, который выпускается как отдельная микросхема. В качестве последнего используем МСР33141–

10 от Microchip Technology. Результат сравнения приведен в таблице и говорит сам за себя. Несмотря на то что число эффективных разрядов обоих АЦП близки, встроенный АЦП не смог обеспечить в нашем примере требуемую точность измерений.

Нередко ошибка разработчиков при выборе АЦП заключается в том, что они учитывают только прецизионность (число ENOB) и мало обращают внимания на другие параметры. Если АЦП точный и прецизионный, его можно использовать во всех случаях, а не только в каких-то отдельных решениях, пример которых мы рассмотрели выше. Если от АЦП не требуется высокая точность измерений, лучше остановить свой выбор на встроенном АЦП. При этом упрощается проект, уменьшается площадь печатной платы, и снижается стоимость изделия.

Однако если необходима высокая точность, прецизионность и согласованность всех компонентов системы во всем диапазоне рабочих параметров, следует проявить осторожность при выборе АЦП. Скорее всего, придется выбрать АЦП в отдельной микросхеме. Очень важно обратить внимание на диапазон рабочей температуры. Все параметры АЦП должны сохраняться во всем диапазоне. Это обстоятельство должно указываться в документации от производителя. Если подобных указаний нет, рекомендуется воздержаться от использования этих компонентов, т. к. их непредсказуемое поведение при изменении рабочей температуры в широком диапазоне может стать неприятным сюрпризом. ☐