СОСТЯЗАНИЕ ДВУХ АРХИТЕКТУР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ: АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ПРОТИВ СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП

ЭНДРЮ СИСКА (ANDREW SISKA), старший инженер по применению, Cypress Semiconductor Corp.
МЕНГ ХЕ (MENG HE), менеджер продукта, Cypress Semiconductor Corp.

В статье сравниваются две архитектуры преобразователей: АЦП последовательного приближения и сигма-дельта АЦП. Обсуждаются их преимущества и недостатки, а также особенности их применения. Рассмотрены базовые принципы реализации двух топологий АЦП в микроконтроллерной архитектуре с помощью среды программирования аналоговых компонентов. Статья представляет собой перевод [1].

Начнем состязание. В левом углу — нынешний чемпион, АЦП последовательного приближения, в противоположном углу — относительный новичок, сигма-дельта АЦП.

Это будет матч, состоящий из семи раундов, каждый из которых соответствует следующим категориям.

1. Точность преобразования.
2. Скорость преобразования.
3. Ошибки линейности.
4. Точность преобразования в начале и конце шкалы.
5. Дифференциальная нелинейность.
6. Интегральная нелинейность.
7. Ошибка квантования.

Кто завоюет звание чемпиона в этом состязании? Будет ли это АЦП последовательного приближения со своим «лишним весом» (в виде схемы выборки и хранения), высокой скоростью и неустойчивым процессом преобразования — или «легкий» сигма-дельта АЦП с интегрирующей схемой, методичным и точным «мыслительным процессом»?

РАУНД 1: ТОЧНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Точность преобразования отражает погрешности коэффициента усиления и нелинейности. Отклонение коэффициента усиления от идеального значения обсуждаются в данном разделе, а ошибки нелинейности будут рассмотрены в раундах 5 и 6.

Имеются два вида ошибок коэффициента усиления. Отклонение сигнала из-за масштабирования вызывается колебаниями опорного напряжения и коэффициента усиления между входом схемы и АЦП, что приводит к возникновению ошибки, пропорциональной уровню сигнала. Погрешность смещения вызывается рассогласованием входных каскадов во входных усилителях и операционном усилителе, который используется в интеграторе/компараторе АЦП.

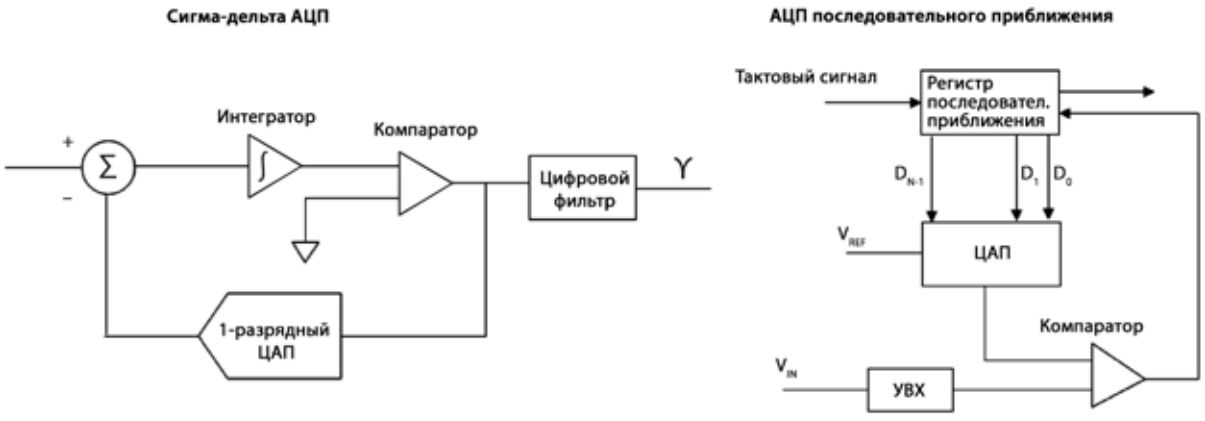

Рис. 1. **Топологии сигма-дельта АЦП и АЦП последовательного приближения**

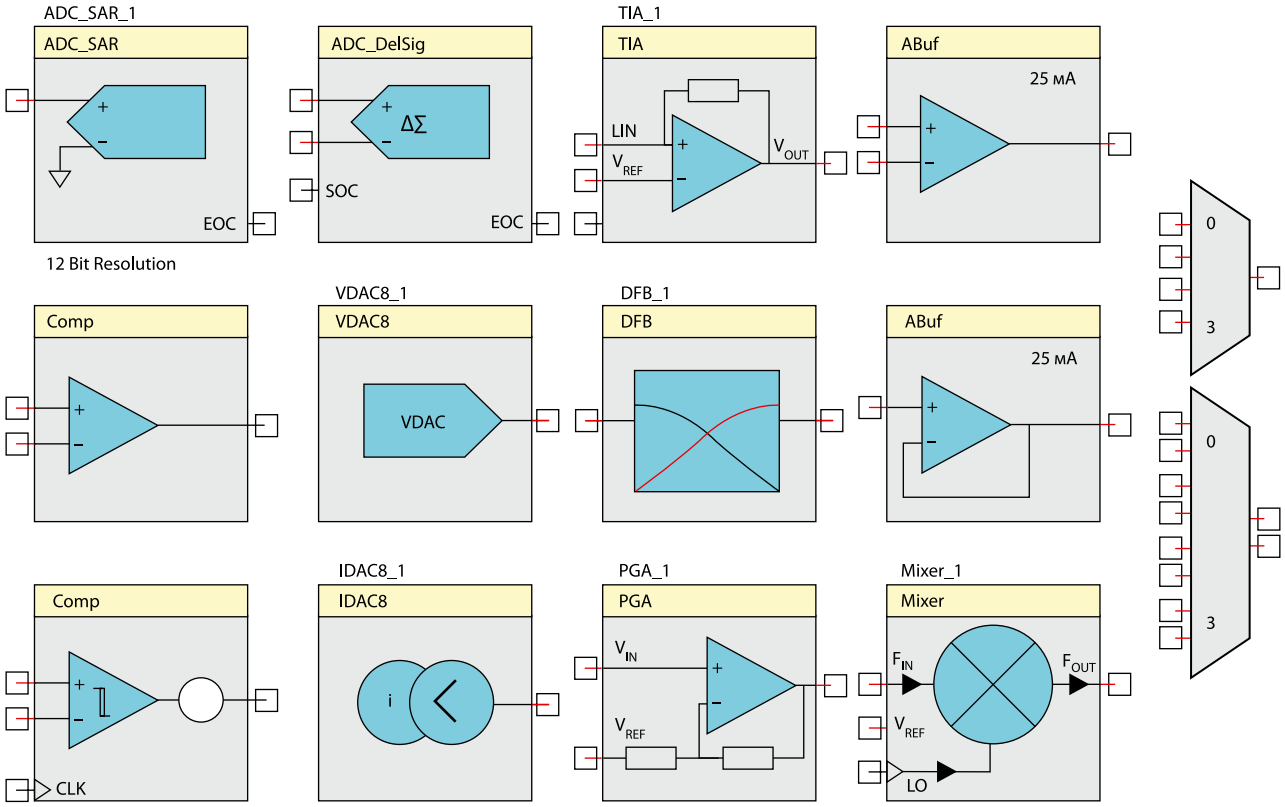

Рис. 2. **Некоторые аналоговые компоненты, доступные в программируемой аналоговой микроконтроллерной архитектуре.** Разработчики имеют возможность реализовать компоненты, которые лучше подходят для данного приложения

На рисунке 1 показан сигма-дельта модулятор (интегратор, компаратор, 1-разрядный ЦАП и цифровой фильтр). Сигма-дельта АЦП может содержать усилитель с регулируемым коэффициентом усиления на входе. Изменение коэффициента усиления меняет величину входной емкости. Из-за колебаний этой емкости коэффициент усиления может отличаться от значений, которые требуется обеспечить при калибровке АЦП. Для компенсации ошибок смещения и коэффициента усиления вводятся корректирующие коэффициенты для нулевого результата преобразования, а также результатов преобразования для крайних значений шкалы.

С другой стороны, точность преобразования АЦП последовательного приближения зависит от точности опорного напряжения, внутреннего ЦАП и компаратора. Погрешности внутреннего ЦАП и компаратора АЦП должны соответствовать общей погрешности системы — любые отклонения приводят к появлению ошибок линейности, которые не могут быть скомпенсированы путем калибровки.

Таким образом, раунд 1 выигрывает сигма-дельта АЦП ввиду присущего ему монотонного характера преобразования.

РАУНД 2: СКОРОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В сигма-дельта АЦП для завершения преобразования требуется 2n выборок, следовательно, скорость преобразования является функцией разрешения, и поэтому более высокое разрешение требует более длительного времени преобразования. Обычные сигма-дельта преобразователи, которые используются в цифровой аудиоаппаратуре, имеют полосу пропускания около 22 кГц. В последнее время на рынке появились сигма-дельта преобразователи с полосой пропускания 1—2 МГц и разрешением 12—20 разрядов. Они, как правило, содержат сигма-дельта модулятор 4-го порядка (или выше) с многоразрядными ЦАП в цепи обратной связи.

В начале цикла преобразования АЦП последовательного приближения ЦАП устанавливается на половину шкалы, и производится сравнение измеряемого напряжения с выходным напряжением ЦАП. На каждом последующем шаге ЦАП обновляется, выбирается следующий разряд, и снова производится сравнение. Цифровое представление входного напряжения находится методом двоичного поиска делением пополам (последовательное приближение).

Раунд 2 выигрывает АЦП последовательного приближения из-за более быстрого алгоритма преобразования.

РАУНД 3: ОШИБКИ ЛИНЕЙНОСТИ

Оба типа нелинейности — дифференциальная и интегральная — зависят от топологии преобразователя. Ошибки дифференциальной и интегральной нелинейности не могут быть откалиброваны как ошибки коэффициента усиления и смещения.

Точность сигма-дельта АЦП зависит от времени установления операционного усилителя (ОУ) в интеграторе/компараторе. Если модулятор переключается слишком быстро и ОУ не может это отследить, то возникают нелинейности.

Сигма-дельта АЦП по своей природе является монотонным преобразователем, независимо от того, какое у него разрешение. Параметры этого АЦП заложены в топологию и не зависят от точных номиналов компонентов или согласования элементов.

В АЦП последовательного приближения погрешности линейности связаны с точностью внутреннего ЦАП и компаратора. Погрешность вследствие нелинейности в таких АЦП является побочным эффектом

топологии АЦП последовательного приближения.

Раунд 3 выигрывает сигма-дельта АЦП.

РАУНД 4: ТОЧНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В НАЧАЛЕ И КОНЦЕ ШКАЛЫ

Сигма-дельта преобразователь демонстрирует повышенную нелинейность при определенных выходных кодах. Это определяется КИХ-фильтром, который используется в качестве дециматора преобразователя. Нелинейность проявляется наиболее заметно в конечных точках шкалы. Нелинейность в конечных точках не имеет значения при обработке непрерывного потока данных, как, например, в цифровом аудио; однако в системах, в которых требуются линейные измерения сигнала полного размаха, сигма-дельта-преобразователи использовать сигма-дельта-преобразователи не следует.

АЦП последовательного приближения не проявляет заметную нелинейность в конечных точках шкалы, которая наблюдается в сигма-дельта-преобразователях. Точность АЦП в этих точках зависит от способности внутреннего ЦАП и компаратора отслеживать напряжение полного размаха.

Раунд 4 закончился победой АЦП последовательного приближения за его высокую точность в конечных точках шкалы.

РАУНД 5: ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Дифференциальная нелинейность — это разница между реальной величиной ступеньки преобразования и идеальным значением одного наименьшего значащего разряда (НЗР). Следовательно, если ширина или высота ступеньки преобразования равна точно одному НЗР, то дифференциальная нелинейность равна нулю. Если дифференциальная нелинейность превышает 1 НЗР, то преобразователь может стать немонотонным. Это означает, что величина выходного кода не всегда соответствует входному значению напряжения. Кроме того, в АЦП также есть вероятность пропуска кодов, т.е. один или более из возможных 2n двоичных кодов никогда не появятся на выходе.

Сигма-дельта АЦП по своей природе монотонны независимо от того, какое у них разрешение. Его характеристики заложены в конфигурацию и не зависят от точных номиналов компонентов или согласования элементов.

АЦП последовательного приближения не является монотонным преобразователем, и его характеристики зависят от точности номиналов компонентов и согласования элементов.

Раунд 5 выигрывает сигма-дельта АЦП.

РАУНД 6: ИНТЕГРАЛЬНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Интегральная нелинейность — это отклонение значений реальной передаточной функции от прямой линии. Эта линия может либо максимально совпадать с прямой так, чтобы минимизировать отклонения, либо соединять конечные точки передаточной характеристики таким образом, чтобы свести к нулю ошибки коэффициента усиления и смещения. Для АЦП эти отклонения измеряются при переходе от одной ступеньки преобразования к другой, а термин «интегральная нелинейность» отражает то, что сумма дифференциальных нелинейностей от нижней точки шкалы до текущей ступеньки определяет величину интегральной нелинейности на данной ступеньке.

Раунд 6 выигрывает сигма-дельта АЦП, так как его топология не зависит от точного соблюдения номиналов

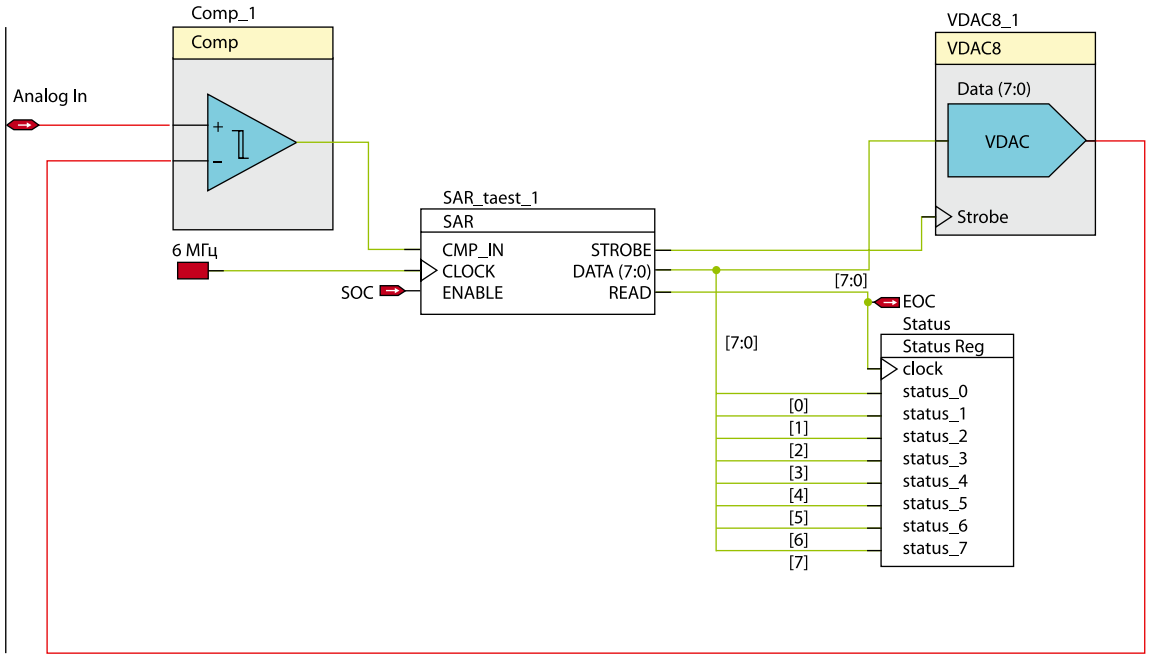

Рис. 3. **С помощью среды совместного проектирования аппаратных и программных средств, например, PSoC Creator компании Cypress Semiconductor, разработчики могут построить сигма-дельта АЦП и АЦП последовательного приближения, которые оптимизированы для данного приложения**

компонентов. В АЦП последовательного приближения, напротив, требуется весьма точный ЦАП и компаратор.

РАУНД 7: ОШИБКА КВАНТОВАНИЯ

Ошибка квантования обусловлена ограниченным разрешением АЦП и неизбежным несовершенством всех типов АЦП. Это — ошибка округления при преобразовании аналогового входного напряжения АЦП в выходной оцифрованный код. Шум является нелинейным и зависящим от сигнала.

Сигма-дельта-преобразователи не требуют использования фильтров с крутым спадом частотной характеристики на аналоговых входах для устранения эффектов наложения спектра из-за того, что частота выборки превышает эффективную полосу пропускания АЦП. Передискретизация обеспечивает усреднение любых системных помех на аналоговых входах. В сигма-дельта-преобразователях скорость приносится в жертву высокому разрешению.

Основными преимуществами АЦП последовательного приближения являются малое энергопотребление, высокое разрешение и точность. В АЦП последовательного приближения увеличение разрешения сопровождается увеличением стоимости более точных внутренних компонентов.

В раунде 7, по-видимому, можно зафиксировать ничью.

РЕШЕНИЕ СУДЕЙСКОЙ КОЛЛЕГИИ

Хотя сигма-дельта АЦП победил в большинстве раундов, по итогам матча голоса судей разделились поровну. Оба преобразователя добиваются превосходства в определенных приложениях. При выборе из этих двух видов АЦП необходимо учитывать тип сигнала, который требуется оцифровывать, скорость и точность преобразования, цену.

Следует также учитывать особенности каждого приложения. Будь это потребительская и автомобильная электроника или медицинские и промышленные устройства — во всех этих приложениях аналоговые сигналы необходимо детектировать с помощью датчиков, усилить, согласовать и преобразовать с помощью АЦП в цифровую форму. Сигма-дельта АЦП и АЦП последовательного приближения, каждый со своими преимуществами и недостатками, реализуются на базе специфических требований к приложению. Каждый из этих типов АЦП способен проявить себя наилучшим образом при решении конкретной задачи.

Учитывая этот факт, в различных архитектурах микроконтроллеров предусматривают возможность гибкой реализации блоков АЦП на основе встроенных средств программирования аналоговых компонентов, что позволяет создавать несколько сигма-дельта АЦП, АЦП последовательного приближения и даже сочетать оба типа АЦП в одном проекте.

На рисунке 2 показано множество программируемых аналоговых компонентов, доступных в такой микроконтроллерной архитектуре. Система аналогового программирования позволяет разработчикам создавать специфические комбинации как из стандартных, так и из усовершенствованных блоков обработки аналоговых сигналов. Эти блоки в дальнейшем соединяются между собой, обеспечивая высокий уровень гибкости проектирования и IP-безопасности.

Используя графический редактор проекта, разработчики имеют возможность работать в среде совместного проектирования аппаратных и программных средств, чтобы создавать уникальную схему. Конфигурируя соединения между портами ввода/вывода общего назначения и различными аналоговыми ресурсами, а также между самими аналоговыми узлами, разработчик может построить схему, например, АЦП последовательного приближения, которая обычно содержит ЦАП, компаратор и цифровую логику (см. рис. 3).

Программируемые аналоговые блоки обеспечивают не только гибкость и возможность быстрого внесения изменений в проект, но также позволяют создать платформу, на базе которой разработчики могут испытывать свои идеи и оперировать различными дискретными аналоговыми компонентами для построения в высшей степени оптимизированной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andrew Siska, Meng He. "Golden Gloves" A/DConverterMatch:Successive-approximation register vs. sigma-delta topology // www.industrialcontroldesignline.com.