

# Какая архитектура АЦП подходит для вашей задачи?

Печатается с разрешения фирмы Analog Devices ([www.analog.com](http://www.analog.com))

**Уолт Кестер (Walt Kester)**

Перевод Дмитрия Иоффе (Санкт-Петербург)

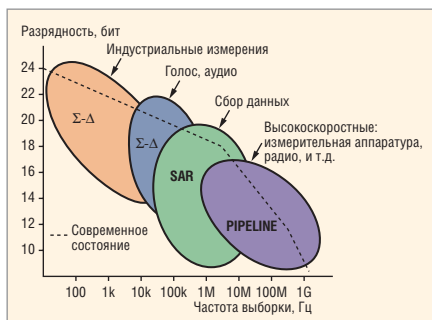
**В статье рассматривается программный метод повышения точности измерения временных интервалов в системах с восьмиразрядными микроконтроллерами семейств HC908 и HCS908.**

## ВВЕДЕНИЕ

Выбрать подходящий АЦП из тысяч преобразователей, имеющих сейчас в продаже, очень непросто. Наиболее очевидный способ – сразу обратиться к руководствам по выбору или программам для поиска по параметрам, например, таким, какие предлагаются на сайте фирмы Analog Devices. Вводим частоту преобразования, разрядность, напряжение питания и другие важные свойства, щёлкаем по кнопке Find и надеемся на лучшее. Но обычно этого мало. Как разобраться с множеством появившихся «наилучших выборов»? Существует ли другой путь решения этой задачи: более понятный и с лучшими результатами?

Большинство применений АЦП сегодня распределено между четырьмя обширными сегментами рынка:

- сбор данных;
- точные промышленные измерения;
- обработка голосовых и аудиоданных;
- «высокоскоростная» обработка (подразумевается частота преобразования выше 5 МГц).



**Рис. 1. Архитектуры АЦП, области применения, разрядность и частота преобразования**

В подавляющем большинстве этих применений используются АЦП последовательного приближения (successive-approximation, SAR), сигма-дельта ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) и конвейерные (pipelined) АЦП. Понимание основ этих трёх наиболее популярных архитектур АЦП и их связи с областями применения будет полезным дополнением к руководствам по выбору и поисковым машинам.

Классификация на рисунке 1 показывает, как связаны эти области применения и архитектуры с разрядностью АЦП (вертикальная ось) и частотой преобразования (горизонтальная ось). Штриховая линия отображает положение дел к середине 2005 г. Даже несмотря на то, что параметры у разных архитектур значительно перекрываются, область применения сама по себе является ключевым моментом для выбора нужной архитектуры.

## АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ

В области систем сбора данных наиболее распространены АЦП последовательного приближения, особенно в тех случаях, когда требуется мультиплексирование нескольких входных сигналов. От модульных и гибридных устройств 1970-х гг. и до современных микромощных интегральных схем, АЦП последовательного приближения – «рабочие лошади» систем сбора данных. Эта архитектура была впервые использована в экспериментальных системах фирмы Bell Labs в 1940-х гг. В 1954 г. Бернард Гордон из Epsco создал первый коммерческий

АЦП последовательного приближения на лампах, 11-разрядный, с частотой преобразования 50 кГц и рассеиваемой мощностью 500 Вт.

Современные АЦП последовательного приближения имеют разрядность от восьми до восемнадцати бит и частоту преобразования до нескольких мегагерц. На момент написания этой статьи были доступны 16-разрядные устройства на частоту 3 МГц (AD7621) и 18-разрядные на 2 МГц (AD7641). Выходные данные обычно передаются через стандартный последовательный интерфейс (например, I<sup>2</sup>C или SPI), но есть устройства с параллельным выходом (разумеется, у них значительно большее количество выводов и размеры корпуса).

Базовая схема АЦП последовательного приближения показана на рисунке 2. Чтобы иметь возможность обрабатывать быстро изменяющиеся сигналы, на входе АЦП имеется устройство выборки-хранения (УВХ). На выходе этого устройства сигнал остаётся постоянным во время всего цикла преобразования. Преобразование начинается с установки выходного напряжения встроенного цифроаналогового преобразователя (ЦАП) на середину диапазона. Компаратор сравнивает выходное напряжение УВХ с выходным напряжением ЦАП. Результат сравнения (он является старшим битом выходного кода) записывается в регистр последовательного приближения (РПП) как 0 или 1. Затем, в зависимости от значения старшего бита, на выходе ЦАП устанавливается напряжение, равное 1/4 или 3/4 диапазона, и компаратор определяет значение следующего бита. Результат записывается в регистр, и процесс продолжается до тех пор, пока не будут определены значения всех битов. После окончания преобразования устанавливается логический сигнал готовности (он может на-

зываются (EOC, DRDY, BUSY и т.д.). В англоязычной литературе аббревиатура SAR (successive-approximation register, регистр последовательного приближения) обычно понимается как название для всей архитектуры.

Временная диаграмма работы типичного АЦП последовательного приближения представлена на рисунке 3. Показанные на ней сигналы присутствуют в большинстве таких АЦП, но в разных устройствах они могут называться по-разному. Обратите внимание, что результат преобразования текущей выборки доступен сразу по окончании преобразования, без какой-либо задержки или конвейера. Поэтому АЦП последовательного приближения удобно использовать в устройствах с однократной или пакетной выборкой или с мультиплексированием.

В большинстве современных микросхем АЦП последовательного приближения процесс преобразования управляется высокочастотным тактовым сигналом (внутренним или внешним, в зависимости от модели АЦП), при этом необязательно использовать синхронизацию от входа запуска преобразования.

Основной алгоритм, используемый в АЦП последовательного приближения, восходит к 1500-м годам. Он связан с решением полезной математической головоломки – определение неизвестного веса путём минимальной последовательности операций взвешивания. По условию этой задачи необходимо определить наименьшее число гирь для взвешивания предметов весом от 1 до 40 фунтов на чашечных весах. Одно из решений нашёл математик Тарталья в 1556 г. Он предложил использовать двоичную серию гирь весом 1, 2, 4, 8, 16 и 32 фунта (или  $2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4$  и  $2^5$ ). Предложенный алгоритм взвешивания – тот же самый, что и в современных АЦП последовательного приближения. (Отметим, что это решение пригодно для измерения неизвестного веса до 63 фунтов ( $2^6 - 1$ ) вместо 40 фунтов, как требовалось при постановке задачи.) На рисунке 4 показан двоичный алгоритм использования чашечных весов для неизвестного веса 45 фунтов.

Общая точность АЦП последовательного приближения определяется, в первую очередь, характеристиками внутреннего ЦАП. Раньше в пре-

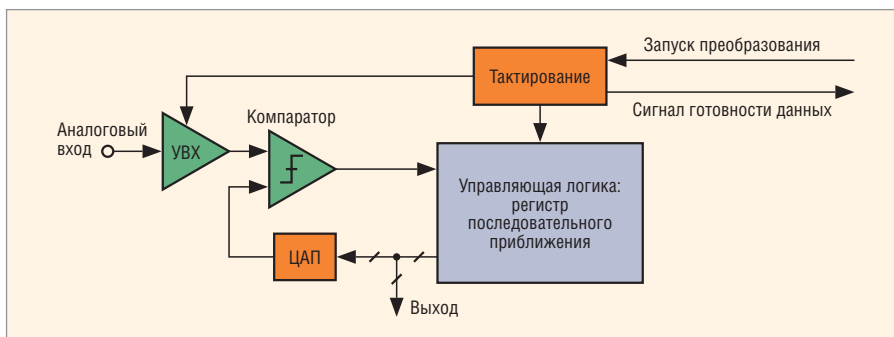


Рис. 2. Базовая схема АЦП последовательного приближения

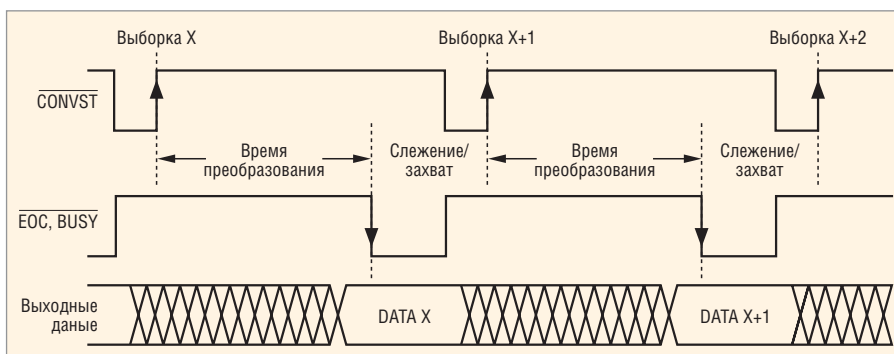


Рис. 3. Упрощённая временная диаграмма работы АЦП последовательного преобразования

цизионных АЦП, таких как ставший промышленным стандартом AD574, для достижения требуемой точности и линейности использовались ЦАП с лазерной подгонкой тонкоплёночных резисторов. Однако процесс осаждения и подгонки тонкоплёночных резисторов увеличивает цену изделия, и кроме того, сопротивление тонкоплёночного резистора может изменяться при механическом воздействии на корпус устройства.

Поэтому в современных АЦП последовательного приближения, изготавливаемых по КМОП (CMOS)-технологии, популярны ЦАП на переключаемых конденсаторах. Принципиальное преимущество таких ЦАП состоит в том, что их точность и линейность определяется, в первую очередь, точностью фотолитографии, которая задаёт размеры обкладок конденсаторов и, следовательно, степень их согласованности. Кроме того, параллельно основным конденсаторам могут быть расположены маленькие конденсаторы, подключаемые или отключаемые при автоматической калибровке для достижения требуемой точности и линейности без необходимости в тонкоплёночной лазерной подгонке. Поэтому рассогласование ёмкостей конденсаторов при изменении температуры может быть лучше 1 ppm/°C, и тем самым достигается высокая температурная стабильность.

КМОП-технология, используемая при производстве современных АЦП последовательного приближения, является также идеальным процессом для получения аналоговых коммутаторов. Поэтому непосредственно к основному АЦП можно добавить входной мультиплексор, что позволяет интегрировать полную систему сбора данных на одном кристалле. Так же легко можно добавить к АЦП последовательного приближения цифровые узлы, такие как последовательность мультиплексоров, схема автоматической калибровки и многое другое.

На рисунке 5 показаны элементы 1-МГц АЦП последовательного приближения серии AD79x8. Схема управления (sequencer) обеспечивает автоматическое преобразование сигналов выбранных каналов, или же каналы

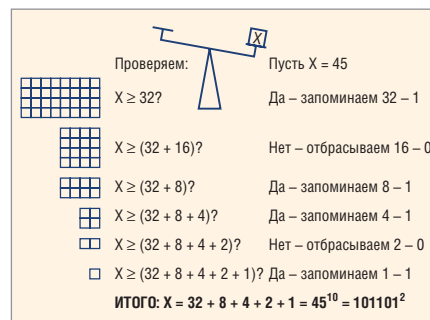
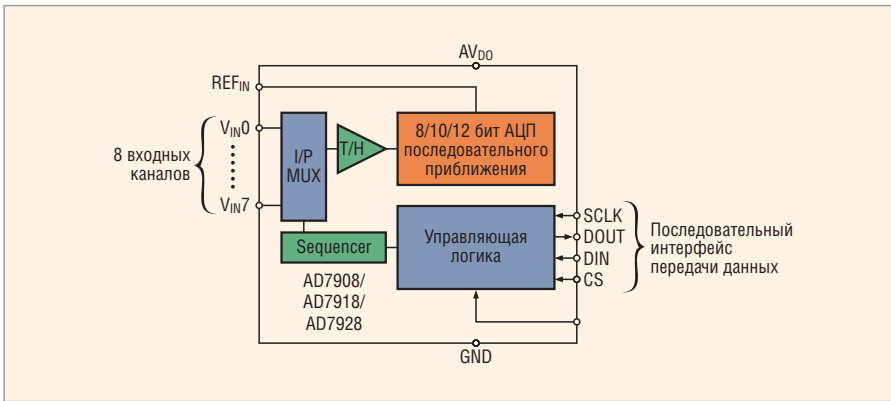


Рис. 4. Алгоритм АЦП последовательного приближения с использованием чашечных весов и двоичных гирь



**Рис. 5. Функциональная схема современного 1-МГц АЦП последовательного приближения с восьмиканальным мультиплексором на входе**  
 Это семейство включает микросхемы AD7908 (8 разрядов), AD7918 (10 разрядов) и AD7928 (12 разрядов)

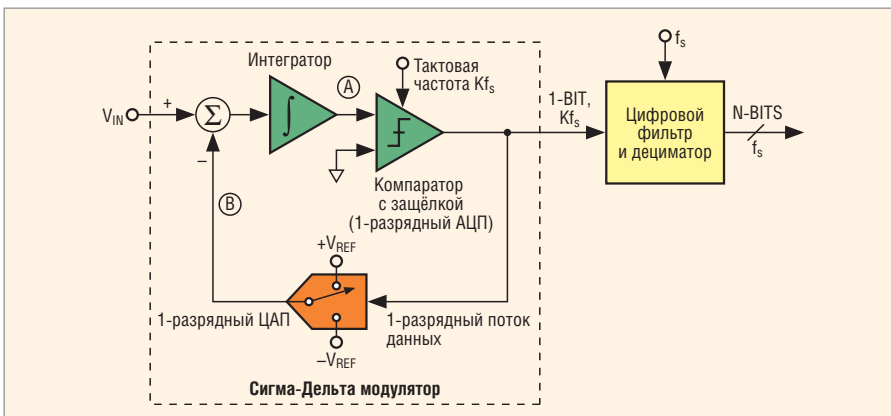
могут при необходимости адресоваться индивидуально. Данные передаются через последовательный порт. АЦП последовательного приближения популярны в многоканальных системах сбора данных, потому что у них отсутствует задержка конвейера, характерная для сигма-дельта- и конвейерной архитектур. Эти АЦП могут работать в однократном, пакетном и непрерывном режимах.

**СИГМА-ДЕЛЬТА ( $\Sigma$ - $\Delta$ )-АЦП для прецизионных промышленных измерений**

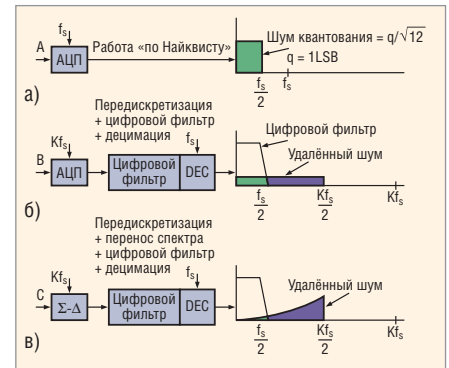
Современные  $\Sigma$ - $\Delta$ -АЦП практически вытеснили интегрирующие АЦП (двойного, тройного интегрирования и пр.) в приложениях, требующих высокого разрешения (от 16 до 24 разрядов) и эффективной частоты преобразования до нескольких сотен герц. Высокое разрешение в сочетании со встроенным программируемым усилителем позволяет оцифровывать малые сигналы непосредственно с выходов датчиков, таких как тензодатчики или термопары. Правильный выбор частоты преобразования и полосы пропускания цифрового фильтра

обеспечивает также прекрасное подавление помех от сети переменного напряжения частотой 50 и 60 Гц. Сигма-дельта-АЦП представляют собой привлекательную альтернативу традиционному подходу с использованием инструментального усилителя и АЦП последовательного приближения.

Основные концепции сигма-дельта-АЦП зародились в Bell Labs в 1950-х гг. в ходе работ по созданию экспериментальных цифровых систем передачи данных с использованием дельта-модуляции и кодо-импульсной модуляции. К концу 1960-х гг. сигма-дельта-архитектура была хорошо проработана. Однако, из-за малой доступности цифровых фильтров, которые являются неотъемлемой частью этой архитектуры, практические реализации интегральных схем смогли появиться только после 1980 г., когда получили широкое распространение КМОП-микросхемы цифровой обработки сигналов. На рисунке 6 иллюстрируются основные понятия, используемые в сигма-дельта-преобразовании: передискретизация, перенос спектра, цифровая фильтрация и децимация.



**Рис. 7. Сигма-дельта АЦП первого порядка**



**Рис. 6. Спектр шумов в фундаментальных понятиях, используемых в сигма-дельта-преобразовании: передискретизация, перенос спектра, цифровая фильтрация и децимация**

На рисунке 6а показан спектр шумов для традиционной работы «по Найквисту», когда полоса сигнала на входе АЦП лежит в пределах от нуля до половины частоты дискретизации  $f_s/2$  и шум квантования однородно распределён по этой же полосе. На рисунке 6б частота дискретизации увеличена в  $K$  раз ( $K$  – коэффициент передискретизации), а полоса входного сигнала осталась без изменений. Шум квантования выпадает из полосы сигнала и удаляется цифровым фильтром. После этого частота выходных данных может быть уменьшена до исходной частоты дискретизации  $f_s$  (этот процесс называется децимацией). Такое сочетание процессов передискретизации, цифровой фильтрации и децимации увеличивает соотношение сигнал/шум (SNR) в полосе Найквиста (от нуля до  $f_s/2$ ). Для каждого удвоения  $K$  соотношение сигнал/шум в полосе от нуля до  $f_s/2$  увеличивается на 3 дБ. На рисунке 6в схематично показана сигма-дельта-архитектура, где традиционный АЦП заменён сигма-дельта-модулятором. Применение модулятора позволяет перенести шумы квантования за пределы полосы исследуемого сигнала и таким образом значительно увеличить соотношение сигнал/шум в полосе от нуля до  $f_s/2$ .

Основная схема сигма-дельта-АЦП первого порядка и сигма-дельта-модулятора показана на рисунке 7.

«Сердцем» основной схемы модулятора являются одноразрядный АЦП (компаратор) и одноразрядный ЦАП (ключ). Многоразрядные сигма-дельта-АЦП используют одноразрядный модулятор, неотъемлемым преимуществом которого является его превосходная дифференциальная линейность.

На выходе модулятора образуется одноразрядный поток данных. Благодаря отрицательной обратной связи, которая охватывает интегратор, среднее значение сигнала в точке В должно быть равно входному напряжению  $V_{IN}$ . Если  $V_{IN}$  равно нулю, т.е. середине входного диапазона, количество нулей и единиц в выходном потоке данных одинаково. Если входной сигнал сдвигается вверх, количество единиц увеличивается, а количество нулей уменьшается. Аналогично, когда входной сигнал опускается, число единиц уменьшается, а число нулей увеличивается. Поэтому отношение числа единиц в выходном потоке к общему числу отсчетов на том же интервале – плотность единиц – должно быть пропорционально постоянной составляющей входного сигнала.

Модулятор также выполняет функцию переноса спектра шума, работая как фильтр нижних частот для сигнала и как фильтр верхних частот для шумов квантования. Обратите внимание, что цифровой фильтр является неотъемлемой частью сигма-дельта-АЦП и он может быть оптимизирован для получения отличного подавления частоты питающей сети 50/60 Гц. Однако цифровой фильтр неизбежно вносит конвейерную задержку, которая обязательно должна приниматься во внимание при разработке систем управления и мультиплексировании сигналов. Если сигналы в сигма-дельта-АЦП мультиплексируются, то правильный сигнал на выходе цифрового фильтра устанавливается только по окончании переходного процесса. Обычно для этого требуется несколько периодов тактовой частоты. Из-за конвейерной задержки в цифровом фильтре сигма-дельта АЦП не может работать в однократном или пакетном режиме.

Несмотря на то что простому одноразрядному сигма-дельта-АЦП первого порядка присущи линейность и монотонность благодаря одноразрядным АЦП и ЦАП, он не может обеспечить достаточного переноса спектра для приложений с высоким разрешением. Увеличение числа интеграторов в модуляторе (подобно добавлению полюсов в фильтре) даёт лучший перенос спектра за счёт повышения цены и сложности устройства, как показано на рисунке 8 для одноразрядного модулятора второго порядка. Обратите внимание на улуч-

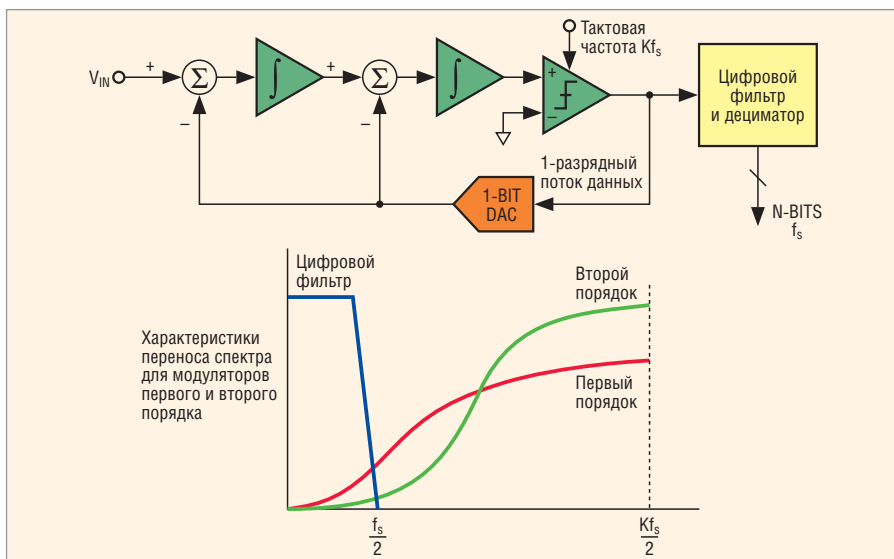


Рис. 8. Сигма-дельта модулятор второго порядка

шение характеристики переноса спектра по сравнению с модулятором первого порядка. Модуляторы более высоких порядков (выше третьего) трудно сделать устойчивыми, и их разработка представляет собой сложную задачу.

Популярной альтернативой модуляторам высокого порядка является использование многоразрядной архитектуры, где одноразрядный АЦП (компаратор) заменяется N-разрядным параллельным преобразователем, а одноразрядный ЦАП (ключ) – высоколинейным N-разрядным ЦАП. Дорогостоящей лазерной подгонки в многоразрядных сигма-дельта-АЦП, требуемой для достижения требуемой линейности внутренних АЦП и ЦАП, можно избежать, например, используя скремблирование данных.

Интегрирующие архитектуры (двухстадийные, трёхстадийные и т.д.) всё ещё применяются в таких изделиях, как цифровые вольтметры, но в современных промышленных измерениях доминируют КМОП сигма-дельта-АЦП. Эти преобразователи обеспечивают прекрасное подавление синфазной помехи от сети переменного напряжения и разрешение до 24 разрядов при таких преимуществах, как встроенная калибровка на кристалле. Большинство из них имеет встроенные программируемые усилители, которые позволяют оцифровывать слабые сигналы непосредственно с мостовых датчиков и термопар без применения внешних схем согласования и инструментальных усилителей.

На рисунке 9 показана упрощённая схема прецизионного тензодатчика.

Этот датчик формирует максимальное выходное напряжение 10 мВ при нагрузке 2 кГ и напряжении возбуждения 5 В.

На выходе моста присутствует синфазное напряжение 2,5 В. На схеме показана величина сопротивления моста для нагрузки в 2 кГ. Выходное напряжение для любой заданной нагрузки прямо пропорционально напряжению возбуждения, т.е. логометрично отношению напряжения питания.

Традиционным подходом к оцифровке сигналов такого небольшого уровня было бы использование инструментального усилителя для получения сигнала, достаточного для обычного АЦП последовательного приближения с 14- или 18-разрядным разрешением. В связи с повышенными требованиями к смещению и дрейфу потребовался бы инструментальный усилитель с автоматической установкой нуля, такой как AD5555 или AD8230. И в дополне-

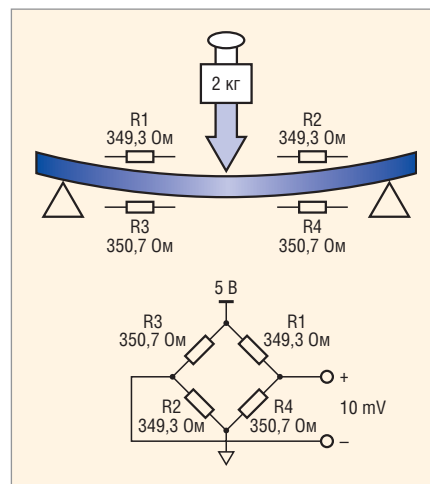


Рис. 9. Выходной сигнал тензодатчика

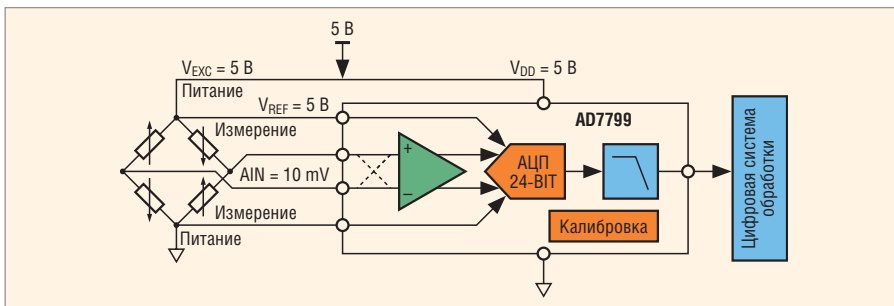


Рис. 10. Обработка сигнала тензодатчика с использованием сигма-дельта-АЦП высокого разрешения AD7799

ние ко всему выходные данные АЦП последовательного приближения часто усредняют для лучшего подавления шумов.

Заманчивая альтернатива обычно-му сочетанию инструментального усилителя и АЦП последовательного приближения показана на рисунке 10. Здесь используется непосредственное соединение тензодатчика и сигма-дельта-АЦП высокого разрешения AD7799. Полный размах выходного напряжения моста 10 мВ преобразуется в приблизительно 16 «свободных от шума» разрядов АЦП с частотой примерно 4,7 Гц. (Дальнейшее обсуждение приведённых ко входу шумов и свободного от шума разрешения см. в [1]). Логометрический принцип устраняет необходимость в прецизионном источнике опорного напряжения.

Сигма-дельта-АЦП очень хорошо подходят для преобразования очень малых сигналов с большим разрешением. Но разработчик должен понимать, что в них используется гораздо более интенсивная цифровая обработка, чем в АЦП последовательного приближения и, кроме того, процесс разработки может занять несколько больше времени. Очень полезными могут оказаться оценочные платы и соответствующее программное обеспечение. И всё-таки, есть ещё много видов оборудования и устройств сопряжения с датчиками, где можно использовать традиционные инструментальные усилители (для усиления сигнала и подавления синфазных помех) с мультиплексорами и АЦП последовательного приближения.

### СИГМА-ДЕЛЬТА-АЦП ДЛЯ ТОНАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ЗВУКА

Сигма-дельта-АЦП прекрасно зарекомендовали себя во множестве при-

ложений для промышленных измерений: прецизионные измерения, слежение за датчиками, измерение энергии, управление двигателями. Но, кроме того, они доминируют также в тональной передаче и обработке звука. Основное преимущество большого коэффициента передискретизации, используемого в сигма-дельта-преобразователях, состоит в упрощении фильтра на входе АЦП и фильтра на выходе ЦАП. К тому же простота добавления цифровых функций в преобразователь, изготавливаемый по КМОП-технологии, позволяет наращивать сложность цифровых фильтров без существенного увеличения площади кристалла, потребляемой мощности и стоимости.

Цифровые технологии для тональной передачи звука начали применяться с появлением кодово-импульсной модуляции в телекоммуникационных приложениях в 1940 г. Первые 24-канальные ИКМ-системы типа Т использовали 8-разрядные АЦП для сжатия и ЦАП для разжатия и частоту дискретизации 8 кГц (кSPS). Это стало первым стандартом.

Современные цифровые сотовые системы используют линейные сигма-дельта-АЦП с передискретизацией и ЦАП с высоким разрешением вместо технологий сжатия с низким разрешением. Типичное соотношение сигнал/шум составляет 60...70 дБ. Если для совместимости со старыми системами требуется сжатие/разжатие, оно выполняется в сигнальном процессоре аппаратно или программно. Тональные «кодеки» (кодеры/декодеры) применяются не только в кодово-импульсной модуляции, они используются также в обработке речи, шифровании и т.д. Доступно множество разнообразных устройств этого типа.

Сигма-дельта-АЦП и ЦАП также преобладают во множестве приложе-

ний, требующих обработки звука, например, FM-стерео, компьютерный звук, стереофонические компакт-диски (CD), цифровые магнитные аудиоленты (digital audio tape, DAT) и DVD-аудио. Требования к общим гармоническим искажениям плюс шум (THD + N) лежат в диапазоне от 60 до более чем 100 дБ, а частота преобразования 48...192 кГц. Современные сигма-дельта-АЦП и ЦАП удовлетворяют этим требованиям. Кроме того, они также имеют дополнительные цифровые функции, обычно связанные с областью применения.

### КОНВЕЙЕРНЫЕ АЦП ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ (ЧАСТОТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БОЛЕЕ 5 МГц)

В этой статье мы произвольно определили любое применение, требующее частоты дискретизации не менее 5 МГц, как «высокоскоростное». На рисунке 1 показано, что области АЦП последовательного приближения и конвейерных АЦП перекрываются на частотах преобразования примерно 1...5 МГц. За исключением этой небольшой области, в приложениях, рассматриваемых как высокоскоростные, наиболее часто используются конвейерные АЦП. Сегодня конвейерные КМОП АЦП с малым потреблением применяются не только в видеотехнике, но и во многих других областях. Совсем не так было в 1980 г., когда для этих целей использовались микросхемы параллельных АЦП (которые доминировали в обработке видеосигналов при разрядности 8 бит и частоте преобразования 15...100 МГц) или очень дорогие гибридно-модульные устройства с высоким разрешением. Несмотря на то что параллельные преобразователи с небольшим разрешением остаются важной составной частью конвейерных АЦП, они редко используются сами по себе, за исключением устройств с чрезвычайно большой частотой преобразования – обычно более 1 или 2 ГГц – и требуемым разрешением от шести до восьми разрядов.

Сегодня рынок, требующий «высокоскоростных» АЦП, включает множество видов измерительных применений (цифровые осциллографы, анализаторы спектра и получение изображений для медицины). Кроме

того, высокоскоростные преобразователи требуются в видеотехнике, радиолокации, телекоммуникациях (обработка промежуточной частоты и радиосигналов, базовые станции и т.д.) и потребительской электронике (цифровые камеры, дисплеи, DVD, телевидение высокого разрешения).

Архитектура конвейерных АЦП происходит от поддиапазонной (sub-ranging) архитектуры, впервые применённой в 1950-х гг. Схема простого шестизрядного двухкаскадного поддиапазонного АЦП показана на рисунке 11.

Выходной сигнал устройства выборки-хранения (УВХ) оцифровывается первым каскадом, трёхразрядным суб-АЦП (SADC) – обычно параллельным преобразователем. Приблизжённый трёхразрядный результат преобразования (старшие биты) конвертируется обратно в аналоговый сигнал в трёхразрядном суб-ЦАП (SDAC). Затем выходной сигнал SDAC вычитается из сигнала УВХ, разность усиливается, и этот «сигнал остатка» оцифровывается трёхразрядным АЦП второго каскада для получения трёх младших разрядов 6-разрядного выходного слова.

Этот поддиапазонный АЦП может быть лучше изучен при рассмотрении временной диаграммы «остатка» на входе АЦП второго каскада, как показано на рисунке 12. Эта временная диаграмма типична для низкочастотного пилообразного сигнала, приложенного к аналоговому входу АЦП. Во избежание появления пропущенных кодов временная диаграмма остатка не должна выходить за пределы входного диапазона АЦП второго каскада, как показано для идеального случая на рисунке 12а. Это означает, что и N1-разрядный суб-АЦП, и N1-разрядный суб-ЦАП должны иметь точность выше, чем N1 + N2 разрядов. В приведённом примере N1 = 3, N2 = 3 и N1 + N2 = 6. Ситуация, показанная на рисунке 12б, приведёт к пропущенным кодам, когда временная диаграмма остатка выйдет за диапазон суб-АЦП N2, R, и попадёт в зону X или Y. Это может быть вызвано нелинейностью суб-АЦП N1 или несогласованностью усиления и/или смещения между каскадами. Выходной сигнал АЦП при этих условиях может выглядеть так, как на рисунке 13.

Показанная архитектура используется для разрешения до 8 разрядов (N1 = N2 = 4). Сохранить согласова-

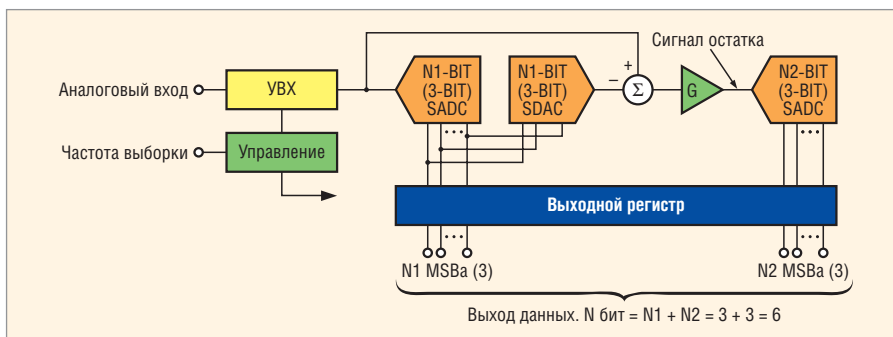


Рис. 11. Шестизрядный двухкаскадный поддиапазонный АЦП



Рис. 12. Временная диаграмма «остатка» на входе суб-АЦП второго каскада

ние между двумя каскадами при более чем восьми разрядах (с учётом, в частности, изменения температуры) будет трудно. Заметим, что это не является специфическим требованием для одинакового числа битов на каскад в поддиапазонной архитектуре. Кроме того, число каскадов может быть более двух. Тем не менее, разрешение при архитектуре, приведённой на рисунке 11, ограничено примерно восемью разрядами, если не использовать некоторые дополнительные способы коррекции ошибок.

Поддиапазонные АЦП с коррекцией ошибок появились в середине 1960-х гг. как средство для достижения большего разрешения при сохранении основ поддиапазонной архитектуры. Например, в двухкаскадном шестизрядном поддиапазонном АЦП в суб-АЦП второго каскада добавлялся дополнительный разряд, который позволял оцифровать зоны, показанные как X и Y на рисунке 12. Добавочный разряд второго каскада АЦП позволяет «остатку» отклоняться от идеального значения при условии, что он не выходит за диапазон второго каскада АЦП. Однако внутренний суб-ЦАП всё-таки должен иметь точность выше общего разрешения N1 + N2.

Основная схема шестизрядного поддиапазонного АЦП с коррекцией ошибок показана на рисунке 14. Разрешение второго каскада увеличено

до 4 разрядов вместо исходных трёх. Дополнительная логика, которая требуется для модификации кода суб-АЦП N1, когда «остаток» попадает в зоны X или Y, реализуется как простой сумматор с добавлением постоянного смещения к сигналу «остатка». При такой схеме старший бит суб-АЦП второго каскада определяет, будут ли старшие биты инкрементированы на 1 или же оставлены без изменения.

Отметим, что во втором каскаде АЦП можно использовать более одного корректирующего бита, но эта тема выходит за рамки данного обсуждения.

Поддиапазонный АЦП с коррекцией ошибок, показанный на рисунке 14, не имеет конвейерной задержки. Входное УВХ остаётся в состоянии

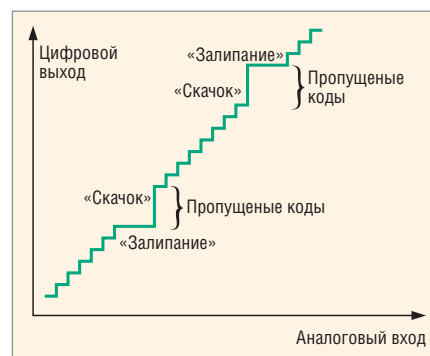


Рис. 13. Пропущенные коды, вызванные нелинейностью в старших разрядах АЦП или несогласованностью между каскадами

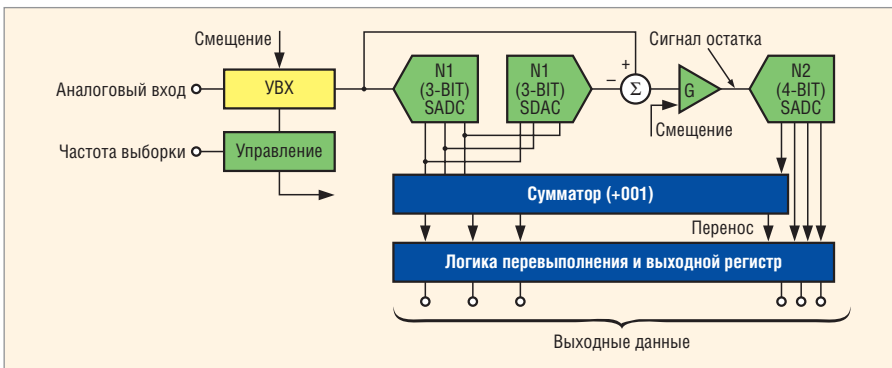


Рис. 14. Поддиапазонный АЦП с коррекцией ошибок, N1 = 3, N2 = 4

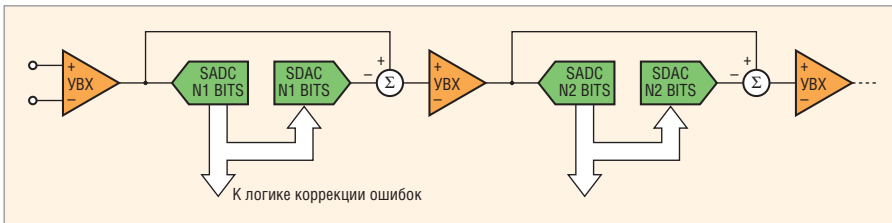


Рис. 15. Обобщённый вид конвейерных каскадов в поддиапазонном АЦП с коррекцией ошибок

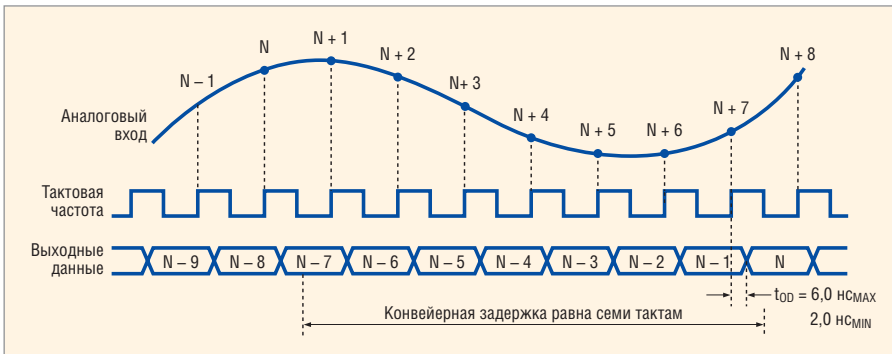


Рис. 16. Временная диаграмма типичного конвейерного АЦП, 12-разрядного 65-МГц AD9235

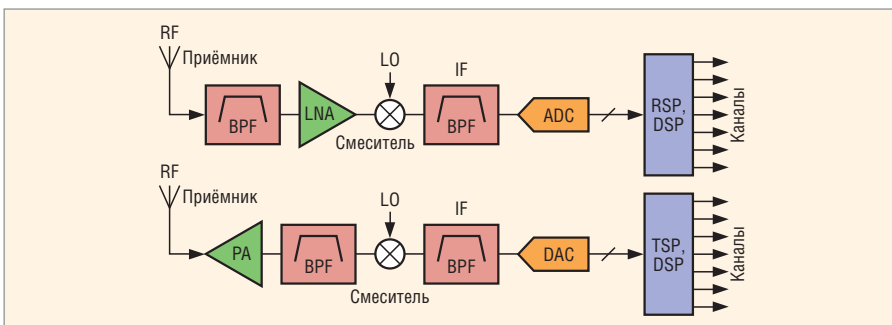


Рис. 17. Структура тракта ПЧ широкополосного программного радиоприёмника и передатчика

хранения всё время, требуемое для выполнения следующих операций: срабатывания суб-АЦП первого каскада, преобразования его выходного кода в аналоговую форму в суб-ЦАП первого каскада, вычитания сигнала суб-ЦАП из сигнала УВХ, усиления и преобразования в суб-АЦП второго каскада. После того как цифровые данные пройдут через логику коррекции ошибок и выходной регистр, они готовы к использованию, а преобразователь – к следующей выборке входного сигнала.

Для увеличения быстродействия основной схемы поддиапазонного АЦП очень часто используется показанная на рисунке 15 «конвейерная» архитектура. Такой конвейерный АЦП имеет поддиапазонную архитектуру с цифровой коррекцией, в которой каждый из двух каскадов работает с данными в течение половины цикла преобразования, а затем передаёт «остаток» со своего выхода на следующий каскад «конвейера» до начала следующей фазы тактового сигнала. Межкаскадное устройство вы-

борки-хранения (УВХ) работает как аналоговая линия задержки – она синхронизируется так, чтобы переходить в режим хранения по окончании преобразования в первом каскаде. Благодаря этому допускается большее время установления для внутренних суб-АЦП, суб-ЦАП и усилителей, и конвейерный преобразователь может работать на большей частоте, чем версия без конвейера.

При разработке конвейерных АЦП может быть сделано множество компромиссов, например, при выборе числа каскадов, числа битов в каскаде, числа корректирующих битов и быстродействия. Для уверенности в том, что выходные данные от отдельных каскадов, соответствующие определённым выборкам, поступают на логику коррекции ошибок одновременно, на выходе каждого из каскадов конвейера должно быть добавлено необходимое число сдвиговых регистров. Например, если для первого каскада требуется семь регистров для задержки, то для второго – шесть, для третьего – пять, и т.д. Таким образом, результирующие выходные данные формируются с задержкой, как показано на рисунке 16 – временной диаграмме для типичного конвейерного АЦП AD9235.

На рисунке 17 показана упрощённая схема типового программного радиоприёмника и передатчика. Основная его особенность: вместо того, чтобы каждый канал оцифровывать в приёмнике отдельно, непосредственно в АЦП оцифровывается вся полоса, содержащая множество каналов. Общая полоса, в зависимости от стандарта, может достигать 20 МГц. Фильтрация каналов, настройка и выделение осуществляются в цифровом виде в приёмном сигнальном процессоре (receive-signal processor, RSP) высокопроизводительным цифровым сигнальным процессором (digital signal-processor, DSP).

Оцифровка полосы частот на относительно высокой промежуточной частоте (ПЧ, intermediate frequency (IF)) устраняет несколько стадий обработки сигнала. Это приводит к дешёвым и гибким решениям, в которых обработка сигнала выполняется в цифровом виде, вместо более сложной аналоговой схемы, связанной со стандартным аналоговым супергетеродинным радиоприёмником. Кроме того, различные эфирные стандарты

(GSM, CDMA, EDGE и т.д.) могут быть реализованы на одном и том же оборудовании простым внесением соответствующих изменений в программное обеспечение. Заметим, что передатчик в программном радио использует передающий сигнальный процессор (TSP) и DSP для формирования индивидуальных каналов передачи через выходной ЦАП.

Требования к АЦП для приёмника определяются соответствующим эфирным стандартом, в котором работает приёмник. Сигнал в полосе, обрабатываемой АЦП, содержит, наряду с полезной информацией, помехи большой амплитуды. АЦП не должен давать интермодуляционных искажений при воздействии этих помех, так как они могут забивать небольшой полезный сигнал. Отношение наибольшей ожидаемой помехи к наименьшему ожидаемому сигналу в основном определяет требуемый свободный от искажений динамический диапазон (spurious-free dynamic range, SFDR). Помимо высокого SFDR, АЦП должен иметь соотношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR), соответствующее требуемой чувствительности приёмника.

Ещё одно требование к АЦП состоит в том, что SFDR и SNR должны быть определены для требуемой промежуточной частоты. Основная концепция квантования промежуточной частоты показана на рисунке 18, где сигнал с полосой 20 МГц оцифровывается на частоте 60 МГц. Обратите внимание, что процесс квантования ПЧ сдвигает сигнал из третьей зоны Найквиста без необходимости аналогового преобразования. Полезная полоса находится в центре зоны Найквиста на промежуточной частоте 75 МГц. Числа, выбранные в этом примере, до некоторой степени произвольны, но они вполне иллюстрируют описываемую концепцию. Эта область применения предъявляет жёсткие требования к АЦП, особенно к его SNR и SFDR. Современные конвейерные АЦП, такие как 14-разрядный 80-МГц AD9444, удовлетворяют этим требованиям. Например, AD9444 имеет SFDR 97 дБн и SNR 73 дБ при ПЧ 70 МГц на входе. Входная полоса пропускания AD9444 составляет 650 МГц. Существуют и другие модели АЦП, оптимизированные по SFDR и/или SNR, это AD9445 и AD9446.

## Выводы

Мы рассмотрели наиболее распространённые архитектуры современных интегральных схем АЦП: последовательного приближения, сигма-дельта и конвейерные.

АЦП последовательного приближения подходят для почти всех систем сбора данных с мультиплексированием, а также для большинства измерительных приложений. Они относительно просты в использовании, не имеют конвейерной задержки и выпускаются с разрешением до 18 разрядов и частотой преобразования до 3 МГц.

Для разнообразных промышленных измерений идеальны сигма-дельта-АЦП. Их разрешение составляет от 12 до 24 разрядов. Сигма-дельта-АЦП пригодны для обработки сигналов от различных датчиков, мониторинга энергии и управления двигателями. В большинстве случаев высокое разрешение и наличие встроенного инструментального усилителя позволяют подключать АЦП непосредственно к выходу датчика без необходимости использовать отдельный инструментальный усилитель или другие схемы согласования.

Сигма-дельта-АЦП и ЦАП легко интегрируются в микросхемы, содержащие большое количество цифровых функциональных узлов, и доминируют в тональной передаче и обработке звука. Передискретизация, присутствующая в этих АЦП, уменьшает требования к антиалиасинговым фильтрам перед АЦП и восстанавливающим фильтрам после ЦАП.

Для частот преобразования выше примерно 5 МГц наиболее часто используются АЦП с конвейерной архитектурой. В этих применениях обычно требуется разрешение до 14 разрядов и высокими SFDR и SNR в диапазоне частот от 5 МГц до более чем 100 МГц. АЦП этого класса используются в большинстве типов измерительного оборудования, включая цифровые осциллографы, анализаторы спектра и оборудования для получения изображений в медицине. Кроме того, они применяются в видеотехнике, радиолокации и телекоммуникационной аппаратуре, включая обработку ПЧ, программное радио, базовые станции, а также в потребительской электронике – цифровых камерах, дисплеях, телевидении высокой чёткости и т.д.

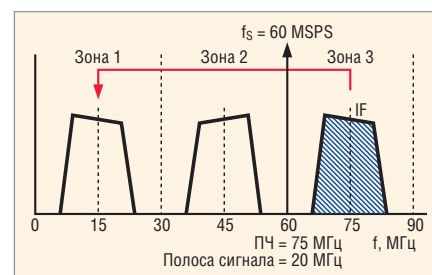


Рис. 18. Квантование сигнала с полосой 20 МГц при промежуточной частоте 75 МГц и частоте преобразования 60 МГц

Использование руководств по выбору и поисковых систем, предоставляемых производителями, в сочетании с фундаментальными знаниями об этих трёх архитектурах, могут помочь разработчику правильно выбрать АЦП для своей задачи. Использование оценочных плат может ещё облегчить этот процесс. Программа ADIsimADC® фирмы Analog Devices позволяет пользователю оценить динамическую производительность АЦП без использования какой-либо аппаратуры. Требуемое программное обеспечение и модели АЦП (и множество других вспомогательных материалов по разработке цифровых и аналоговых схем) можно свободно загрузить с сайта <http://www.analog.com>. Эти инструменты могут оказаться чрезвычайно ценными в процессе выбора.

Нельзя упускать из вида правильную разработку входных, выходных и тактирующих схем для АЦП. Справочные материалы и замечания по применению могут помочь при изучении этих важных вопросов. И, наконец, для успешной разработки устройств со смешанными сигналами не менее важны правильная конструкция платы, заземление и разводка. Для детального рассмотрения этих и других вопросов разработки читатель может обратиться к двум дополнительным источникам, указанным в списке литературы, а также к сайту фирмы Analog Devices <http://www.analog.com>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. W. Kester, Ed. Data Conversion Handbook, Published by Newnes, an imprint of Elsevier. 2005. Ch. 3. Data Converter Architectures.
2. W. Jung, Ed. Op Amp Applications Handbook, Published by Newnes, an imprint of Elsevier. 2005.
3. <http://www.analog.com>.

