

# Новые АЦП последовательного приближения Analog Devices Inc.

Кирилл КОВАЛЬ  
kirill.koval@eltech.spb.ru

**В статье рассмотрены АЦП последовательного приближения, анонсированные компанией Analog Devices Inc. в последнее время, их параметры и ключевые отличительные особенности.**

## Введение

На протяжении многих лет аналого-цифровые преобразователи последовательного приближения являются одним из самых распространенных типов АЦП. Трудно назвать область приборостроения, где бы не нашли применения данные микросхемы: аппаратура релейной защиты и контрольно-измерительные приборы, контроллеры промышленной автоматизации и встраиваемые системы, медицинская техника — повсюду, где требуется детерминированное во времени преобразование сигналов в широкой полосе частот с большим динамическим диапазоном, используются эти универсальные и достаточно простые в применении АЦП.

В связи со спецификой моей работы мне очень часто доводится беседовать с инженерами — разработчиками радиоэлектронной аппаратуры. Когда речь заходит о выборе АЦП для того или иного изделия (разговор может идти о новом проекте или о модернизации существующего изделия), я нередко слышу, что преобразование сигнала будет реализовано с помощью интегрированного в микроконтроллер АЦП.

Действительно, параметры АЦП последовательного приближения, входящих в периферию микроконтроллеров ведущих производителей, год от года становятся все лучше. Совершенствование технологии кристаллов позволяет совместить в одном корпусе высокопроизводительное процессорное ядро,

периферию и блоки аналого-цифровой обработки данных с хорошими характеристиками по переменному и постоянному току. Немаловажно и то, что использование встроенных АЦП соответствует требованиям снижения общей стоимости элементной базы аппаратуры, уменьшения габаритов и сокращения энергопотребления.

Тем не менее в приборах, где нужна оцифровка сигналов в полосе частот свыше сотни килогерц, необходим большой динамический диапазон или установлены жесткие требования по уровню шума и искажений, по-прежнему используются специализированные микросхемы АЦП.

## Серия прецизионных аналого-цифровых преобразователей AD400x

В настоящее время серия микросхем AD400x включает 18-разрядный 2 MSPS АЦП с дифференциальным входом AD4003 и AD4000, являющийся 16-разрядным АЦП со скоростью преобразования 1 MSPS и однополярным входом. Вскоре, по информации производителя, данная серия пополнится новыми микросхемами.

Преобразователь AD4003 (рис. 1) на данный момент считается одним из самых производительных АЦП последовательного приближения, выпускаемых Analog Devices Inc. Дифференциальный вход микросхемы позволяет обрабатывать сигнал в диапазоне  $\pm U_{ион}$  при напряжении опоры 2,4–5,1 В. Микросхема сочетает малое энергопотребление — всего 16 мВт в режиме наибольшей производительности, прекрасные характеристики по постоянному и переменному напряжению и набор функций, упрощающих разработку схем и улучшающих эксплуатационные параметры аппаратуры.

При использовании с опорой напряжением +5 В микросхема AD4003 обладает соотношением сигнал/шум, равным 100,5 дБ для сигнала в полосе частот до 1 кГц, а полный уровень искажений при этом состав-

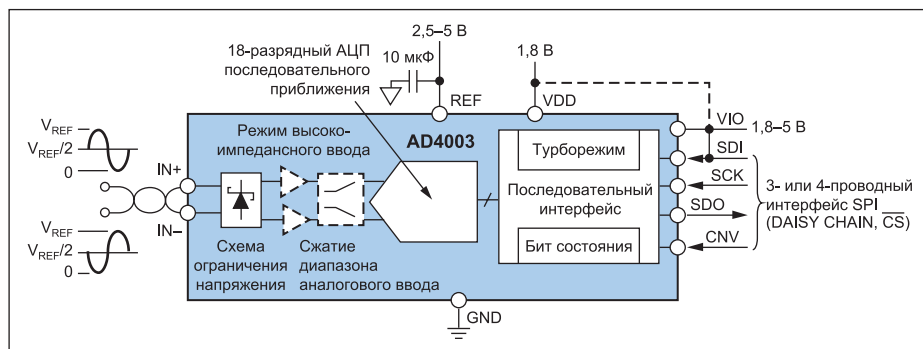


Рис. 1. Функциональная схема AD4003

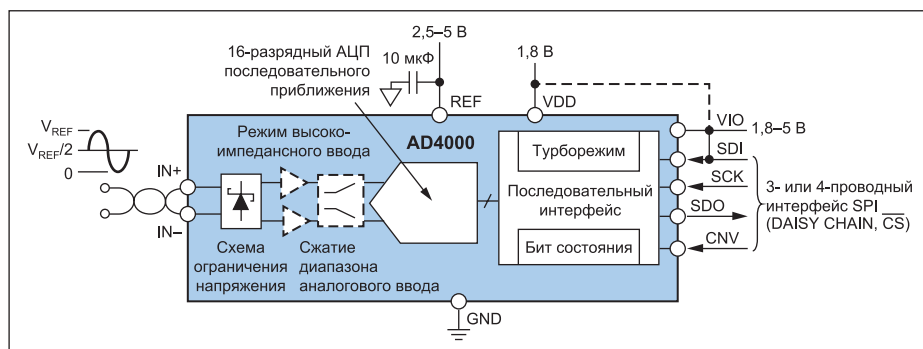


Рис. 2. Функциональная схема AD4000

ляет 123 дБ. Интегральная нелинейность достигает  $\pm 0,4$  LSB (или  $\pm 1,52$  ppm), а значение дифференциальной нелинейности составляет  $\pm 0,3$  LSB. Ошибка усиления равна 3 LSB.

Как было сказано выше, микросхема AD4000 (рис. 2) выполняет преобразование однополярных сигналов с разрядностью 16 бит со скоростью до 1 MSPS. Интегральная нелинейность AD4000 составляет  $\pm 0,2$  LSB, дифференциальная нелинейность равна  $\pm 0,15$  LSB.

Остановимся подробнее на новых функциональных особенностях АЦП, отличающих их от подобных микросхем предыдущих серий.

### Длительное время выборки сигнала

Первое, что мы рассмотрим, — более длительное, по сравнению с АЦП последовательного приближения предыдущих серий, время выборки сигнала, которое достигается путем ускорения операции вычисления. АЦП серии AD400x выполняет вычисление измеренного значения за 290 нс (для сравнения: время обработки сигнала в 16-разрядном 1 MSPS АЦП AD7916 составляет 500–710 нс). Соответственно, при сохранении общей длительности периода измерения и вычисления измерение сигнала АЦП (то есть заряд конденсаторов) может выполняться дольше. Следовательно, заряжать конденсаторы АЦП можно в течение большего интервала времени, что снижает требования к временным характеристикам драйвера-усилителя на входе АЦП. Также это позволяет использовать RC-фильтр на входе системы с меньшей частотой среза, что приводит к меньшему значению шумов на входе АЦП. Кроме того, увеличение значения сопротивления в RC-фильтре нижних частот позволяет уменьшить номинал конденсатора, а это улучшит устойчивость работы усилителя.

### Режим высокоимпеданного входа (High Z mode)

Другой особенностью АЦП серии AD400x является возможность включения режима высокоимпеданного входа, так называемого High Z mode, который обеспечивает преимущества при работе с низкочастотными сигналами.

Для достижения максимальной производительности (требуемого разрешения и уровня искажений при определенной скорости преобразования) АЦП последовательного приближения разработчик зачастую вынужден применять высокочастотный драйвер с достаточно большим энергопотреблением. Кроме того, следует учитывать, что для реализации полного динамического диапазона понадобится усилитель с выходным сигналом во всем диапазоне питающего напряжения (иначе говоря, с rail-to-rail-выходом). Режим высокоимпеданного входа характеризуется малыми токами на входе АЦП для сигналов в полосе от постоянной составляющей до 10 кГц и снижает уровень гармонических искажений (THD) в области частот до 100 кГц.

Особенность внутренней схемы АЦП AD400x позволяет снизить значения обратного броска заряда конденсаторов ЦАП, когда переключаемые конденсаторы разряжаются обратно на входные цепи в начале периода выборки. При работе микросхемы в режиме высокоимпеданного входа конденсаторы ЦАП заряжаются в конце периода вычисления, до напряжения, которое было в предыдущем цикле выборки.

Это позволяет уменьшить влияние заряда конденсаторов на напряжение на входе АЦП до следующего периода выборки.

На рис. 3 показана зависимость входного тока AD4003 от дифференциального напряжения на входе в обычном и в высокоимпеданном режимах.

Очевидно, что реализация входных цепей для АЦП в высокоимпеданном режиме будет значительно проще, нежели для обычных АЦП последовательного приближения, более того, если мы сравним входной ток с АЦП предыдущего поколения — например, AD7982, то увидим, что для AD4003 он в четыре раза меньше, чем для AD7982 (при прочих равных условиях). При включении высокоимпеданного режима входной ток будет меньше 1 мкА. Соответственно, в этом случае можно исключить высокочастотный активный драйвер (усилитель) из входной согласующей цепи АЦП и реализовать ее на пассивных компонентах.

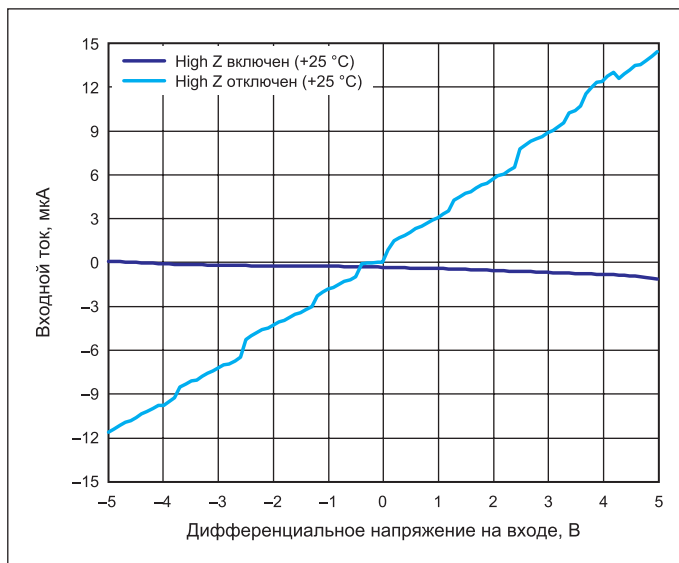


Рис. 3. Зависимость входного тока от дифференциального напряжения на входе

Резюмируя изложенное, отметим, что при использовании AD4000/AD4003 мы имеем возможность выбора усилителя и RC-фильтра, исходя из частотных параметров сигнала, а не свойств АЦП, обусловленных принципами работы схемы на переключающихся конденсаторах.

На рис. 4 приведены сравнительные характеристики соотношения сигнал/шум (SNR) AD4003 для различных значений номиналов резистора и емкости RC-фильтра при использовании операционных усилителей ADA4077-1 и ADA4610-1.

На рис. 5 показаны сравнительные характеристики полного коэффициента нелинейных искажений (THD) для тех же условий.

Следует учесть, что, если входной сигнал располагается на частотах выше 100 кГц, высокоимпедансный режим нужно отключить.

### Режим сжатия диапазона аналогового входа (span compression mode)

В микросхемах серии AD400x существует возможность включения режима сжатия диапазона аналогового входа (span compression mode). Данный режим применяется в схемах с однополярным питанием, позволяя использовать весь динамический диапазон АЦП.

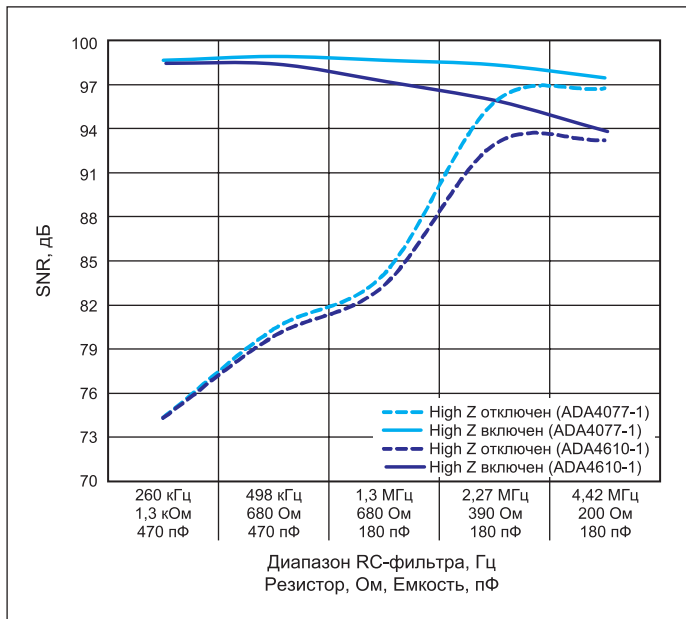
При работе с драйвером с однополярным питанием нужно учитывать, что имеется интервал между напряжением питания и максимальным значением сигнала на выходе усилителя, равно как и интервал между минимальным значением сигнала и нулевым потенциалом. Режим сжатия диапазона аналогового входа (рис. 6) устанавливает диапазон входа АЦП в соответствии с полным диапазоном выходного сигнала драйвера в пределах  $-U_{OP} \times 0,8 \dots +U_{OP} \times 0,8$ , при этом соотношение сигнал/шум уменьшается на 1,9 дБ.

### Встроенная защита от перенапряжения

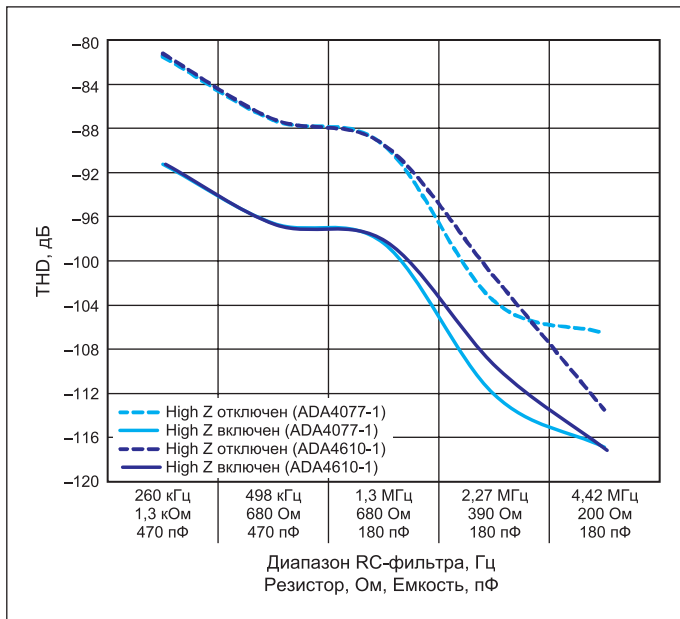
Рассмотрим случай, когда напряжение питания входного драйвера-усилителя выше, чем напряжение опоры в аналоговой части АЦП. В случае превышения входным сигналом значения VREF ток начинает течь через диод D1 (рис. 5) в источник опорного напряжения, что может привести к его повреждению. В АЦП серии AD400x предусмотрена встроенная защитная схема, которая включается при превышении входным сигналом напряжения опоры.

При превышении входным сигналом напряжения ИОН на 400 мВ включается защита, которая ограничивает напряжение в цепи аналоговых входов АЦП, тогда ток (до 50 мА) через защитную схему начинает протекать на нулевой потенциал.

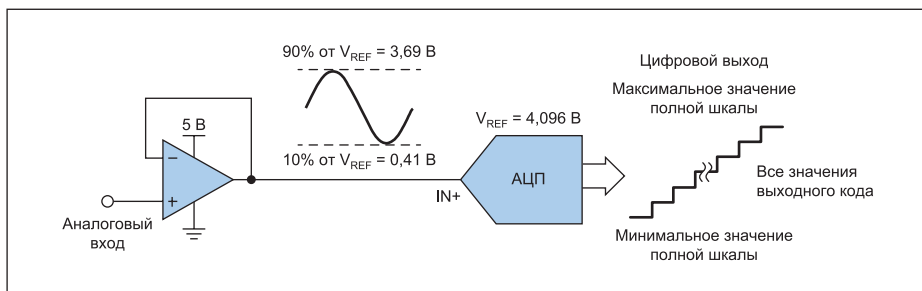
Как показано на рис. 7, внутренняя схема защиты от перенапряжения и внешний резистор номиналом 200 Ом позволяют отказать от внешних защитных диодов.



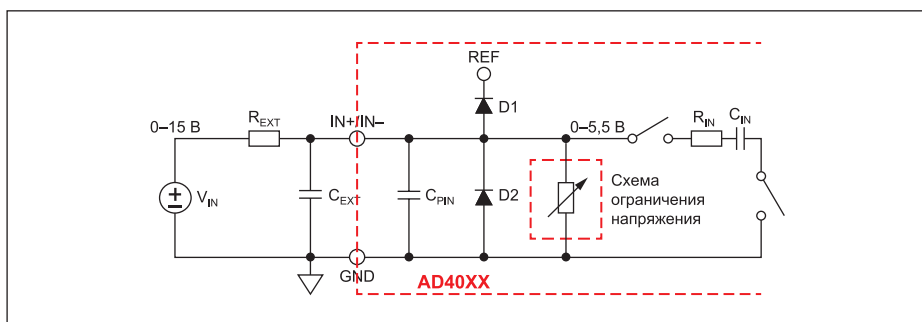
**Рис. 4.** Соотношение сигнал/шум для различных значений RC-фильтра на входе AD4003 при использовании драйверов (операционных усилителей) ADA4077-1 и ADA4610-1 во включенном и отключенном высокоимпедансном режиме ввода ( $U_{оп} = 5\text{ В}$ ,  $F_{вх} = 1\text{ кГц}$ )



**Рис. 5.** Полный коэффициент нелинейных искажений для различных значений RC-фильтра на входе AD4003 при использовании драйверов (операционных усилителей) ADA4077-1 и ADA4610-1 во включенном и отключенном высокоимпедансном режиме ввода ( $U_{оп} = 5\text{ В}$ ,  $F_{вх} = 1\text{ кГц}$ )



**Рис. 6.** Режим сжатия диапазона аналогового входа



**Рис. 7.** Встроенная защита от перенапряжения

### Интегрированные подсистемы ввода ADAQ7980/ADAQ7988

Тенденция настоящего времени, проявляющаяся во все большей интеграции компонентов аналого-цифровой обработки сигналов, предоставляет возможность инженерам-разработчикам реализовывать устройства с меньшими габаритами и энергопотреблением, а совершенствование технологий производства кристаллов приводит к появлению

микросхем с существенно лучшими точностными и динамическими параметрами. Кроме того, применение микросхем с большим количеством встроенных блоков дает определенную гибкость при конструировании, позволяя использовать наработанные решения в сходных по назначению приборах.

В платах, выполняющих ввод аналоговых сигналов, часто нужно организовать большее количество каналов ввода при сохранении имеющегося форм-фактора платы или блока

(особенно часто такое требование возникает в аппаратуре релейной защиты или приборах промышленной автоматизации). В случае необходимости присутствия гальванической развязки каждого канала аналогового входа применение многоканальных аналого-цифровых преобразователей не представляется возможным.

Недавно компания Analog Devices Inc. анонсировала выпуск компонентов (интегрированных подсистем ввода данных) ADAQ7980 и ADAQ7988, основу которых представляют 16-разрядные АЦП последовательного приближения со скоростью преобразования 1 MSPS и 500 kSPS соответственно. Помимо прецизионного АЦП с малым энергопотреблением, ADAQ7980 и ADAQ7988 имеют на борту согласованный малошумящий широкополосный драйвер АЦП с большим входным сопротивлением, буфер источника опорного напряжения и блок управления электропитанием и выполнены в 24-выводном LGA-корпусе 5×4 мм (рис. 8).

Наличие на борту данных элементов, а также RC-фильтра между драйвером и входом АЦП существенно упрощает разработку схемы аналого-цифрового преобразования, поскольку правильный выбор драйвера АЦП, буфера источника опорного напряжения и проектирование RC-фильтра является важнейшим условием достижения требуемых параметров системы в целом.

Данные компоненты реализованы по технологии, называемой «Система в одном корпусе» (SiP, system-in-package), 3D-модель компонентов приведена на рис. 9.

Внутренние цепи ADAQ7980 и ADAQ7988 имеют оптимизированную топологию и ре-

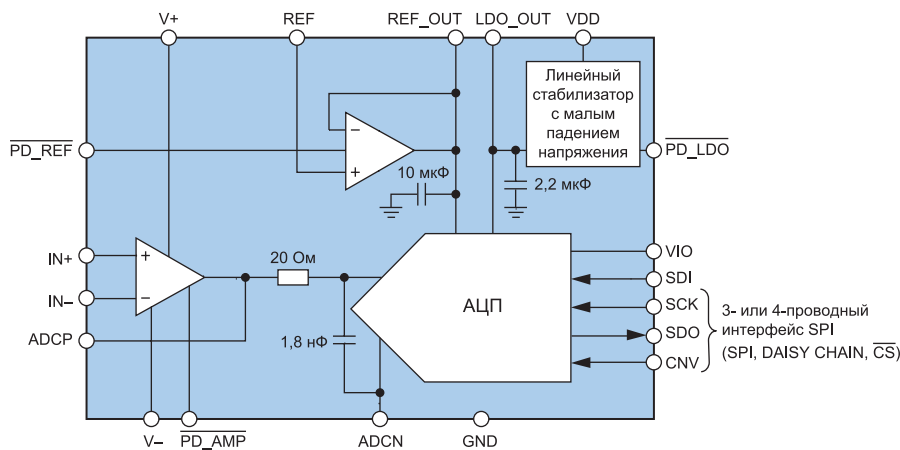


Рис. 8. Внутренняя структура ADAQ7980 и ADAQ7988

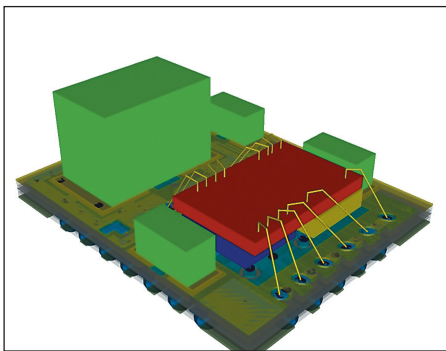


Рис. 9. 3D-модель компоновки ADAQ7980 и ADAQ7988. Красным цветом выделен АЦП, синим — линейный стабилизатор, желтым цветом обозначен драйвер АЦП

лизованы с помощью прецизионных пассивных компонентов, это позволяет не только достигнуть заявленных в документации параметров микросхемы, но и снизить вероятность ошибок при проектировании схемы аналогового ввода в целом и при проектировании печатной платы.

Интегрированные подсистемы ввода серии ADAQ798x обладают интегральной нелинейностью  $\pm 8$  ppm (максимальное значение — 20 ppm) и значением дифференциальной нелинейности в  $\pm 7$  ppm (максимальное значение — 14 ppm). Величина ошибки усиления равна  $\pm 0,002\%$  (от полной шкалы) при температурном дрейфе не более  $0,4$  ppm/°C, а величина ошибки установки нуля составляет  $\pm 0,06$  мВ при среднем значении температурного дрейфа  $0,3$  мкВ/°C (максимальное значение  $1,3$  мкВ/°C).

На аналоговый вход ADAQ798x можно подавать сигналы в диапазоне 0–5 В (максимального напряжения опоры). Динамический диапазон ADAQ798x равен 92 дБ (при работе с опорным напряжением в 5 В) и снижается до 87 дБ при использовании опорного напряжения 2,5 В.

Соотношение сигнал/шум ADAQ798x при оцифровке сигнала в полосе до 10 кГц

и использовании опорного напряжения 5 В равно 91,5 дБ, а динамический диапазон, свободный от искажений, имеет значение 106 дБ при тех же условиях.

Схема согласования ИОН позволяет работать с напряжением от 2,4 до 5,1 В.

Основу схемы составляют малошумящий усилитель (буфер) и конденсатор номиналом 10 пФ. Схема согласования ИОН реализована таким образом, чтобы минимизировать паразитное сопротивление между развязывающим конденсатором и матрицей конденсаторов АЦП. Это позволяет конденсаторам АЦП быстро заряжаться в процессе выполнения измерений.

Цифровой интерфейс ADAQ798x реализован по протоколу SPI, позволяя подключать его к линиям с 1,8-, 2,5-, 3,3- и 5-В логическими уровнями. Возможно последовательное подсоединение нескольких ADAQ798x в различных режимах.

Компоненты серии ADAQ798x работают с напряжением питания от 3,5 до 10 В, ADAQ7980 (1 MSPS) рассеивает мощность 20 мВт при максимальной производительности, а ADAQ7988 (500 kSPS) при максимальной производительности потребляет 16 мВт.

К безусловным достоинствам ADAQ7980 и ADAQ7988 следует отнести расширенный температурный диапазон  $-55...+125$  °C.

## Выводы

Новые АЦП последовательного приближения обладают дополнительными функциями, упрощающими их применение и улучшающими характеристики схем преобразования сигнала.

В АЦП серии AD400x режим работы High Z mode позволяет использовать во входных цепях АЦП прецизионные низкоскоростные операционные усилители при сохранении производительности, что существенно сокращает энергопотребление схемы в целом. Режим высокоимпедансного входа предус-

матривает применение RC-фильтров с более низкой частотой среза, что приводит к улучшению соотношения сигнал/шум и коэффициента нелинейных искажений.

Наличие встроенных драйвера АЦП и буфера источника опорного напряжения в подсистеме ввода аналоговых сигналов ADAQ798x помогает избежать достаточно распространенных ошибок при выборе данных компонентов, при проектировании электрической схемы и конструировании печатной платы, которые приводят к ухудшению параметров работы схемы аналого-цифрового преобразования.

## Литература

1. Pachchigar M., Walsh A. Next-Generation SAR ADC Addresses Pain Points of Precision Data Acquisition Signal Chain Design. [www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/next-generation-sar-adc-addresses-precision-data-acquisition.html](http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/next-generation-sar-adc-addresses-precision-data-acquisition.html)
2. 18-Bit, 2 MSPS Precision SAR Differential ADC. Datasheet. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD4003.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD4003.pdf)
3. 16-Bit, 2 MSPS Precision Pseudo Differential SAR ADC. Datasheet. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD4000.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD4000.pdf)
4. 16-Bit, 1 MSPS/500 kSPS PulSAR ADCs in MSOP/LFCSP. Datasheet. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7915\\_7916.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7915_7916.pdf)
5. 16-bit, 1 MSPS, Integrated Data Acquisition Subsystem in LGA package. Datasheet. [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAQ7980\\_7988.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAQ7980_7988.pdf)
6. Curran R. Improving Precision Data Acquisition Signal Chain Density Using SiP Technology. [www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/improving-precision-data-acquisition-signal-chain-density-using-sip-technology.html](http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/improving-precision-data-acquisition-signal-chain-density-using-sip-technology.html)
7. Kestner W. Analog-Digital Conversion. ADI Central Application Department, 2004.
8. Линейные схемы. Руководство по проектированию. Под ред. X. Цумбалена. М.: Технофера, 2011.