

# ПРЕЦИЗИОННЫЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

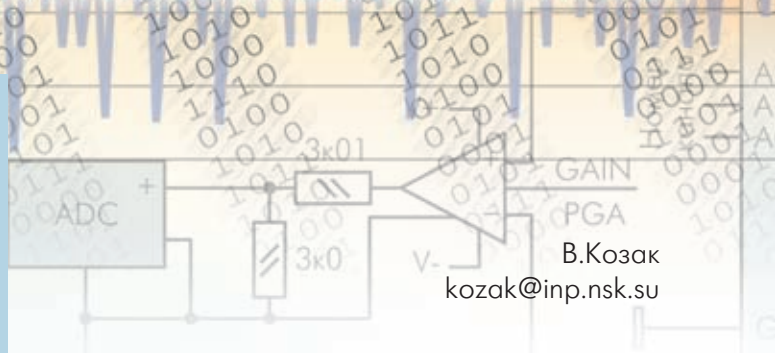
Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП/ЦАП) – широко распространенные функциональные узлы современной бытовой электроники (цифровых камер, CD- и DVD-систем, цифровых контроллеров), промышленной и военной электроники, приборостроения.

В основе предлагаемой статьи о проблемах изменений с помощью АЦП – результаты работ в области создания АЦП/ЦАП, предназначенных для электрофизических установок в Институте ядерной физики им. Будкера, Новосибирск [1], а также для технологических исследований, проводимых в ИАЭ им. Курчатова, Москва [2], и в НИИФП, Зеленоград. При участии автора для этих целей были разработаны описанные ниже прецизионные преобразователи.

В большинстве приложений достаточно использовать преобразователи низкой (8–10 бит) или средней (12–14 бит) разрешающей способности. Производители поставляют на рынок десятки моделей как микросхем соответствующей разрядности, так и микроконтроллеров с АЦП и/или ЦАП на кристалле. На их основе компании электронной промышленности производят широкую гамму недорогих аналого-цифровых и цифроаналоговых приборов, выполненных в виде модуля (часто со стандартным интерфейсом – RS-232, RS-485, Ethernet). В результате разработчик электронных систем имеет выбор устройств ввода/вывода аналоговых величин и может встраивать в систему как готовые приборы, так и микросхемы.

Существуют приложения, требующие более высокого разрешения (16–20 бит) и/или точности. Электронная промышленность выпускает и такие микросхемы, а ведущие компании, например National Instruments (NI), поставляют готовые АЦП/ЦАП (в разном оформлении). Однако часто оказывается, что применение готовых АЦП/ЦАП проблематично либо по причине размеров, как в случае с малогабаритным хроматографом (где объем всей электроники меньше одного АЦП в стандарте VXI), либо из-за большого числа каналов, требующих АЦП/ЦАП (как в современном ускорительном комплексе).

В обоих примерах лучше не использовать готовые устройства, а встраивать микросхемы непосредственно в электронику, но это часто вызывает у специалистов затруднения технического порядка. Далее будут рассмотрены типичные проблемы, возникающие при построении прецизионных преобразователей и предложен ряд схемотехнических решений с практическими рекомендациями по реализации АЦП высокого разрешения и высокой точности.



## ПОСТРОЕНИЕ АЦП, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Измерения с высоким разрешением требуют высокого уровня подавления помех в измерителе. Спектр помех и наводок на сигнальные трассы широк – от 50 Гц (частоты питания) до нескольких МГц (импульсные помехи и наводки). Для измерения постоянных и мало меняющихся напряжений с высоким разрешением в условиях помех наиболее адекватны дельта-сигма АЦП. Их производители (например TI и др.) предлагают АЦП, оптимизированные для различных приложений.

Многоканальная измерительная система включает кроме АЦП мультиплексор входных каналов и устройство нормирования уровня сигналов, так как измеряемые сигналы могут быть как больше, так и меньше стандартного диапазона, обрабатываемого АЦП: 0–5 В. Схема измерительного тракта, удовлетворяющая описанным условиям, приведена на рис.1. Это фрагмент схемы серийного измерителя [3] с упрощениями, описанными ниже.

Измерительный тракт состоит из коммутатора входных сигналов (MPC507), усилителя с программируемым коэффициентом усиления (PGA204), АЦП (ADS1210) и источника опорного напряжения (AD780). Входной сигнал диапазона  $\pm 10$  В преобразуется в сигнал диапазона 0–5 В, нужный для АЦП, с помощью резистивного делителя и входа Ref микросхемы программируемого усилителя. Эта же микросхема позволяет усилить слабые сигналы (возможные коэффициенты усиления 1, 10, 100 и 1000). Чтобы не загромождать схему (см. рис. 1), на ней не показаны развязки в цепях питания.

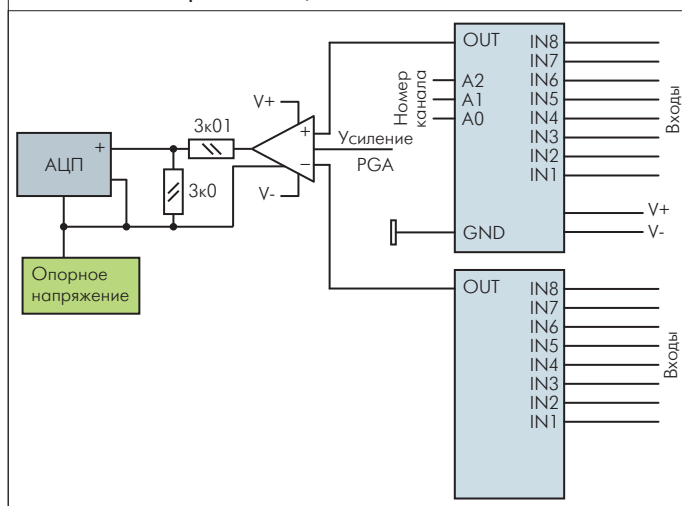
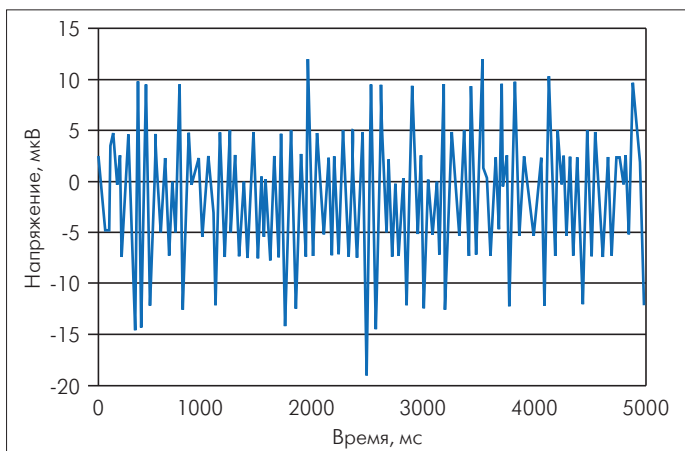


Рис. 1. Схема измерительного тракта



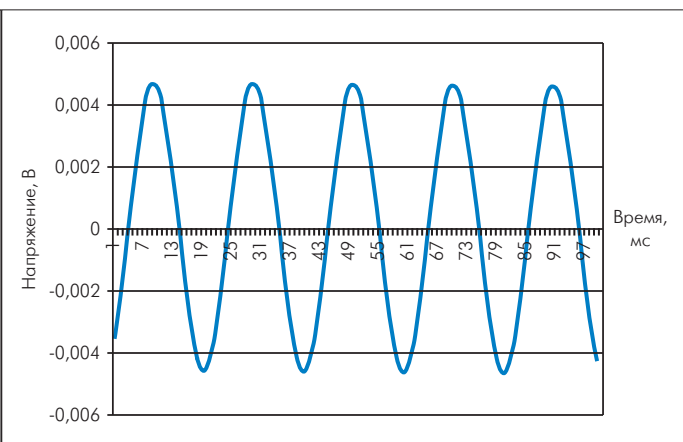
**Рис.2. Шумовая дорожка измерителя**

Многие АЦП имеют отключаемый входной повторитель напряжения. Он обеспечивает высокое входное сопротивление преобразователя, но при этом возрастают собственные шумы и уменьшается диапазон входных сигналов с 0–5 В до 0,1–3,5 В. Отключив входной буфер, можно исключить рост шумов и потерю входного диапазона. В этом случае на входы аналогового сигнала и опорного напряжения АЦП с частотой 10–100 кГц будет подключаться внутренняя емкость в несколько пикофард. Это приведет, из-за изменения входного тока, во-первых, к изменению режима микросхемы (времени измерения, усиления и т.п.) и, во-вторых, к повышению нелинейности из-за прохождения коротких импульсов через эту емкость. Поэтому, выключая входной буфер, следует осуществить "развязку" как сигнального, так и опорного входов, которая приводит к образованию на входе фильтра нижних частот с заметной постоянной времени.

Если существуют источники высокочастотных импульсных помех, то для их подавления полезно добавить фильтрующие RC-цепочки либо ко входу, либо "врезать" их между выходами мультиплексора и входами усилителя. Последнее более экономично, но влияет на время установления сигнала при переключении каналов.

Итак, рассмотренный нами многоканальный измеритель постоянного или медленно меняющегося напряжения с высоким разрешением, при использовании микросхем, представленных на рис. 1, имеет шумовую характеристику, показанную на рис. 2.

Время измерений было равно 20 мс на отсчет. Шкала измерителя составляет  $\pm 10$  В, следовательно, уровень шумов измерителя (при амплитуде  $\pm 20$  мкВ) составляет около  $\pm 2$  ppm. То есть он может регистрировать ничтожно малые изменения входного напряжения. Можно получить и более высокое разрешение, используя современные микросхемы (ADS1216, ADS1232, ADS1255 и т.п.), либо усредняя измерения. Так как рассматриваемая схема содержит усилитель с программируемым коэффициентом усиления, то можно не только варьи-



**Рис.3. Измерение синусоидального сигнала низкой частоты**

ровать, но и значительно уменьшить уровень шумов, приведенных ко входу.

Если уровень помех с частотой питания (50 Гц) невелик, и мы используем наш измеритель для обработки не постоянного, а низкочастотного сигнала, то и в этом случае есть шанс получить хорошие результаты. Микросхема АЦП может быть запрограммирована на большую скорость измерений. Так, если воспользоваться микросхемой ADS1210 для измерения синусоидального сигнала частотой 50 Гц при времени измерений 1 мс на отсчет (рис.3), то при входной шкале  $\pm 10$  В минимальный измеряемый сигнал составит чуть больше 4 мВ.

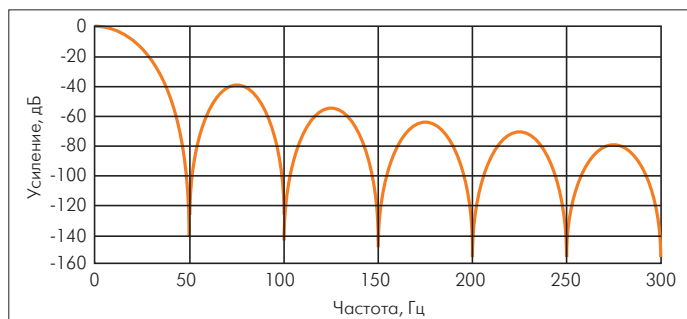
Современные модели сигма-дельта АЦП (например, ADS1255) позволяют одним и тем же измерителем обрабатывать микровольтовые сигналы с 20–24-разрядным разрешением и одновременно регистрировать сигналы переменного напряжения с довольно хорошим разрешением (16–17 бит при 33 мкс на отсчет).

В начале статьи упоминалось, что одним из достоинств дельта-сигма АЦП является хорошее подавление помех и наводок. На рис. 4 приведена частотная характеристика подавления наводок при времени измерений 20 мс на отсчет, взятая из справочных данных на микросхему ADS1210 (измерения в нескольких точках реального прибора полностью соответствуют приведенному графику).

Из рисунка видно, что подавление помех с частотами, кратными частоте питающей сети, очень хорошее. Следует отметить, что более поздние модели микросхем (ADS1216, ADS1255 и т.п.) имеют для подавления помех сложный цифровой фильтр и соответствующий график выглядит еще более убедительным.

Схема на рис.1 имеет еще одну особенность – дифференциальный вход. Как это используется? Практически при любой длине аналоговой линии между измерителем и источником измеряемых сигналов возникает ошибка, вызванная тем, что между "землями" измерителя и источника сигнала текут паразитные токи. Ошибка, вызванная этим током, может составлять милливольты, а иногда и вольты. Переменная составляющая ошибки легко подавляется измерителем, а постоянная составляющая входит в измеряемый сигнал. Для устранения этой ошибки можно либо гальванически изолировать измеритель от локальной "земли" и соединиться с "землей" источника сигнала, либо измерять разность между "нужными" точками в источнике сигнала, используя дифференциальный вход. Эти проблемы подробно освещены в специальной литературе по измерениям.

Из изложенного видно, что используя современные компоненты, можно создать недорогой и компактный измеритель с высокой разрешающей способностью (19–24 бита), хорошей линейностью и прекрасным подавлением паразитных помех. Часто этого достаточно, однако иногда требуется гарантировать точность измерений в определенном диапазоне температур. Резонный вопрос: какую точность



**Рис. 4. Частотная характеристика фильтра ADS1210 при времени измерения 20 мс на отсчет**

измерений может обеспечить измеритель, схема которого показана на рис. 1, чем эта схема определяется и как можно ее улучшить?

В точность и температурную стабильность измерений здесь вносят вклад следующие элементы:

- собственно микросхема АЦП,
- источник опорного напряжения,
- резистивный делитель,
- усилитель с программируемым коэффициентом усиления,
- напряжения, создаваемые паразитными токами печатной платы.

Микросхему АЦП можно считать идеальным элементом, если регулярно проводить процедуру калибровки. Опорный источник на 2,5 В (например, AD780В) обычно имеет дрейф выходного напряжения не лучше 3 ppm/°C. Резистивный делитель может быть очень качественным, но дорогим. При разумной цене усилителя можно рассчитывать на 10 ppm/°C.

Оценить стабильность программируемого усилителя труднее, так как дрейфы смещения нуля и коэффициента усиления зависят от включенного коэффициента усиления. Кроме того, входной ток усилителя создает падение напряжения на внутреннем сопротивлении входного коммутатора, резисторах подавления высокочастотных помех и внутреннем сопротивлении источника сигнала. Грубо для PGA204В общий вклад можно оценить в 20 ppm/°C.

Как можно видеть из приведенных оценок, простейшая схема не позволяет достичь стабильности, лучшей, чем 20–30 ppm/°C. При изменении температуры окружающей среды на 30°C это приведет, соответственно, к ошибке 0,1%.

Многие разработчики, однако, ограничиваются описанной схемой, пытаясь улучшить стабильность аналогового тракта путем выбора более дорогих компонентов. В то же время существует недорогой способ улучшить показатели нашего измерителя. Многие АЦП имеют развитую систему калибровок и кроме обычно используемой "внутренней" калибровки дают пользователю так называемые "системные" калибровки. А именно: если на входы микросхемы подать некоторое напряжение и выполнить команду "калибровка нуля системы", то это напряжение при измерениях будет считаться "нулевым". Если же после этого подключить к входам микросхемы некоторое эталонное напряжение и выполнить команду "калибровка масштаба системы", то это напряжение будет считаться максимально возможным, играя роль шкалы измерителя.

Из сказанного следует, что если пожертвовать двумя входными каналами: "заземлить" один из них около входного разъема, а на второй подать эталонное напряжение от высокостабильного опорного источника, после чего провести две "системные" калибровки измерителя, то все погрешности аналогового тракта будут учтены самим АЦП и не будут вносить свой вклад в результат измерения. Вся точность измерителя в этом случае будет определяться точностью источника опорного напряжения. При этом все компоненты аналогового тракта, включая опорный источник АЦП, не должны

быть прецизионными. Используя в качестве эталонного опорного источника микросхему AD688В, можно получить температурную стабильность не хуже 1,5 ppm/°C (для большинства микросхем это значение будет ниже) [4].

Как видно из изложенного, современная элементная база позволяет создать недорогой и компактный измеритель с параметрами, о которых еще совсем недавно можно было только мечтать. Это существенно расширяет возможности разработчика сложных электронных систем.

В статье были рассмотрены только некоторые вопросы построения прецизионных аналого-цифровых измерителей. Другими важными вопросами при проектировании являются такие, как долговременная стабильность, линейность, возможность достижения более высокого разрешения и точности и др. Шумовые характеристики и результаты измерений описанных схем можно найти по адресу: <http://www.inp.nsk.su/~kozak/appnotes/apnc0.htm>

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Shatunov Yu.M.** Status of the VEPP-2000 collider project. – Proceedings of APAC 2004, Gyeongju, Korea.
2. **Korchuganov V.** et al. Operation and plans on the accelerator complex in Kurchatov center of synchrotron radiation. – Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004.
3. **Козак В.Р., Купер Э.А.** Микропроцессорные контроллеры для управления источниками питания / Препринт ИЯФ 2001-70, 2001.
4. **Козак В.Р.** Многоканальный прецизионный аналого-цифровой преобразователь в стандарте VME / Препринт ИЯФ 2004-69, 2004.