

# Решения компании Texas Instruments для прецизионных измерений

**Как известно, измерительные приборы являются неотъемлемой частью жизни человека и необходимы для обеспечения комфортного существования и развития общества: начиная с измерительной техники, используемой в быту (термометры, барометры, тонометры и т. д.) и заканчивая сложными измерительными устройствами, работающими в системах автоматизации производственных процессов или сбора данных.**

Пётр ЧЕРМИСОВ

## Введение

Выбор элементной базы оказывает существенное влияние на качество проектируемого измерительного прибора, а также на сроки и сложность разработки. При этом ошибки, допущенные при проектировании, или необоснованный выбор компонентов могут привести к необходимости усложнения процессов калибровки и увеличению сроков производства, что в свою очередь ведет к дополнительным затратам. При проектировании измерительного прибора нужно правильно предъявлять требования и изучать техническую документацию, выбирая компоненты для включения их в состав разрабатываемого устройства.

Широкая номенклатура электронных компонентов, выпускаемых компанией Texas Instruments (TI), позволяет реализовать любое решение, отвечающее самым современным метрологическим и функциональным требованиям. В этой статье рассмотрены  $\Delta\Sigma$ -АЦП и некоторые операционные усилители компании TI для прецизионных измерений. Следует отметить, что детальную информацию и технические характеристики рассматриваемых компонентов можно уточнить в технической документации.

Сегодня выпускается широкий спектр измерительных приборов, предназначенных для измерения неэлектрических величин. В таких устройствах аналого-цифровой преобразователь является важнейшим компонентом, определяющим метрологические характеристики, а также быстродействие устройства. Существенный качественный скачок метрологических характеристик измерительной техники стал возможен благодаря появлению  $\Delta\Sigma$ -АЦП: он позволил существенно повысить метрологические показатели и до сих пор является ключевым компонен-

том в прецизионных измерениях.  $\Delta\Sigma$ -АЦП — это сложная система, технологией производства которой обладает далеко не каждая современная полупроводниковая компания. Texas Instruments — один из лидеров по производству  $\Delta\Sigma$ -АЦП и компонентов для прецизионных измерений. Общее количество выпускаемых компанией TI моделей АЦП насчитывает несколько сотен, из них около 100 моделей — это  $\Delta\Sigma$ -АЦП. Подробнее о  $\Delta\Sigma$ -АЦП можно узнать из «Руководства по выбору усилителей и преобразователей данных», доступного на сайте компании TI [1] в разделе «Преобразователи данных».

$\Delta\Sigma$ -АЦП можно разделить на три основные группы по метрологическим характеристикам и быстродействию.

## АЦП первой группы

К этой группе можно отнести АЦП, используемые в составе массовых измерительных приборов с невысоким энергопотреблением, таких как тонометры, термометры, датчики температуры, давления, силы и т. д. В этих приборах обычно используются  $\Delta\Sigma$ -АЦП общего применения. Это недорогие малогабаритные 16-разрядные АЦП с низким энергопотреблением, с источником тактовых импульсов и цифровыми интерфейсами (рис. 1). Часто такие АЦП имеют в своем со-

ставе программируемый усилитель и источник опорного напряжения. В большинстве случаев для схем усиления и нормирования сигнала в таких устройствах достаточно встроенного в АЦП программируемого усилителя (PGA). В некоторых случаях тип первичного преобразователя или параметры измеряемого сигнала требуют применения внешних цепей усиления и/или фильтраций с использованием операционных усилителей (ОУ).

В зависимости от конкретного приложения можно использовать преобразователи с частотой дискретизации от нескольких тысяч преобразований в секунду (ADS114x) до нескольких единиц преобразований в секунду (ADS1100), от 16-канальных (ADS1158) до одноканальных (ADS1113). Стоит отметить семейство преобразователей ADS1113/4/5. ADS1114/5 — недорогой 16-разрядный преобразователь с программируемой скоростью преобразования (до 860 преобразований/с), который имеет встроенный программируемый усилитель (PGA), встроенный источник опорного напряжения, внутренний тактовый генератор и широкий диапазон напряжения (от 2 до 5,5 В), что удобно при питании от батареи (табл. 1).

Современные малогабаритные корпуса для поверхностного монтажа MSOP и X2QFN позволяют сэкономить место на печатной плате, что необходимо при разработке малогаба-

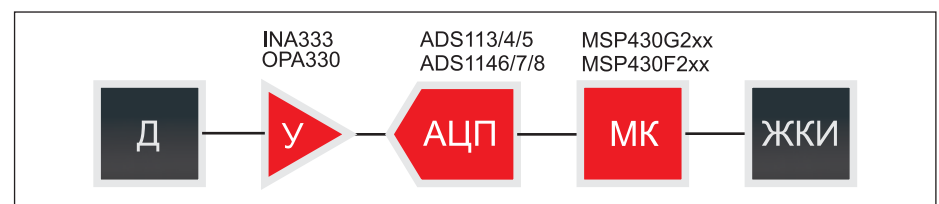


Рис. 1. Обобщенная структурная схема простого показывающего измерительного прибора:  
Д — датчик с аналоговым выходом; У — усилитель

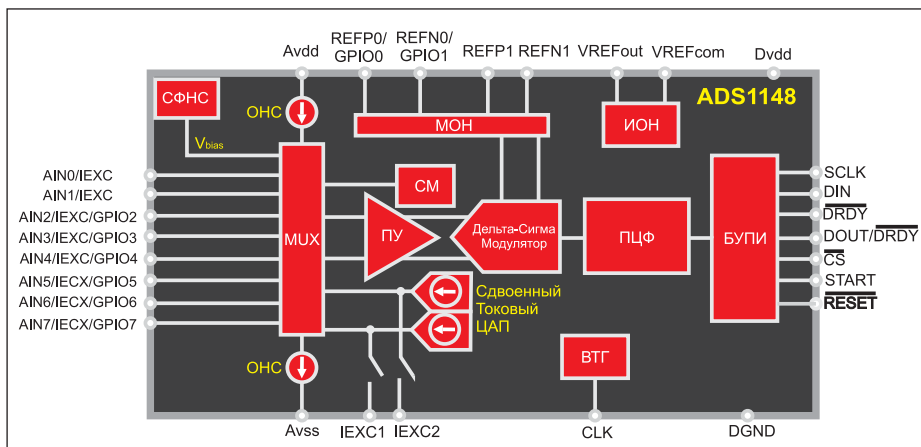


Рис. 2. Функциональная схема АЦП ADS1148: СФНС — система формирования напряжения смещения; СМ — системный монитор; МОН — мультиплексор опорных напряжений; ОНС — система обнаружения неисправности сенсора; ВТГ — внутренний тактовый генератор; ИОН — источник опорного напряжения; ПЦФ — программируемый цифровой фильтр; БУПИ — блок управления последовательным интерфейсом

ритных устройств. В некоторых приложениях ADS114/5 можно применять без входных измерительных и усилительных трактов, используя внутренний программируемый усилитель. В приложениях, где требуется всего один канал и не нужен встроенный в АЦП программируемый усилитель, можно использовать ADS1113. Невысокая стоимость и неплохие метрологические характеристики (16 значащих разрядов, интегральная нелинейность (INL) порядка  $\pm 1$  МЗР, погрешность смещения (Offset Error) в дифференциальном режиме порядка  $\pm 1$  МЗР) семейства ADS1113/4/5 позволяют использовать их в широком спектре устройств, где не требуется высокая частота преобразования и достаточно 16 бит разрешающей способности. При помощи ADS1115 можно спроектировать малогабаритный малоинерционный измерительный прибор с высокой разрешающей способностью.

Для сложных и ответственных применений можно использовать интеллектуальные АЦП, например семейство 16-разрядных АЦП ADS1146/7/8. Особенность этого семейства АЦП — наличие в его составе маломощного программируемого усилителя, настраиваемого цифрового фильтра, внутреннего источника опорного напряжения и источника тактовых импульсов. Благодаря встроенной системе термокомпенсации, а также функции измерения температуры, ADS1146/7/8 (рис. 2) представляет собой решение, удобное для использования в приложениях, где такая функция необходима. Встроенный настраиваемый источник тока позволяет поддерживать функцию детектирования неисправности первичного преобразователя (Sensor Burnout Detection). Внутренняя программируемая система формирования смещения дает возможность задавать смещение термокомпенсации.

Семейство АЦП ADS114x имеет настраиваемые входы/выходы общего назначения,

системный монитор (System Monitor), позволяющий следить за различными параметрами системы (напряжение питания, внешний источник опорного напряжения, температура), настраиваемый цифровой фильтр, а также регистры для калибровки (OFC — регистр калибровки смещения, FSC — регистр калибровки усиления). ADS1146/47/48 доступны в малогабаритных корпусах TSSOP.

### Вторая группа АЦП

Ко второй группе можно отнести  $\Delta\Sigma$ -АЦП с высокой разрешающей способностью и низкой частотой дискретизации. Такие АЦП, по сути, являются системами сбора данных на кристалле.

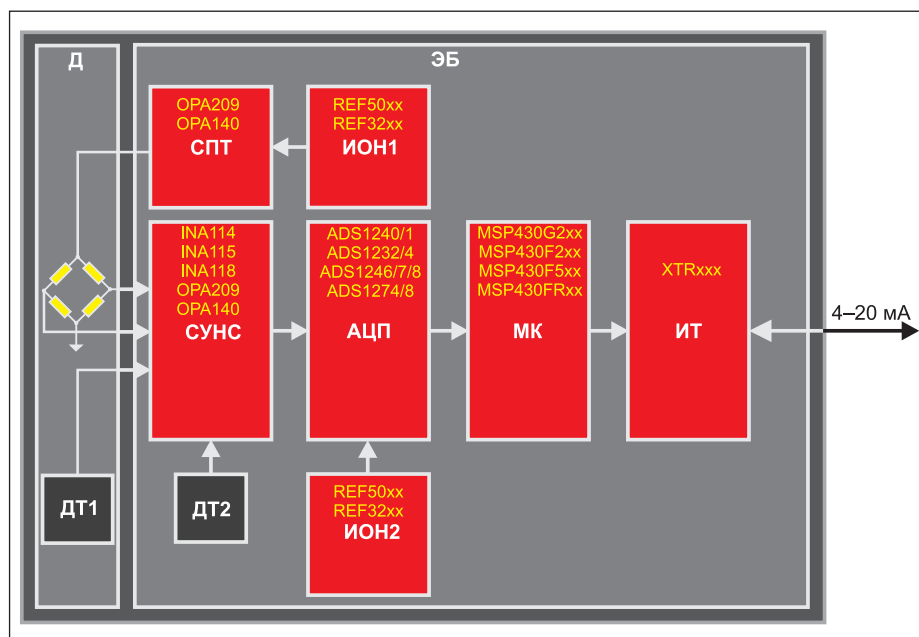


Рис. 3. Упрощенная структурная схема датчика с токовым выходным сигналом: Д — тензорезистивный датчик физической величины; ЭБ — электронный блок; ДТ — датчик температуры; СУНС — схема усиления и нормирования сигнала; СПТ — система формирования питания тензометрического датчика; ИОН — источник опорного напряжения; ИТ — источник тока

Таблица 1. 16-разрядные  $\Delta\Sigma$ -АЦП

Наименование	Разрешение, бит	Количество преобразований/с	Потребляемая мощность, мВт	Внутренний PGA	Количество каналов	Источник опорного напряжения	Интерфейс
ADS1113	16	До 860	0,36	Нет	1	Внутренний	I <sup>2</sup> C
ADS1114	16	До 860	0,36	Да	1	Внутренний	I <sup>2</sup> C
ADS1115	16	До 860	0,36	Да	4	Внутренний	I <sup>2</sup> C
ADS1146	16	До 2К	2,3	Да	1	Внешний	SPI
ADS1147	16	До 2К	2,3	Да	3	Внутренний/внешний	SPI
ADS1148	16	До 2К	2,3	Да	7	Внутренний/внешний	SPI

Они имеют устройства мультиплексирования аналоговых сигналов, устройства выборки/хранения, программируемые усилители и цифровые фильтры, источники тока и устройства мониторинга различных системных параметров. Измерительные приборы, в составе которых используются системы на кристалле с низкой частотой дискретизации, — это прецизионные промышленные измерительные приборы высоких классов точности, например промышленные датчики температуры, давления, силы, перемещения. Кроме того, такие устройства работают в достаточно жестких климатических условиях ( $-40... +80$  °C).

Основные параметры при выборе АЦП этой группы: максимальная разрешающая способность и временная стабильность метрологических характеристик. Если прибор имеет ограничение по энергопотреблению, важным параметром также является потребляемая мощность АЦП.

Такие АЦП позволяют обходиться без внешних схем усиления и нормирования сигнала при помощи операционных усилителей, так как имеют в своем составе пре-

Таблица 2. 24-разрядные  $\Delta\Sigma$ -АЦП

Наименование	Разрешение, бит	Количество преобразований/с	Количество входов	Потребляемая мощность, мВт	Количество эффективных разрядов	Интерфейс
ADS1240	24	15	4/8	0,6	21	SPI
ADS1234	24	80	4	4,3	23,5	SPI
ADS1231	24	80	1	5	20,1	SPI
ADS1211	24	16 K	4	27,5	23	SPI
ADS1256	24	30K	8	36	23	SPI
ADS1217	24	780	8	0,8	22	SPI
ADS1246	24	2K	1	2,3	21,8	SPI
ADS1258	24	125K	16	42	21,6	SPI

цизионные маломощные внутренние программируемые усилители (PGA). Инженеры-разработчики таких систем на кристалле рекомендуют по возможности использовать именно PGA, чтобы не ухудшать метрологические характеристики АЦП из-за влияния внешних операционных усилителей. Лишь в частных случаях необходимо использовать внешние схемы усиления и нормирования сигнала, а также внешние фильтры, построенные на операционных усилителях.

Серии АЦП ADS121x, ADS124x подходят для приложений, критичных к энергопотреблению. ADS1240/41 — это прецизионный  $\Delta\Sigma$ -АЦП компании TI с разрешающей способностью 24 бит и эффективным разрешением свыше 21 бит (табл. 2). В составе этого АЦП есть программируемый усилитель (PGA), источник тока для детектирования неисправности первичного преобразователя (BURNOUT CURRENT SOURCES) и ЦАП для формирования смещения входного сигнала. Это достаточно простой с точки зрения функциональности АЦП, но с небольшим значением потребляемой мощности (0,6 мВт) и высокой эффективной разрешающей способностью (свыше 21 бит).

Если же ограничений по потреблению нет, то разработчику проще подбирать элементную базу для достижения тех или иных метрологических характеристик. В качестве АЦП можно использовать серии ADS125x или ADS123x. ADS1232/4 — это 24-разрядный  $\Delta\Sigma$ -АЦП, спроектированный специально для работы с тензометрическими мостами. В своем составе он имеет датчик температуры,  $\Delta\Sigma$ -модулятор 3-го порядка и цифровой фильтр 4-го порядка. Эффективная разрешающая способность достигает 23,5 бит при напряжении питания 5 В.

### Третья группа АЦП

К третьей группе можно отнести прецизионные  $\Delta\Sigma$ -АЦП с высокой частотой дискретизации. Это АЦП со скоростью преобразования до 10М преобразований/с и разрешающей способностью от 16 разрядов (табл. 3). Такие АЦП используются в приборах для ис-

Таблица 3. Высокоскоростные  $\Delta\Sigma$ -АЦП

Наименование	Разрешение, бит	Количество преобразований/с	Потребляемая мощность, мВт	Количество каналов	Источник опорного напряжения	Интерфейс
ADS1610	16	10M	960	1	Внешний	Параллельный
ADS1605	16	5M	560	1	Внутренний/внешний	Параллельный
ADS1602	16	2,5M	530	1	Внутренний/внешний	SPI
ADS1158	16	125K	42	16	Внешний	SPI
ADS1675	24	4M	575	1	Внешний	LVDS, SPI
ADS1672	24	625K	350	1	Внешний	LVDS, SPI
ADS1274/8	24	144K	530/275	8/4	Внешний	SPI

следования качества электросетей, в тестовом оборудовании, акустических измерительных приборах, сонарах, приборах для измерения вибрации и т. д. В основном в таких устройствах применяется внешнее питание, поэтому речи о компромиссе производительность/энергопотребление не идет.

Основными критериями при выборе АЦП для приборов этой группы являются скорость и функциональность преобразователя. При выборе аналоговых компонентов следует обратить внимание на метрологические и скоростные характеристики (полоса пропускания).

Компания TI выпускает широкий спектр прецизионных АЦП с частотой дискретизации до 10М преобразований/с, например высокоскоростной 16-битный  $\Delta\Sigma$ -АЦП ADS1610. Для приборов, работающих в акустическом диапазоне, стоит отметить АЦП ADS1274/8. Особенностью этого АЦП является то, что  $\Delta\Sigma$ -модулятор установлен в каждом канале, а максимальная частота дискретизации АЦП составляет 144 кГц.

В большинстве случаев разработчики АЦП рекомендуют использовать внутренние программируемые усилители, встроенные в АЦП. Но встречаются частные случаи, когда необходимо использовать внешние усилительные и нормирующие тракты, а также реализовывать схемы фильтрации.

Для недорогих массовых измерительных приборов, построенных на 16-разрядных  $\Delta\Sigma$ -АЦП, часто рекомендуется применение операционных или инструментальных усилителей, стабилизированных прерыванием. Это связано с тем, что ОУ, стабилизированные прерыванием, имеют неплохие метрологические характеристики, а по уровню потребления и стоимости они соответствуют недорогим 16-разрядным АЦП с низким потреблением. Для построения входных аналоговых трактов совместно с АЦП такого типа можно применять МДП ОУ ОРА330, ОРА333 или инструментальный усилитель INA333. Их преимущества — малый дрейф (порядка 0,02 мкВ/°C — ОРА330), малое напряжение смещения (порядка 8 мкВ — ОРА330), малое потребление (порядка 25 мкА — ОРА330),

а также низкие шумовые показатели на низких частотах. Особенность этих усилителей в том, что благодаря технологии ZerØ-Drift они имеют хорошую временную и температурную стабильность, а также способны уменьшить влияние трудно фильтруемого низкочастотного фликкер-шума. Благодаря диапазону напряжения питания (1,8–5,5 В) и малому потреблению их удобно использовать в приложениях с батарейным питанием.

Подбирая операционные усилители для работы с 24-разрядными низкоскоростными АЦП, помимо метрологических характеристик, таких как напряжение, смещение, температурный и временной дрейф напряжения смещения, КОСС, коэффициент усиления при разомкнутой обратной связи, необходимо внимательно анализировать и шумовые характеристики ОУ (табл. 4). Для усиления дифференциального сигнала с тензометрического преобразователя в малопотребляющих приложениях подходит инструментальный усилитель INA118. INA118 имеет широкий диапазон питаний (до  $\pm 18$  В), максимальное (пиковое) значение шума 0,25 мкВ от пика до пика, а среднее значение собственных шумов у него равно 11 нВ/Гц, при этом потребление составляет 0,35 мА. На сегодня INA118 является самым популярным инструментальным усилителем, особенно в приложениях,

Таблица 4. Характеристики ОУ

Наименование	Напряжение питания, В	Исс /канал, мА	СВЧ, МГц	Температурный дрейф напряжения смещения, мкВ/°C	Уровень шума, нВ/√Гц (1 кГц)	Напряжение смещения, мкВ	КОСС, дБ
ORA140	$\pm 18, +36$	2	11	0,35	5,1	11	140
ORA171	$\pm 18, +36$	0,595	3	0,3	14	3	120
ORA209	$\pm 18, +36$	2,5	18	1	2,2	18	130
ORA211	4,5–3,6	4,5	45	0,15	1,1	45	114
ORA228	5–3,6	3,8	33	0,1	3	33	120
ORA320	1,8–5,5	1,6	20	1,5	8,5	20	114
ORA330	1,8–5,5	0,035	0,35	0,02	55	0,35	115
ORA333	1,8–5,5	0,025	0,35	0,02	55	0,35	106

где работа проводится с дифференциальным сигналом и высокой синфазной составляющей, так как этот инструментальный усилитель имеет высокий КОСС (до 125 дБ).

Для организации питания тензометрического датчика тоже необходимы специализированные схемы источника тока или источника напряжения, в зависимости от типа используемого датчика. Очевидно, что для организации малощумящего питания тензометрического преобразователя, кроме малощумящих ОУ, необходимо использовать и малощумящие источники опорного напряжения, например ИОН серий REF50xx или REF32xx.

При выборе ОУ для работы с высокочастотными прецизионными АЦП, помимо

метрологических характеристик, нужно обращать внимание на полосу пропускания. Например, ОРА211 (45 МГц), ОРА320 (20 МГц), ОРА171 (3 МГц), ОРА140 (11 МГц).

### Заключение

Очевидно, что при проектировании каждого конкретного устройства инженер-разработчик должен внимательно изучить особенности измеряемого сигнала и учесть требования к выбору компонентов для построения аналоговых цепей, источников тока, источников напряжения и АЦП. При выборе того или иного компонента следует внимательно изучать техническую документацию,

доступную на сайте производителя. В статье была рассмотрена лишь мизерная часть компонентов для прецизионных измерений от компании TI, но, изучив номенклатуру выпускаемой продукции, можно убедиться в том, что выбор электронных компонентов огромен, что позволяет реализовать любое современное приложение. Это значит, что на основе электронных компонентов компании TI можно полностью спроектировать измерительный прибор с практически любыми метрологическими характеристиками. ■

### Литература

1. <http://www.ti.com/ww/ru/>