

Аналого-цифровые преобразователи общего применения фирмы National Semiconductor

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) — это электронные устройства, преобразующие входные аналоговые сигналы электрических величин (в большинстве случаев — напряжения), в выходные цифровые сигналы в виде, пригодном для последующей их обработки в микропроцессорных и других цифровых устройствах. Фирма National Semiconductor является одним из ведущих мировых производителей интегральных микросхем (ИМС) АЦП различных типов [1], номенклатура которых насчитывает более 100 наименований. В данной статье мы рассмотрим ИМС АЦП общего применения (по терминологии фирмы — «стандартные») с максимальной частотой преобразования до 1,5 МГц, сочетающие в себе весьма высокие характеристики при сравнительно небольшой стоимости.

**Геннадий Штрапенин,
к. ф.-м. н.**

gshtrapenin@electron.usurt.ru

Основные электрические параметры современных АЦП [2] можно условно разделить на статические, характеризующие величины входных и выходных сигналов, разрешающую способность преобразователя, погрешности преобразования постоянного напряжения, температурную нестабильность и другие, а также динамические, определяющие время и максимальную частоту преобразования, шумовые и другие характеристики. Важную роль играют также конструктивные параметры АЦП — архитектура, количество каналов, тип выходного интерфейса, наличие внутреннего тактового генератора и источника опорного напряжения, варианты исполнения корпуса. В технических описаниях и руководствах по применению интегральных АЦП обычно используются следующие основные электрические параметры в порядке значимости [3]:

1. Разрядность (Resolution) — измеряется в битах и определяет максимальное число кодовых комбинаций на выходе АЦП, характеризуя его с точки зрения достижимой точности преобразования. Используется также обратная величина — разрешающая способность, измеряемая в процентах или децибелах. Например, 12-разрядный АЦП имеет разрешающую способность 1/4096 или 0,0245% от полной шкалы, что соответствует -72,2 дБ.
2. Время преобразования (Conversion Time) — измеряется в микросекундах и определяет интервал времени от начала преобразования до появления на выходе АЦП устойчивого кода выходного сигнала. Для некоторых АЦП это время зависит от величины входного сигнала.
3. Максимальная частота преобразования (Speed) — измеряется в мегагерцах (или MSPS) и определяет наибольшую частоту, с которой возможно преобразование входного сигнала, при условии, что величины погрешностей не выходят из заданных пределов.
4. Число каналов.
5. Диапазон напряжения входного сигнала (V_{in}).

6. Максимальное (MaxSupply Voltage) и минимальное (MinSupply Voltage) напряжения питания.
7. Максимальная рассеиваемая мощность (Power Dissipation).
8. Интегральная нелинейность (INL) измеряется в процентах от полной шкалы или единицах младшего разряда — EMP (Least Significant Bit — LSB) и характеризует отклонение реальной характеристики преобразования от идеальной во всем диапазоне входного сигнала.
9. Дифференциальная нелинейность (DNL) так же, как и INL, измеряется в процентах или EMP (LSB) и характеризует разность напряжений между данным и средним значением кванта преобразования.
10. Отношение «сигнал/шум» (Signal to Noise Ratio — SNR) измеряется в децибелах и равно отношению среднеквадратического значения входного сигнала к среднеквадратическому значению шума, который определяется как сумма всех остальных спектральных составляющих, включая гармоники, но исключая постоянную составляющую, для входного сигнала (-1 дБ) от полной шкалы. Для идеального АЦП $SNR = (6,02N + 1,76)$ дБ, где N — разрядность АЦП. Например, для идеального 12-разрядного АЦП $SNR = 74$ дБ.
11. Суммарный коэффициент гармоник (Total Harmonic Distortion — THD) — это отношение среднеквадратического значения суммы высших гармоник к среднеквадратическому значению основной гармоники, выраженное в децибелах. Определяется по формуле: $THD = 10 \log[(V_2^2 + V_3^2 + \dots)/V_1^2]$.
12. Отношение «сигнал/(шум + искажения)» (Signal to Noise and Distortion — SINAD) также измеряется в децибелах, (шум + искажения) — это среднеквадратическое значение суммы всех составляющих сигнала вплоть до 1/2 частоты дискретизации, кроме основной гармоники и постоянной составляющей. Определяется по формуле $SINAD = 10 \log[1/(10^{-SNR/10} + 10^{THD/10})]$.

Таблица. Основные параметры аналого-цифровых преобразователей общего применения National Semiconductor

Тип	Разрядность	Интерфейс	Время преобразования		Интегральная нелинейность	Число каналов	Внутренний ИОН	Напряжение питания		Температурный диапазон	Примечание
			мкс	EMR				В	мВт		
			макс	макс				тип	макс		
ADC08161	8	Параллельный	0,56	±1	1	Да	5,0	100	1		
ADC10461	10	Параллельный	0,90	±1	1	Нет	5,0	235	1		
ADC10462	10	Параллельный	0,90	±1	2	Нет	5,0	235	1		
ADC10464	10	Параллельный	0,90	±1	4	Нет	5,0	235	1		
ADC12048	12	Параллельный	3,60	±1	8	Нет	5,0	35	1	Микроконтроллерное управление	
ADC78H89	12	Последовательный	2,00	±1	7	Да	2,7–5,25	1,5–8,3	1	Отдельное питание цифровой части	
ADC78H90	12	Последовательный	2,00	±1	8	Да	2,7–5,25	1,5–8,3	1	То же	
ADCS7476	12	Последовательный	1,00	±0,4	1	Да	2,7–5,25	2,0–10	1*		
ADCS7477	10	Последовательный	1,00	±0,4	1	Да	2,7–5,25	2,0–10	1*		
ADCS7478	8	Последовательный	1,00	±0,4	1	Да	2,7–5,25	2,0–10	1*		
ADC081S021	8	Последовательный	5,00	±0,05	1	Да	2,7–5,25	2,2–10	1	Корпус SOT-23-6	
ADC082S051	8	Последовательный	2,00	±0,13	2	Да	2,7–5,25	2,2–7,1	1	Корпус MSOP-8	
ADC102S051	10	Последовательный	2,00	±0,15	2	Да	2,7–5,25	2,7–8,6	1	То же	
ADC122S051	12	Последовательный	2,00	±0,5	2	Да	2,7–5,25	3,0–10	1	То же	
ADC084S101	8	Последовательный	1,00	±0,13	4	Да	2,7–5,25	3,2–9,6	1	Корпус MSOP-10	
ADC104S101	10	Последовательный	1,00	±0,4	4	Да	2,7–5,25	3,9–11	1	То же	
ADC124S101	12	Последовательный	1,00	±0,64	4	Да	2,7–5,25	4,3–13	1	То же	

* расширенный от -40 С до +125 °С

13. Эффективное число разрядов (ENOB) — другой метод расчета отношения «сигнал/шум». $ENOB = (SINAD - 1,76)/6,02$, где SINAD — реальное значение отношения «сигнал/(шум + искажения)» в децибелах для конкретного АЦП.

14. Диапазон рабочих температур (Tmin, Tmax). Принята следующая система обозначения температурных диапазонов: С (Commercial) — от 0 до +70 °С, I (Industrial) — от -25 или -40 до +85 °С и M (Military) — от -55 до +125 °С.

Основная часть интегральных АЦП общего применения National Semiconductor (www.national.com) выполнены по архитектуре последовательного приближения (Successive Approximation), являющейся наиболее оптимальной для построения многоразрядных АЦП со средним быстродействием. В основе работы таких преобразователей лежит последовательное сравнение измеряемой величины с 1/2, 1/4, 1/8 и т. д. от ее возможного максимального значения, что позволяет выполнить весь процесс преобразования за N (число разрядов) последовательных шагов. Статическая погрешность АЦП последовательного приближения определяется, в основном, используемым в нем ЦАП и может быть очень малой, что дает возможность получить высокую разрешающую способность. Структурная схема АЦП такого типа и принципы ее работы приведены в отдельной работе [3].

Более скоростные преобразователи используют архитектуру параллельно-последовательных АЦП, в частности, двухступенчатого, состоящего из двух быстродействующих параллельных АЦП, сумма разрядности которых равна требуемой, ЦАП и аналогового сумматора. Первый АЦП осуществляет грубое преобразование сигнала в старшие разряды выходного кода. Цифровые сигналы с выхода первого АЦП поступают на выходной регистр и одновременно на вход ЦАП. В сумматоре происходит вычитание выходного напряжения

ЦАП из входного напряжения схемы, а остаток поступает на вход второго АЦП, опорное напряжение которого в соответствующее число раз меньше, чем у первого АЦП. Этот остаток, преобразованный во втором АЦП в цифровую форму, представляет младшие разряды выходного кода. Отметим, что из-за задержки сигнала в процессе первого преобразования входное напряжение АЦП необходимо поддерживать постоянным в течение всего процесса, для чего используются устройства выборки-хранения (УВХ). Разновидностью параллельно-последовательной архитектуры являются также многотактные и конвейерные АЦП [3].

Важную часть аналого-цифрового преобразователя составляет выходной цифровой интерфейс, обеспечивающий связь АЦП с приемниками цифровых сигналов. Последовательный интерфейс медленнее параллельного, однако он использует меньшее количество линий, что позволяет сократить число выводов ИМС. Некоторые АЦП последовательного приближения имеют интерфейсы обоих типов.

Фирма National Semiconductor использует определенную систему для обозначения интегральных АЦП общего применения. АЦП ранних выпусков обозначались следующим образом:

ADCNNXXM,

где ADC — аналого-цифровой преобразователь, NN — разрядность (08, 10, 12, 14), XX — номер разработки (одна или две цифры), M — количество каналов (1, 2, 4, 8). Пример обозначения 10-разрядного двухканального АЦП: ADC10062. Отдельные модификации АЦП содержали в обозначении букву H или L, соответствующую более или менее скоростному варианту исполнения данной микросхемы, например ADC12L032 с временем преобразования 8,8 мкс и ADC12H032 с временем преобразования 5,5 мкс.

Система соблюдалась не строго и позже была изменена на более информативную, в которой обозначение АЦП общего применения

после аббревиатуры ADC содержит пять групп символов в виде:

ADCNNMISSR,

где NN соответствует разрядности (08, 10, 12); M — числу каналов (1, 2, 4, 8); I — типу интерфейса (S — последовательный интерфейс SPI, I — последовательный интерфейс I²C, отсутствие символа — параллельный); SS — максимальной частоте преобразования (02 — 200 кГц, 05 — 500 кГц, 10 — 1 МГц и т. д.); R — использованию внутреннего или внешнего источника опорного напряжения (ИОН) и однополярному или двухполярному питанию (1 — внутренний ИОН, однополярное питание; 2 — внутренний ИОН, двухполярное питание; 3 — внутренний и внешний ИОН, однополярное питание; 4 — внутренний и внешний ИОН, двухполярное питание; 5 — внешний ИОН, однополярное питание; 6 — внешний ИОН, двухполярное питание). Пример обозначения 10-разрядного двухканального АЦП с внутренним ИОН, однополярным питанием, последовательным интерфейсом SPI и максимальной частотой преобразования 1 МГц: ADC102S101.

Следует отметить, что и данная система строго не соблюдается, в частности, АЦП, являющиеся аналогами микросхем других фирм, сохраняют оригинальную нумерацию, например ADCS7476/7/8, соответствующий AD7476/7/8 Analog Devices.

И, наконец, ряд ИМС АЦП National Semiconductor сохраняет традиционную для фирмы систему обозначений в виде LMNNxxx, где NN соответствует разрядности АЦП, а следующие цифры — номеру разработки.

Перейдем далее к рассмотрению наиболее интересных доступных АЦП National Semiconductor (их основные параметры приведены в таблице).

Из 8-разрядных преобразователей с параллельным интерфейсом ранних выпусков типичным является ADC08161 со временем преобразования 560 нс, использующий архитектуру двухступенчатого АЦП со схемой выборки — хранения. Это усовершенствованный вариант существующего ранее ADC08061, в отличие от которого у ADC08161 имеется внутренний источник опорного напряжения на ширине запрещенной зоны. АЦП выпускается в 20-выводном корпусе SOIC с расположением и назначением выводов, приведенном на рис. 1.

ADC08161 не требует внешней синхронизации и осуществляет аналого-цифровое преобразование в полном диапазоне амплитуд входных сигналов с частотами от нуля до 300 кГц. Область применения ADC08161, определяемая его параметрами, достаточно широка — это всевозможные микропроцессорные системы, измерительные приборы, среднескоростные системы сбора данных и др.

Заслуживает внимания семейство 10-разрядных 1-, 2-, 4-канальных АЦП с типовым временем преобразования 600 нс, параллельным интерфейсом и устройством выборки-хранения ADC10461/2/4, являющееся усовершенствованным вариантом популярной серии ADC10061/2/4. Преобразователи используют двухступенчатую архитектуру (6р + 4р) и обес-

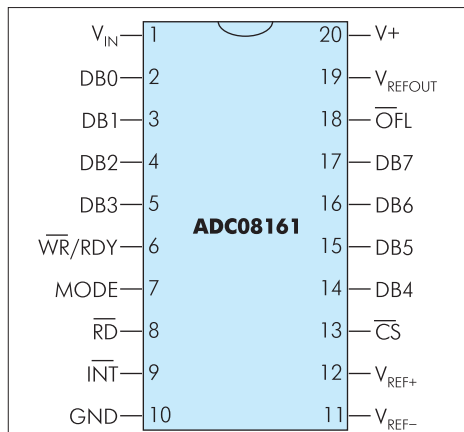
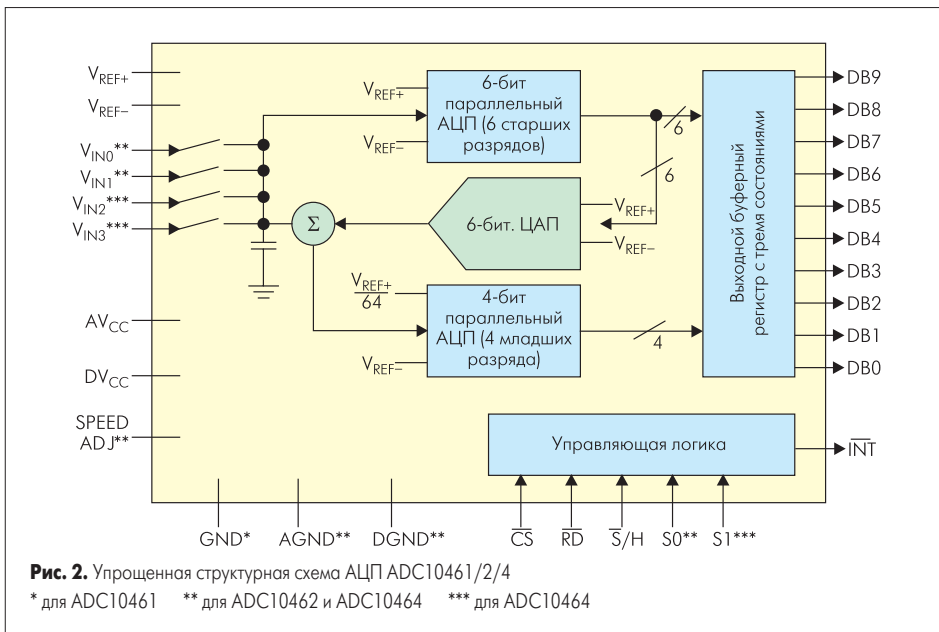


Рис. 1. Расположение и назначение выводов АЦП ADC08161

V_{IN} — аналоговый вход с диапазоном напряжения входного сигнала от 0 до напряжения питания V+; DB0–DB7 — цифровые выходы с тремя состояниями; WR/RDY — выход с открытым стоком индикации записи и чтения; MODE — цифровой вход управления режимами; низкий уровень — чтение, высокий — запись; RD — цифровой вход чтения, низкий уровень разрешает появление на выходах DB цифровых данных; INT — цифровой выход индикации конца преобразования, появление низкого уровня указывает на то, что преобразование закончено, и выходные данные зафиксированы; GND — минус источника питания, при работе с внешним ИОН соединяется с одним из выводов V_{REF+}; V_{REF+} V_{REF-} — входы внешнего опорного напряжения в диапазоне от 0 до напряжения питания V+; CS — цифровой вход «выбор кристалла», активный уровень низкий; OFL (Overflow Output) — выход сигнала переполнения, используется для каскадирования АЦП; V_{REFOUT} — выход внутреннего ИОН 2,5 В, шунтируется конденсатором 220 мкФ; V+ — напряжение питания, номинальное значение 5 В. Для корректной работы микросхемы вывод V+ следует зашунтировать танталовым керамическим конденсатором емкостью 10 мкФ и 0,1 мкФ соответственно.

печивают весьма высокие параметры по искажениям и шумам: THD = -60 дБ и SNR = 58 дБ. В микросхемах ADC10462/4 имеется режим «скоростного» преобразования, включаемый присоединением к выводу Speed Adj внешнего резистора, при этом время преобразования снижается до 350 нс при незначительном снижении точности. Упрощенная структурная схема АЦП ADC10461/2/4 приведена на рис. 2.

Преобразователи ADC10462 и ADC10464 содержат соответственно 2- и 4-канальные входные мультиплексоры, управляемые логическими уровнями на контактах S0 и S1. Для работы АЦП требуется внешний ИОН с напряжением от 0 до напряжения питания (+5 В), которое в типовой схеме включения подается на соединенные вместе выводы DV_{CC} и AV_{CC}. Для устойчивой работы преобразователя положительные выводы питания и опорного напряжения рекомендуется соединять с общим проводом, к которому подключены выводы GND, AGND и DGND через параллельно соединенные электролитические и ке-



рамические конденсаторы емкостью 10 мкФ и 0,1 мкФ соответственно.

АЦП ADC10461/2/4 выпускаются в корпусах SOIC20/24/28 и могут быть использованы в различных устройствах обработки сигналов.

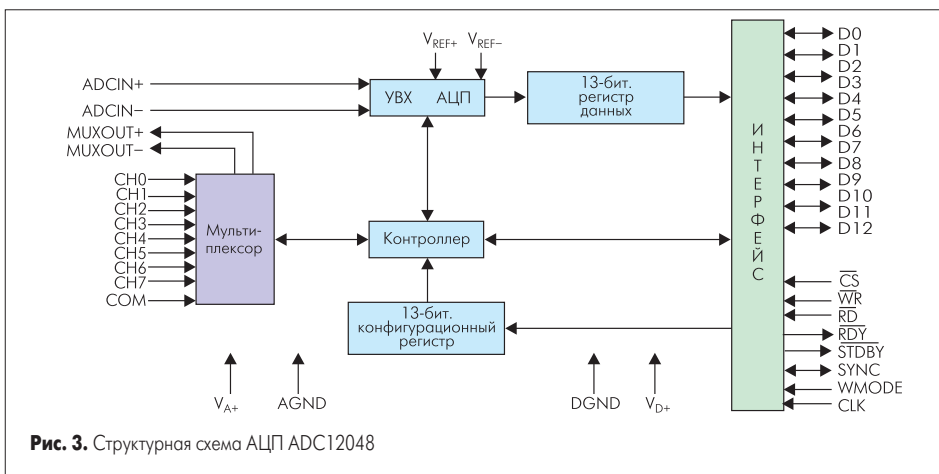
Рассмотрение АЦП с параллельным интерфейсом завершим микросхемой ADC12048 — 12-разрядным со знаком 8-канальным АЦП с устройством выборки-хранения с типовым временем преобразования 3,6 мс. ADC12048 управляется собственным микроконтроллером, обеспечивающим программное управление режимами его работы, в частности, программируемая разрядность шины передачи данных (8/13 бит) позволяет сравнительно несложно организовать совместную работу АЦП с большинством популярных микроконтроллеров и микропроцессоров различных семейств. Предусмотрены также программная установка времени сбора данных и преобразования, циклы автокалибровки и дежурный режим с пониженным энергопотреблением. Структурная схема АЦП ADC12048 приведена на рис. 3.

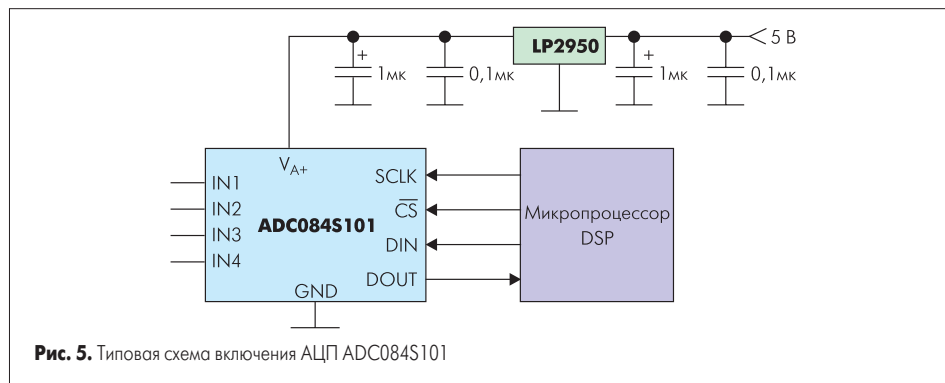
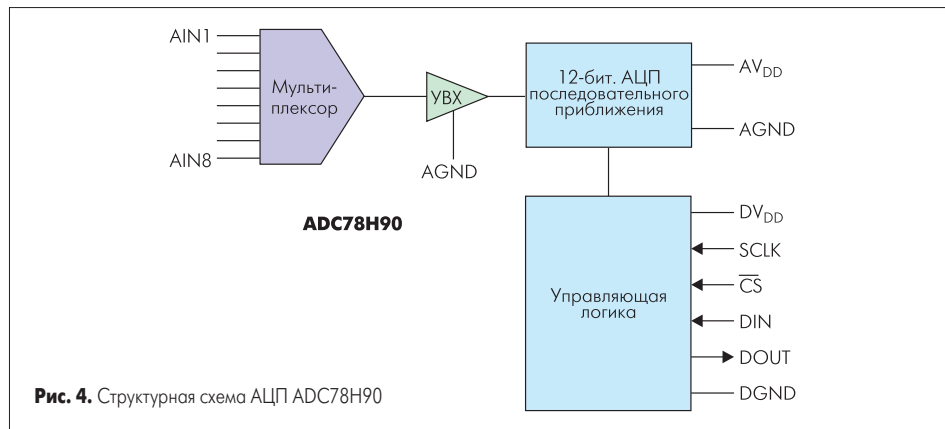
Режимы работы преобразователя определяются состоянием 13-разрядного конфигурационного регистра. Для работы микросхемы необходима подача на вывод CLC тактового сигнала с частотой от 0,05 до 12 МГц и опорное напряжение V_{REF+} - V_{REF-} величиной от 1 В до V_{A+} (+5 В). АЦП ADC12048 выпускаются в 44-выводных корпусах PLCC и PQFP.

АЦП National Semiconductor последних выпусков имеют, как правило, последовательный интерфейс. Рассмотрим семейство 7-8-канальных 12-разрядных АЦП ADC78H89/90. Выполненные в архитектуре АЦП последовательного приближения, они обеспечивают время и максимальную частоту преобразования 2 мкс и 500 кГц соответственно. Структурная схема АЦП ADC78H90 приведена на рис. 4.

Сигнал с входного 8-канального мультиплексора поступает на устройство выборки хранения и далее на АЦП, управление работой которого осуществляется через логическое устройство, обеспечивающее также и выдачу выходного кода в нескольких стандартах последовательных интерфейсов: SPI, QSPI, MICROWARE и других. Отметим, что ADC78H89/90 имеют отдельные выводы питания аналоговой AV_{DD} - AGND и цифровой DV_{DD} - DGND части, которые в обычной схеме включения могут быть объединены. Микросхемы работоспособны при напряжении AV_{DD} от +2,7 до +5,25 В и DV_{DD} от +2,7 до AV_{DD} и при этом потребляют мощность 1,5 мВт и 8,3 мВт соответственно (в дежурном режиме 0,3 мВт и 0,5 мВт). ADC78H89/90 выпускаются в 16-выводном корпусе TSSOP и рассчитаны на работу в диапазоне температур от -40 до +85 °С.

Семейство 8-, 10-, 12-разрядных одноканальных АЦП ADCS7478/716 с максимальной частотой преобразования 1 МГц, также выполнен-





ное в архитектуре АЦП последовательного приближения, выпускается в 6-выводных корпусах SOT-23. Эти АЦП отличаются повышенной точностью (интегральная нелинейность преобразования INL не превышает 0,4 ЕМР) и расширенным (от -40 до $+125$ °С) диапазоном рабочих температур. Микросхемы способны функционировать при напряжении питания от $+2,7$ до $+5,25$ В и потребляют мощность 2 и 10 мВт соответственно (в дежурном режиме при высоком уровне на выводе CS — не более 5 мкВт). Максимально возможное входное напряжение ADCS7478/7/6 равно напряжению питания, которое используется как опорное. Двухпроводной последовательный интерфейс совместим со стандартами SPI, MICROWARE и др. АЦП ADCS7478/7/6 можно использовать для замены AD7478/7/6 фирмы Analog Devices.

Последние разработки National Semiconductor в области АЦП общего применения — семейство КМОП 1-, 2-, 4-канальных 8-, 10-, 12-разрядных АЦП с последовательным интерфейсом с максимальными частотами преобразования 200 кГц, 500 кГц и 1 МГц в малогабаритных корпусах SOT-23, MSOP и LLP (в табл. 1 приведены выборочно). АЦП выполнены в архитектуре последовательного приближения и отличаются весьма высокими показателями точности и энергопотребления (в дежурном режиме 0,3 мВт и менее), что способствует их применению в портативных устройствах с автономным питанием. Типовая схема включения четырехканального АЦП с максимальной

частотой преобразования 1 МГц ADC084S101 приведена на рис. 5.

Поскольку эти АЦП используют источник питания в качестве ИОН, трехвыводной интегральный стабилизатор с низким падением напряжения LP2950 [4] обеспечивает стабильность питающего и опорного напряжений, конденсаторы в цепи питания необходимы для снижения уровня шумов. Следует отметить, что благодаря низкому энергопотреблению АЦП данного семейства, для повышения точности преобразования возможно и целесообразно использовать в качестве источника их питания прецизионные источники опорного напряжения, например LM136 [1]. Для сокращения времени проектирования устройств с АЦП фирма National Semiconductor предлагает для ряда моделей специальные демонстрационные платы.

Литература

1. Linear/Mixed-Signal Designer's Guide Summer 2002. National Semiconductor. 2002.
2. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: Справочник. СПб.: «КОРОНА принт», М.: «Альтекс-А». 2003.
3. Волович Г. И. Аналого-цифровые преобразователи. www.gaw.ru
4. Штрапенин Г. Л. Интегральные стабилизаторы с малым падением напряжения фирмы National Semiconductor // Компоненты и технологии. 2004. № 7.