

АЦП НА ГОЛОДНОЙ ДИЕТЕ КАК СНИЗИТЬ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ВХОДНЫХ КАСКАДОВ ПРИБОРОВ СБОРА ДАННЫХ

М. Шейкин max.shaking@gmail.com

Одна из актуальных тенденций в электронике – снижение энергопотребления, чему способствуют все более жесткие стандарты экономии энергии и распространение портативных устройств с батарейным питанием, в том числе систем сбора данных, беспроводных сенсоров и датчиков. Современная элементная база позволяет проектировать экономичные входные каскады таких устройств как на основе отдельных аналого-цифровых преобразователей, так и с применением интегрированных решений.

Экономичность компонентов перестала быть приятным дополнением к производительности и функциональности. Провода питания превращаются в рудимент, от которого стараются избавиться или, по крайней мере, реже применять, а продолжительная автономная работа от батарей – одно из преимуществ в конкурентной борьбе на рынке.

Особенно важно экономить энергию там, где она вырабатывается долго и неэффективно. Речь идет о беспроводных системах сбора данных – датчиках и сенсорах, использующих энергию солнца, перепадов температур, вибрации и т.д. Такие устройства применяются в составе систем "умного дома", охранной сигнализации, мониторинга состояния машин, конструкций и т.д. Они должны быть предельно экономичными, поскольку иной раз счет идет не на милли-, а на микроамперы потребляемого тока. Требование полностью автономной работы – не прихоть: зачастую сложно подвести линии питания ко всем датчикам, а замена батарей во множестве устройств может занимать неприемлемо много времени. Кроме этого, доступ к датчикам может быть затруднен.

Еще один пример изделий, экономичность которых критична для выживания на рынке – носимые медицинские приборы и фитнес-трекеры. Время их автономной работы может исчисляться не сутками,

а неделями, при этом жесткие требования к размерам и весу не позволяют применять аккумуляторы большой емкости. Поэтому снижение энергопотребления компонентов стало одним из глобальных направлений современной электронной промышленности.

Рассмотрим несколько способов снижения энергопотребления входных каскадов с АЦП на примерах компонентов из каталогов ведущих производителей.

СНИЖАЕМ НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ

Первый очевидный способ уменьшить энергопотребление схемы – снизить напряжение питания. Производители компонентов не отстают от требований рынка, предлагая множество компонентов, в том числе АЦП, рассчитанные на пониженное питание 2,5, 1,8 и даже 1,2 В. Выгода очевидна: снижение напряжения питания с 3,3 до 1,8 В позволяет сэкономить около 50% потребляемой от батареи мощности.

Например, компания Texas Instruments недавно представила микросхемы Burr Brown ADS7040/41/42, претендующие на получение статуса самого экономичного АЦП в мире. При частоте дискретизации 1 Квыб/с они потребляют менее микроватта энергии. Микросхемы, выпускаемые в миниатюрных корпусах X2QFN (1,5×1,5 мм) и VSSOP (2,3×2,3 мм), можно применять в мобильных устройствах, датчиках,

измерительной технике, носимых медицинских приборах. Среди недостатков этой микросхемы следует отметить двойное питание: 1,65–3,6 В аналоговое и 1,8–3,6 В цифровое.

Подобного недостатка лишены микросхемы АЦП серии ADS7866 (12 бит, два канала), ADS7867 (10 бит) и ADS7868 (8 бит). Им требуется лишь один источник питания, причем достаточно напряжения 1,2 В, а потребляемая мощность при этом составляет 0,22 мВт. Максимальная частота дискретизации 100, 120 и 140 Квыб/с для 12-, 10- и 8-битных АЦП соответственно при напряжении питания до 1,6 В и вдвое большая – для 1,6–3,6 В (см. таблицу).

БОЛЬШЕ СПИМ – МЕНЬШЕ ЕДИМ

Практически любая микросхема АЦП, предназначенная для применения в мобильных устройствах с батарейным питанием, предусматривает переход в режим сна со сверхнизким потреблением. Благодаря такой возможности, можно включать и отключать АЦП только на время одного преобразования с частотой, например, несколько

герц – этого вполне достаточно для датчиков температуры, влажности и прочих случаев бытового применения.

Для того чтобы перевести микросхему в режим сна, нужно подать сигнал на выделенный вход либо записать определенную команду в управляющий регистр АЦП. Оба способа требуют дополнительных линий связи между контроллером и АЦП: отдельной двоичной команды либо входа DATA IN последовательного интерфейса. Интересное решение, рассчитанное на уменьшение количества выводов, реализовано в АЦП AD7476A, который выпускается в шестивыводном корпусе SC-70.

AD7476A – 12-битный АЦП последовательного приближения с частотой дискретизации до 1 Мвыб/с и напряжением питания 2,35–5,25 В. Управление режимами работы АЦП выполняется с помощью сигнала CS, стандартная функция которого – запуск очередного преобразования (Conversion Start). В обычном режиме работы АЦП преобразование запускается задним фронтом сигнала CS и длится 16 тактов. Для перехода в режим сна достаточно подать на вход CS логическую "1" между

Характеристики некоторых современных АЦП с низким потреблением

Производитель	Тип	Наименование	Разрядность	Частота дискретизации, отсч/с, макс.	Отношение сигнал/шум, дБ	Среднеквадратичный уровень шума, мкВ	Напряжение питания, В	Рассеиваемая мощность, мВт, макс.	Потребляемый ток, макс/в режиме сна, мкА	Диапазон рабочих температур, °С	Корпус
Texas Instruments	Последовательного пригл.	ADS7866	12	200 К	–	–	1,2–3,6	1,39	–/0,3	–40...85	SOT-23, 6 выв.
		ADS7877	10	240 К							
		ADS7878	8	280 К							
		ADS7040	8	1000 К	49		1,65–3,6	0,55	185/–	–40...125	X2QFN 8 выв.
		ADS7041	10		61			0,6	200/–		
		ADS7042	12		70			0,78	260/–		
Analog Devices		AD7091	12		69	2,09–5,25	–	367/0,34		LFCSP 8 выв.	
Texas Instruments	Сигма-дельта	ADS1244	24	15	–	2	1,8–5,25	0,27	90/1,3	–40...85	MSOP-10
Linear Technologies		LTC2484	24	15		0,6	2,7–5,5		160/1		DFN 10 выв.
Analog Devices		AD7788	16	16,6		1,5	2,5–5,25	0,225	75/1	–40...105	MSOP 10 выв.
		AD7790	12	120		1,1		12,5	75/1		

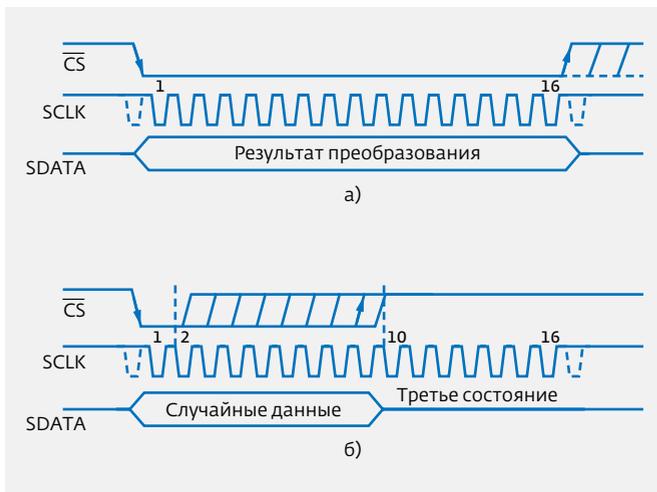


Рис.1. Управление АЦП AD7476: рабочий режим (а); переход в режим сна (б)

вторым и десятым тактами цикла преобразования. "Пробуждение" АЦП выполняется так же, при этом поступающие с линии SDATA данные не несут полезной информации, их нужно игнорировать (рис.1). Похожим способом обеспечивается управление и другими продуктами Analog Devices, например, более экономичным АЦП AD7091 (3,6 мкВт при напряжении питания 3 В и частоте дискретизации 1 Мвыб/с).

ПОДБИРАЕМ ЧАСТОТЫ РАБОТЫ

На примере АЦП AD7476 рассмотрим зависимость среднего потребления АЦП от частот тактового сигнала и дискретизации.

Пусть "подопытный" АЦП выполняет преобразование с фиксированной частотой, переходя после каждого цикла в режим сна. Средняя мощность, потребляемая микросхемой, определяется соотношением длительности рабочего цикла и времени, в течение которого АЦП находится в спящем режиме. Для того чтобы снизить потребляемую мощность, необходимо минимизировать продолжительность рабочего цикла, которая зависит от частоты следования тактовых импульсов. Соответственно, чем выше тактовая частота, тем экономичнее функционирует АЦП (рис.2).

Зафиксировав тактовую частоту на отметке 20 МГц, будем изменять частоту дискретизации, как и прежде, переводя АЦП в режим сна после каждого преобразования. По мере повышения скорости оцифровки увеличивается потребляемая мощность, причем нелинейно (рис.3, нижний график). По аналогии с описанным выше экспериментом нетрудно догадаться, что рост

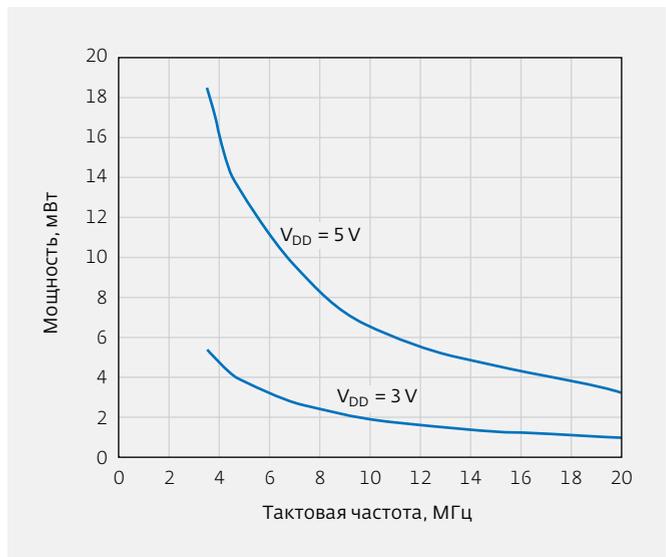


Рис.2. Зависимость потребления АЦП AD7476 от частоты тактовых импульсов при скорости преобразования 100 Квыб/с

потребления объясняется сокращением времени "отдыха".

Наконец, для наглядности откажемся переводить АЦП в режим сна (рис.3, верхний график). Результаты говорят сами за себя: потребляемая мощность значительно повысилась, причем ее зависимость от частоты преобразования весьма незначительна.

Более совершенный способ экономии энергии, реализованный в АЦП AD7466, обеспечивает автоматическое переключение в режим сна после каждого рабочего цикла, исключая тем самым необходимость в "фальшивых" преобразованиях для такого перехода (рис.4). AD7466 – 12-битный АЦП последовательного приближения, предназначенный для мобильных устройств с батарейным питанием. Максимальная скорость преобразования – 200 Квыб/с, напряжение питания – 1,6–3,6 В. AD7466 выпускается в шестивыводном корпусе SOT-23. В режиме сна AD7466 потребляет всего 8 нА. Столь простое и эффективное решение лучше всего подходит для малогабаритных устройств сбора данных.

Описанные выше АЦП последовательного приближения пользуются популярностью среди разработчиков благодаря низкой стоимости, высокой скорости и экономичности по сравнению с дельта-сигма-преобразователями. Тем не менее методы экономии потребляемой мощности применяются и в современных дельта-сигма АЦП, которые по уровню энергопотребления могут сравниться

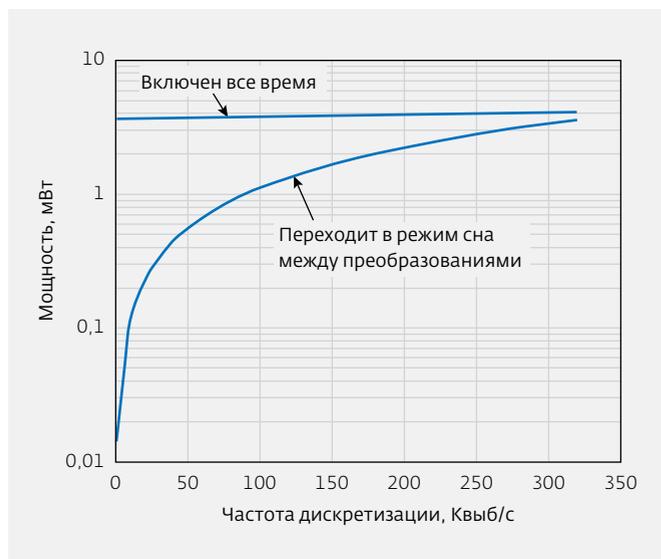


Рис.3. Зависимость потребляемой мощности АЦП AD7476 от частоты дискретизации

с некоторыми АЦП последовательного приближения. Так, точный 24-битный дельта-сигма-преобразователь АЦП Burr Brown ADS1244, потребляющий 270 мкВт в нормальном режиме работы, может функционировать в режиме однократного преобразования, переключаясь в режим сна с энергопотреблением менее 1 мкВт. Переход в режим сна и обратно управляется сигналом тактовой частоты: постоянный высокий уровень означает режим сна, пробуждение выполняется по первому заднему фронту тактового сигнала.

Из дополнительных особенностей этого АЦП стоит отметить автокалибровку, которая может выполняться в любой момент, в том числе сразу после пробуждения. Это полезно, если предполагаются длительные периоды в режиме сна, например, в автономных сенсорных системах. ADS1244 предусматривает отдельные входы цифрового и аналогового питания, но их можно соединить и запитать АЦП от одного источника 3 В.

ИЗБАВЛЯЕМСЯ ОТ БУФЕРОВ

Для согласования входного сигнала с рабочим диапазоном АЦП обычно применяются операционные усилители, которым требуются место на плате и дополнительное питание. Тенденция всеобщей интеграции не обошла стороной и АЦП: в каталогах производителей компонентов нетрудно найти АЦП со встроенными согласующими каскадами.

Так, входные цепи дельта-сигма АЦП LTC2484 и LTC2481 компании Linear Technologies, рассчитанные на прямое подключение высокоимпедансных

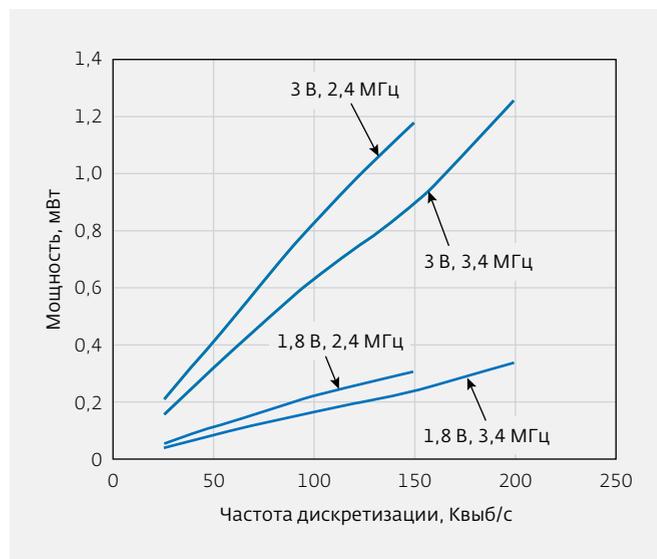


Рис.4. Зависимость потребления АЦП AD7466 от скорости преобразования, тактовой частоты и напряжения питания

источников сигнала, подавляют дифференциальные токи, вызывающие ошибки измерения.

LTC2484 и LTC2481 – соответственно 24- и 16-битные дельта-сигма АЦП – предназначены для схем с низким энергопотреблением. В обычном режиме работы им достаточно 480 мкВт. Для снижения потребляемой мощности возможна работа в режиме однократного преобразования с режимом сна, при этом уровень энергопотребления падает на один-два порядка.

Дельта-сигма АЦП со встроенными буферными усилителями AD7790 (16 бит), AD7791 (24 бита, рис.5) и AD7787 (два канала, 24 бита) компании Analog Devices отличаются встроенным тактовым генератором с коэффициентами деления 1,2, 4 и 8. АЦП этой серии требуется источник питания с напряжением от 2,5 до 5,25 В. Встроенные усилители повышают ток потребления: например, AD7790 с отключенными усилителями требуется 65 мкА, а с включенными – 130 мкА.

Благодаря высокой разрядности и низкому уровню шумов дельта-сигма АЦП их можно применять для преобразования неусиленных сигналов. Точность оцифровки при этом сравнима с каскадом из усилителя и АЦП последовательного приближения. При этом небольшая скорость работы сигма-дельта АЦП не снижает производительность маломощных систем сбора данных, так как частота опроса датчиков в них редко превышает предельные для АЦП этого типа значения – десятки раз в секунду.

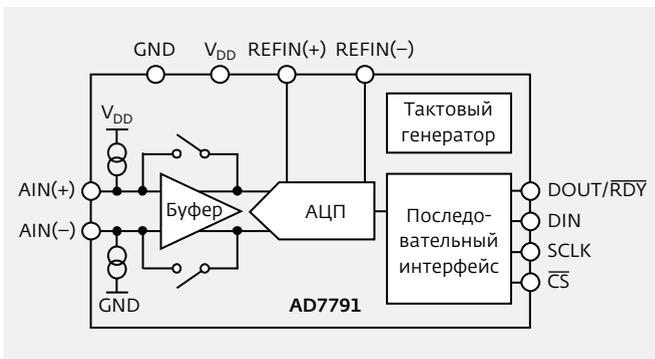


Рис.5. Структура АЦП AD7791 со встроенным входным буфером

Поясним на примере. Допустим, нужно оцифровывать сигнал амплитудой до 20 мВ с датчика, включенного в измерительный мост. Используя 12-разрядный АЦП последовательного приближения с опорным напряжением 3 В, получим шаг квантования 0,73 мВ. Нетрудно рассчитать число уровней квантования нашего сигнала: $20/0,73 \approx 27$ (5 разрядов). Столь низкая точность оцифровки неудовлетворительна. Для повышения разрешения входного каскада усилим сигнал в 100 раз. В этом случае его амплитуда сравнится с входным диапазоном АЦП, и количество уровней квантования сигнала будет равно 2739 (точность – 7,3 мкВ).

Аналогичную точность оцифровки можно обеспечить, если применить маломушумящий 20-разрядный АЦП. Отношение сигнал-шум современных сигма-дельта АЦП зачастую превышает 100 дБ, поэтому для сигнала амплитудой 20 мВ свободными от шума (т.е. значащими) будут 12–16 разрядов. Таким образом, 20-разрядный сигма-дельта АЦП может заменить каскад из 12-битного АЦП и операционного усилителя, при этом уровень потребления каскада будет ниже.

ПЕРЕХОДИМ НА ИНТЕГРИРОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ

В состав современных микроконтроллеров и систем на кристалле, на основе которых создаются устройства сбора данных, как правило, входят АЦП. В большинстве случаев встроенные АЦП – не высшего класса, но среди многообразия компонентов высокой степени интеграции можно найти и исключения. Так, микроконтроллеры серии MSP430F2x/4x из популярной линейки MSP430 на основе 16-битного RISC-ядра компании Texas Instruments оснащены полноценными 16- и 24-битными сигма-дельта АЦП с дифференциальным входом и регулируемым усилителем. Кроме внешних сигналов, на АЦП могут подаваться сигналы с внутренних датчиков

температуры, также он может применяться для контроля напряжения питания. Микроконтроллеры этой серии могут содержать до семи 16-битных или до трех 24-битных независимых АЦП.

Серия MSP4302x/4x позиционируется как решение средней производительности в линейке MSP430. Их нельзя назвать самыми экономичными микроконтроллерами: при максимальной рабочей частоте 16 МГц энергопотребление составляет 200–400 мкА/МГц.

С точки зрения энергосбережения наибольший интерес представляет линейка микроконтроллеров с напряжением питания 0,9–1,5 В. В настоящее время серия состоит лишь из трех микросхем – MSP430L091, MSP430C091 и MSP430L092, которые различаются объемом и структурой памяти. Их возможности достаточно скромные: аналоговый интерфейс включает четырехканальные восьмибитные АЦП и ЦАП, компаратор, источник опорного напряжения и блок отслеживания напряжения питания. Флеш-память и последовательные интерфейсы отсутствуют.

Производитель подчеркивает, что микроконтроллеры этой серии полностью работоспособны при 0,9 В и не нуждаются в дополнительном питании отдельных узлов более высоким напряжением. Единственное ограничение низковольтного питания – рабочая частота: при напряжении питания до 1,3 В она ограничена 1 МГц, при более высоком напряжении – 4 МГц. В первом случае (при напряжении 1,3 В) потребление в рабочем режиме составляет 45 мкА/МГц, в режиме ожидания – 6 мкА, в режиме глубокого сна – 3 мкА.

Стоит обратить внимание на новую серию MSP430FR, оснащенную ферроэлектрической энергонезависимой памятью (FRAM). Этот тип памяти характеризуется примерно вдвое меньшим энергопотреблением и на порядки большей скоростью записи по сравнению с флеш-памятью. Благодаря этому удалось снизить потребление микроконтроллеров: при напряжении питания от 1,8 до 3,6 В их потребление составляет 100–126 мкА/МГц, в то время как другие серии микроконтроллеров MSP430 с флеш-памятью потребляют не менее 200 мкА/МГц.

Таким образом, серию MSP430FR можно считать оптимальным решением по производительности и экономии в семействе MSP430. Важно также, что малое время записи во FRAM позволяет сокращать период активной работы микроконтроллера и экономить энергию батарей.

Еще один пример интегрированного экономичного решения – микроконтроллеры серии RL78

компании Renesas с 16-битным CISC-ядром и богатыми возможностями работы с аналоговыми сигналами. Младшая серия RL78/G10 отличается самым низким энергопотреблением – 46 мкА/МГц, при этом микроконтроллеры этой серии оснащаются 10-битными АЦП (до семи каналов), а также компараторами. Ядро микроконтроллера работает на частоте до 20 МГц. Интересная особенность микроконтроллеров RL78 – возможность работы периферии при спящем ядре. Например, микросхема может быть запрограммирована на периодические измерения, инициируемые таймером реального времени, без пробуждения ядра. Полученные АЦП данные сравниваются с установленными значениями в компараторе, и в случае выхода за их пределы ядро пробуждается, чтобы выполнить заданные действия. Такая работа в "полусне" существенно снижает энергопотребление системы.

* * *

Современная элементная база предоставляет инженеру множество различных решений, позволяющих

эффективно снизить энергопотребление входных каскадов устройств сбора данных. Выбор экономичного АЦП последовательного приближения, точного сигма-дельта АЦП либо микроконтроллера с интегрированной аналоговой периферией зависит от требований к элементной базе, ее доступности, массогабаритным характеристикам изделия и множества других факторов.

ИСТОЧНИКИ

- **Steve Logan.** These Power-Saving Techniques Promote Longer ADC System Life. – [electronicdesign.com](http://www.electronicdesign.com).
- **Mercedes Casamayor, Claire Croke.** How to Save Power in Battery Applications Using the Power-Down Mode in an ADC. – [analog.com](http://www.analog.com).
- **Stephen Evanczuk.** Microwatt ADCs Enable Energy-Harvesting Wireless Sensor Designs. – <http://www.digikey.com>.
- Документация на описанные в статье компоненты с сайтов [ti.com](http://www.ti.com), [analog.com](http://www.analog.com), [linear.com](http://www.linear.com), [renesas.com](http://www.renesas.com).