

Как заставить встроенный в микроконтроллер АЦП поразрядного уравнивания работать с разрешением дельта-сигма-АЦП

Алексей Кузьминов (Москва)

В статье описано, как с помощью известного метода передискретизации и последующего усреднения результатов измерений, применённого к АЦП поразрядного уравнивания (ПУ), можно повысить его разрешающую способность. Поясняются аппаратные и программные средства и приводятся результаты испытаний 16-разрядного АЦП ПУ, встроенного в микроконтроллер C8051F067 (Silicon Labs), и 24-разрядного дельта-сигма-АЦП ADS1210 (Texas Instruments).

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что метод передискретизации и последующего усреднения (oversampling and averaging) позволяет повысить разрешающую способность АЦП на несколько разрядов. Автор задался вопросом: может ли такой метод, применённый к 16-разрядному АЦП ПУ, встроенному в микроконтроллер C8051F067 компании Silicon Labs, повысить его разрешение настолько, чтобы он мог конкурировать с 24-разрядным дельта-сигма (ДС) АЦП ADS1210 компании Texas Instruments?

Разработанный компанией Burr-Brown ещё в 1996 г. 24-разрядный ДС АЦП ADS1210 до сих пор пользуется заслуженной популярностью. Подробные характеристики ADS1210 можно найти в описании [1]. В числе основных достоинств прибора следует упомянуть наличие встроенного ИОН, достаточно малую нелинейность (0,0015%), диапазон входного аналогового сигнала до 5 В, автоматическую калибровку смещения нуля и полной шкалы (и системную калибровку), а также специальный режим, позволяющий получить до 20 реальных разрядов точности при частоте оцифровки до 1 кГц.

Абсолютная погрешность, которую удалось получить автору от АЦП ADS1210, составляет 0,1...0,2 мВ при из-

мерении аналогового сигнала в диапазоне от 0 до 5 В при условии, что перед АЦП стоит аналоговый коммутатор на восемь каналов и минимальное время (Δt) получения всех восьми напряжений составляет не более 0,1...0,2 с. Если, например, напряжение составляет 2 В, то его удаётся измерить с точностью до 1–2 единиц четвёртого десятичного разряда после запятой (например, 2,0001...2,0002 В).

К сожалению, после того как компания Burr-Brown вошла в состав компании Texas Instruments, цены на ADS1210 в России повысились в несколько раз. Если раньше его можно было приобрести за \$10...12, то сейчас менее чем за \$30...35 этот АЦП не продаётся.

Около трёх лет назад автор приобрёл относительно новый восьми-канальный 24-разрядный ДС АЦП ADS1256 той же компании Texas Instruments с максимальной частотой дискретизации до 30 кГц стоимостью около \$10 (сейчас его можно купить за \$15...20) и решил проверить, сможет ли он обеспечить такую же точность, как и ADS1210, при той же скорости вывода результатов преобразования.

Для этого ADS1256 был помещён в тепличные условия, т.е. в качестве ИОН была применена микросхема ADR421,

с выхода которой напряжение $V_{ref} = 2,5$ В подавалось на вход опорного напряжения ADS1256, а напряжения на все его аналоговые входы (AIN1–AIN8) поступали через ОУ (см. рис. 1).

Эксперимент показал, что, несмотря на относительно высокую частоту дискретизации в 30 кГц (у ADS1210 – 16 кГц), АЦП ADS1256 может обеспечить 1–2 единицы четвёртого десятичного знака после запятой при частоте вывода не более 2 Гц. При увеличении частоты до 5...10 Гц ($\Delta t = 0,1...0,2$ с) четвёртый знак изменялся уже на 5–6 единиц. Таким образом, попытка заменить ADS1210 на ADS1256 не удалась, а проблема высокой стоимости микросхемы АЦП осталась.

МЕТОД ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО УСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЦП

Просматривая архив статей, автор наткнулся на давнишний материал AN118 компании Silicon Labs [2] Improving ADC Resolution by Oversampling and Averaging («Увеличение разрешения АЦП с помощью передискретизации и усреднения») за 2003 г. Основная идея метода (использующегося и в ДС АЦП) заключается в следующем. Согласно теореме Котельникова, если стационарный сигнал, имеющий спектр в полосе частот от 0 до F_{MAX} , оцифровать с помощью АЦП с частотой $F_{АЦП}$, в два раза превышающей F_{MAX} , т.е. при $F_{АЦП} = 2F_{MAX}$, сигнал может быть восстановлен без потерь по этим отсчётам. Если сигнал зашумлен (например, белым шумом), то при подобной частоте дискретизации спектр шума будет находиться в полосе частот от 0 до F_{MAX} и, складываясь с полезным сигналом, будет его искажать. Однако если проводить оцифровку сигнала, например, с учетверённой частотой, т.е. $F = 4F_{АЦП} = 8F_{MAX}$, то спектр шума распределится уже в полосе частот от 0 до $4F_{MAX}$ и его амплитуда в полосе частот от 0 до F_{MAX} уменьшится в четыре раза, а среднеквадратичное значение – в

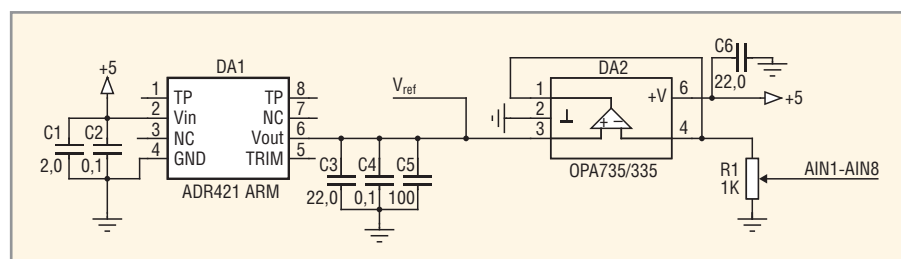


Рис. 1. Схема подачи напряжений для тестирования АЦП ADS1256

два раза, что равносильно увеличению отношения сигнал/шум на 6 дБ, т.к. спектральная плотность полезного сигнала останется прежней. Если после оцифровки сигнала произвести операцию НЧ-фильтрации с частотой среза F_{MAX} , то можно повысить разрешающую способность на один двоичный разряд.

В одноразрядном ДС АЦП частота передискретизации увеличена в сотни и даже тысячи раз, добавлен специально сформированный белый шум и применены довольно мощные цифровые фильтры. Однако n -разрядный АЦП ПУ можно заставить работать подобным образом, если увеличить частоту передискретизации, а вместо цифрового фильтра применить усреднение выборок, которое по сути является цифровым низкочастотным фильтром, а шум, например, тепловой, всегда присутствует в сигнале.

Какими же свойствами должен обладать АЦП ПУ, работающий в режиме передискретизации и усреднения, чтобы конкурировать с многоразрядным (например, 24-разрядным) ДС АЦП? Во-первых, он должен быть хотя бы 16-разрядным и, во-вторых, достаточно скоростным*. Что касается усреднения, то в микроконтроллере, работающем с АЦП, должно быть достаточно оперативной памяти, чтобы хранить большой объём выборок для усреднения. И, наконец, цена прибора должна быть как минимум в несколько раз ниже, чем цена ADS1210.

У автора уже имелся микроконтроллер C8051F067 компании Silicon Labs, который идеально подходил для подобного эксперимента. Встроенные в этот микроконтроллер два независимых 16-разрядных АЦП могут выполнять до 1 млн. преобразований в секунду с возможностью производить калибровку смещения нуля и полной шкалы. Микроконтроллер оснащён 4 Кб встроенной оперативной памяти XRAM (точнее, 4352 байт) и аппаратным блоком DMA (ПДП), который способен записывать результаты, полученные АЦП, непосредственно в ОЗУ без участия процессора. Микроконтроллер C8051F067 может работать на частоте до 25 МГц и выполнять до 25 млн. операций в секунду (MIPS). Его цена составляет около \$10...12, что в три раза меньше цены ADS1210.

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Автору уже приходилось работать с микроконтроллером C8051F067 при его сопряжении с компьютером по интерфейсу RS232 [3–5]. Схема сопряжения осталась без изменений; были добавлены микросхема ИОН (DA3), операционный усилитель (DA4) для формирования тестируемых напряжений, подаваемых на входы АЦП (AIN0, AIN1), и стабилизатор (DA2) для питания аналоговой части микроконтроллера (см. рис. 2).

Микроконтроллер может работать в двух режимах, определяемых установкой трёхконтактной переключки P4. При замыкании контактов 1–2 (положение, обозначенное RUN) микроконтроллер работает в штатном режиме и обменивается информацией с компьютером по интерфейсу RS232 с помощью преобразователя ADM231 (DD1). В этом случае выводом RST микроконтроллера управляет линия DTR компьютера, т.е. запуск микроконтроллера осуществляется по интерфейсу RS232.

При замыкании контактов 2–3 переключки P4 (положение, обозначенное PROG) микроконтроллер работает в режиме программирования и сопряжён с интерфейсом отладчика JTAG USB, который связан с компьютером по интерфейсу USB.

Три трёхконтактные переключки P1, P2 и P3 предназначены для выбора типа микроконтроллера: это либо C8051F067 (тогда должны быть замкнуты контакты 2–3 всех переключек, – положение, обозначенное как C8051F067), либо C8051F330 (в этом случае замыкаются контакты 1–2 всех переключек – положение C8051F330). Поскольку микроконтроллер C8051F330 не имел отношения к теме исследования, он был исключён из схемы.

Операционный усилитель DA4, работающий в режиме повторителя напряжения, препятствует влиянию формирователей тестируемых напряжений (являющихся обычными потенциометрами R7 и R8) на опорное напряжение (сигнал Vr780), подаваемое на входы VREF0 и VREF1 микроконтроллера.

На вход ADC0 тестируемое напряжение (сигнал AIN0) может подаваться либо с потенциометра R7 (сигнал $V_{\text{внутр}}$), либо с внешнего разъёма (X5,

сигнал $V_{\text{внеш}}$), в зависимости от положения переключки P5. Если замкнуты контакты 1–2, то $AIN0 = V_{\text{внеш}}$, если контакты 3–2, то $AIN0 = V_{\text{внутр}}$. Стабилизатор DA1 предназначен для питания цифровой части микроконтроллера.

Для формирования точных интервалов времени измерения (Δt) в микроконтроллере используются два таймера/счётчика T0, T1 и Модуль0 Захвата/Сравнения (Capture/Compare Module 0) программируемого массива счётчиков (PCA0). Интервал времени Δt формируется следующим образом. На таймер/счётчик T0, работающий в режиме 16-разрядного таймера, подаётся системная тактовая частота (sysclk), равная частоте кварцевого резонатора 20 971 520 Гц. При поступлении 65 536 импульсов таймер T0 переполняется с частотой 20 971 520 Гц/65 536 = 320 Гц. Эта частота подаётся на таймер PCA0, а PCA Module 0 работает в режиме вывода заданной частоты (Frequency Output Mode). Входная частота (320 Гц) делится на 32, поэтому частота сигнала, выводимого через CEX0, равна 10 Гц. Этот сигнал инвертируется DD2 (см. рис. 2) и подаётся на вход таймера/счётчика T1. Таким образом, интервал времени Δt формируется последовательно: $\text{sysclk}(20\,971\,520\text{ Гц}) \rightarrow T0(20\,971\,520\text{ Гц}/65\,536 = 320\text{ Гц}) \rightarrow \text{CEX0}(320\text{ Гц}/(2 \times 16) = 10\text{ Гц}) \rightarrow \text{инвертор DD2C (см. рис. 2)} \rightarrow T1$. Читая содержимое таймера T1, можно сформировать интервал времени Δt в диапазоне от 0,1 с до 6553,6 с. Другими словами, если на T1 поступил один импульс, то прошло 0,1 с, два импульса – 0,2 с, пять импульсов – 0,5 с, и т.д. Этот интервал используется как время измерения АЦП.

Если кварцевый резонатор частотой 20 971 520 Гц найти не удастся, можно применить более распространённый резонатор на частоту 19 660 800 Гц. В этом случае с таймера T0 будет поступать частота 19 660 800/65 536=300 Гц, и для формирования частоты 10 Гц её следует поделить на 30.

Сигнал с выхода инвертора DD2C подаётся также на двухконтактный разъём X4 для вывода на осциллограф и/или частотомер, например. Питание +12 В и +5 В поступает на плату через трёхконтактный разъём X3. Для индикации включенного состояния платы используется светодиод LD1.

* Автор не упоминает о монотонности характеристики преобразования, которая недостижима в АЦП ПУ без поразрядной коррекции в процессе производства, а в одноразрядных ДС АЦП обеспечивается по умолчанию. – Прим. ред.

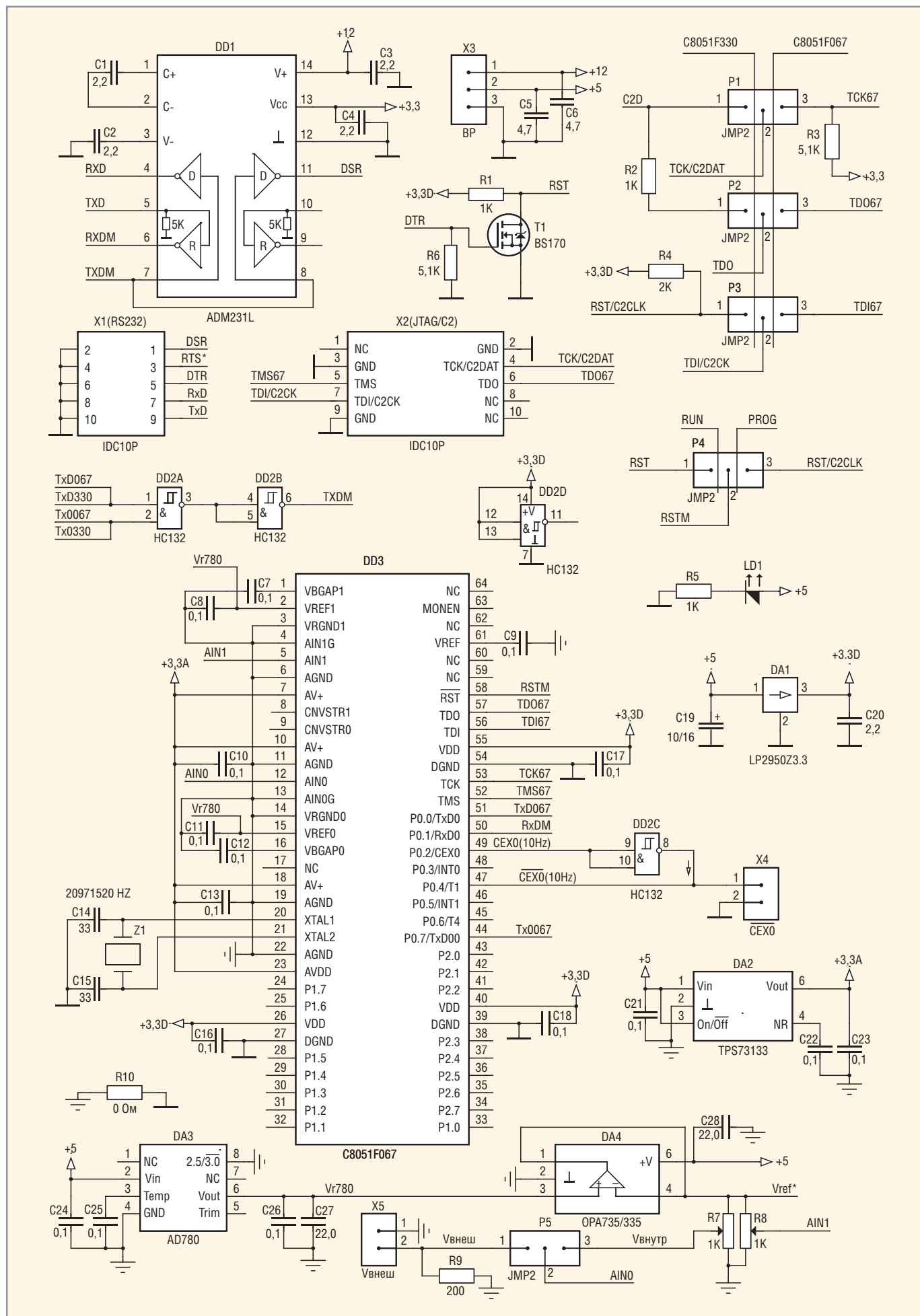


Рис. 2. Принципиальная схема тестирования АЦП микроконтроллера C8051F067

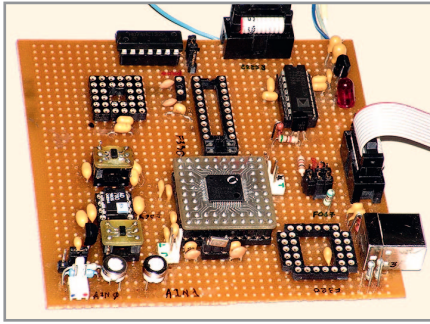


Рис. 3. Фотография макетной платы устройства для тестирования

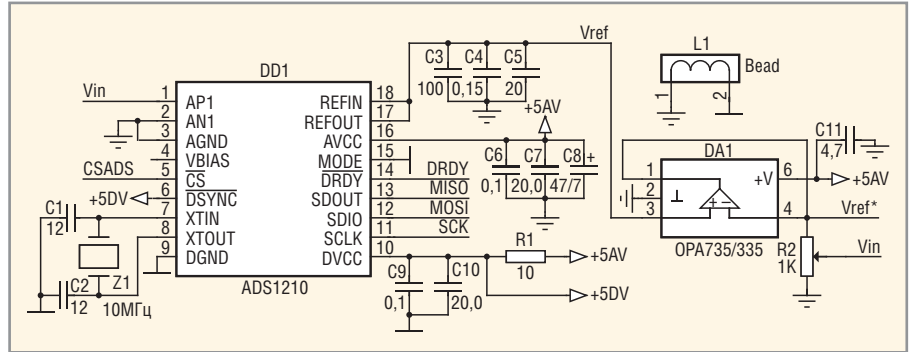


Рис. 4. Схема тестирования АЦП ADS1210

№ канала	1	2	3	4	5	6	7	8
U [В]	2.00038	2.00039	2.00037	2.00039	2.00038	2.00037	2.00039	2.00037

Рис. 5. Результаты работы АЦП ADS1210 (с внутренним ИОН)

а – выбор Δt , б – пример снимка экрана при $\Delta t = 0,1$ с

По мнению автора, схема достаточно проста и понятна в работе. Всё устройство собрано на макетной плате (см. рис. 3). Микроконтроллер распаян на плате-переходнике TQFP64-PGA64 и вставлен в панельку PGA64, распаянную на макетной плате.

Для сравнения результатов тестирования АЦП C8051F067 с результатами, полученными с помощью АЦП ADS1210, последний был включен по той же схеме аналоговой части (см. рис. 4). Это фрагмент схемы устройства сопряжения с объектом (УСО), использующегося в составе измерительно-вычислительного комплекса, предназначенного для работы на установках поверки газовых счётчиков [6]. Вместо коммутатора каналов, на макетной плате был установлен операционный усилитель (DA1) и обычный потенциометр (R2), с помощью которого можно было регулировать входное напряжение АЦП (сигнал V_{in}) в диапазоне 0...2,5 В. В качестве источника опорного напряжения был использо-

ван встроенный ИОН ADS1210 (сигнал V_{ref}). С АЦП сопрягался микроконтроллер P89LPC982. Компьютерная программа тестирования УСО была написана на языке Клариион для Windows (Clarion V.6.0) [7]. Тексты программ для компьютера и микроконтроллера можно найти в Приложении к статье на интернет-странице журнала (www.soel.ru).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Автор выполнил большое число экспериментов по тестированию АЦП микроконтроллера C8051F067, однако наиболее значимые результаты описаны ниже. Для сравнения приведены ре-

зультаты тестирования АЦП ADS1210 (см. рис. 5 и таблицу 1), включенного по схеме рис. 4 (встроенный ИОН), затем результаты тестирования АЦП микроконтроллера C8051F067, включенного по схеме рис. 2, как с внешним ИОН AD780 (рисунки 6–9, таблицы 2 и 3), так и с внутренним ИОН (см. таблицу 4). Чтобы использовать встроенный ИОН микроконтроллера C8051, были сделаны следующие изменения:

- в схеме рис. 2 ИОН AD780 (DA3) был извлечён из панельки, а выход VREF встроенного ИОН (вывод 61 DD1) был соединён со входом VREF1 (вывод 2 DD1). Таким образом, на вход операционного усили-

Таблица 1. Выходные напряжения АЦП ADS1210, В, при различных Δt

$\Delta t, c$	№ канала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	2,00038	2,00039	2,00037	2,00039	2,00038	2,00037	2,00039	2,00037
0,2	2,00037	2,00038	2,00037	2,00037	2,00038	2,00036	2,00038	2,00038
0,5	2,00038	2,00038	2,00037	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038
1,0	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038	2,00038

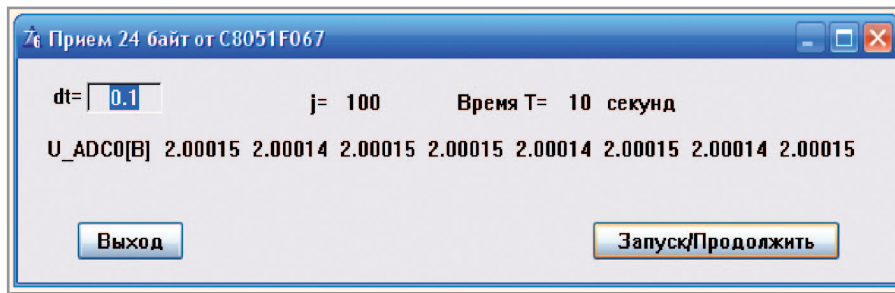


Рис. 6. Результаты работы программы In8U.clw по тестированию одного АЦП ADC0 C8051F067 (ИОН – AD780)

Снимок экрана при $\Delta t = 0,1$ с

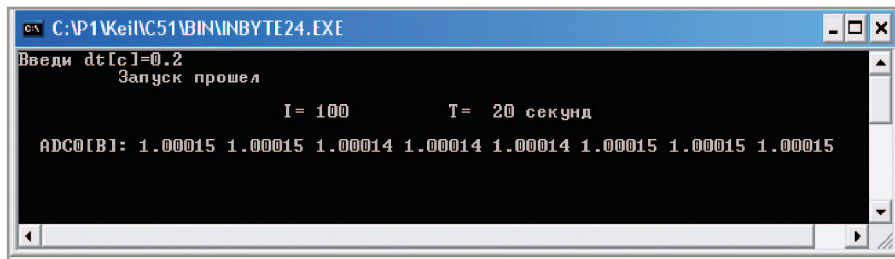


Рис. 7. Результаты работы программы INBYTE24.BAS по тестированию одного АЦП ADC0 C8051F067

$\Delta t = 0,2$ с, ИОН – AD780

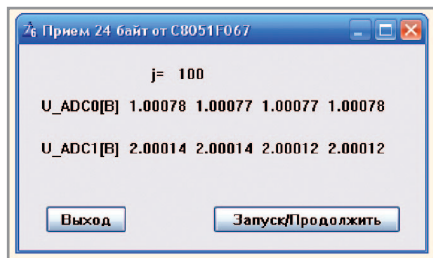


Рис. 8. Результаты работы программы In4x2U.clw по тестированию двух АЦП ADC0 и ADC1 C8051F067

$\Delta t = 0,2$ с, ИОН – AD780

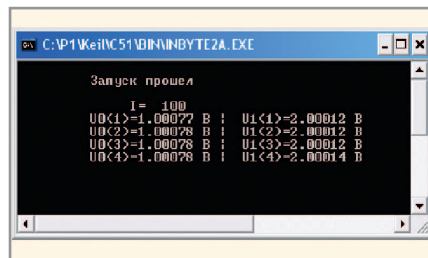


Рис. 9. Результаты работы программы INBYTE2A.BAS по тестированию двух АЦП ADC0 и ADC1 C8051F067

$\Delta t = 0,2$ с, ИОН – AD780

теля (вывод 3 DA2) было подано напряжение внутреннего ИОН микроконтроллера;

- в программе для микроконтроллера F067_ADC_DMA0.c при инициа-

лизации ADC0 значение регистра REF0CN было изменено со значения 0x02 на 0x03: REF0CN=0x03, что соответствует применению внутреннего ИОН;

Таблица 2. Выходные напряжения, В, при тестировании программой In8U.clw одного АЦП ADC0 C8051F067 (ИОН типа AD780) при различных Δt

$\Delta t, c$	№ канала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	2,00015	2,00014	2,00015	2,00015	2,00014	2,00015	2,00014	2,00015
0,2	2,00014	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00014
0,5	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00014
1,0	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015	2,00015

Таблица 3. Выходные напряжения, В, при тестировании программой In8U.clw одного АЦП ADC0 C8051F067 (встроенный ИОН) при различных Δt

$\Delta t, c$	№ канала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	2,00055	2,00056	2,00055	2,00056	2,00055	2,00055	2,00056	2,00055
0,2	2,00055	2,00056	2,00056	2,00056	2,00054	2,00054	2,00054	2,00054
0,5	2,00056	2,00055	2,00054	2,00054	2,00055	2,00055	2,00054	2,00054
1,0	2,00057	2,00055	2,00057	2,00055	2,00056	2,00055	2,00057	2,00055

- в программе для компьютера In8U.clw при расчёте напряжений изменился множитель с 3,0 на 2,5, т.е. $U[i] = 2,5 \cdot UL[i] / 524288$, поскольку напряжение внутреннего ИОН C8051F067 составляет 2,5 В.

Как ADS1210, так и один преобразователь ADC0 микроконтроллера C8051F067 тестировались при четырёх различных интервалах времени измерений (Δt), равных 0,1, 0,2, 0,5 и 1,0 с. Оба АЦП (ADC0 и ADC1) микроконтроллера C8051F067 тестировались при $\Delta t = 0,2$ с.

Необходимо отметить, что приведённые выше результаты (см. рисунки 6–9, таблицы 2 и 3) были получены при аппаратном способе расчёта времени – с помощью таймера/счётчика T1. В таблице 4 приведены показания АЦП при программном способе расчёта времени. Видно, что разброс показаний значительно меньше, несмотря на то что в качестве опорного напряжения использовался внутренний ИОН микроконтроллера C8051F067.

Приведённые в таблицах 1–4 результаты показали, что:

- при использовании внешнего ИОН AD780 для микроконтроллера C8051F067 разброс показаний его АЦП при $\Delta t = 0,1$ с составляет одну единицу пятого знака после запятой (см. рис. 6), в то время как разброс показаний АЦП ADS1210 – две единицы пятого знака после запятой (см. рис. 5б). При $\Delta t = 1,0$ с разброс показаний как для АЦП ADS1210 (последняя строка таблицы 1), так и для АЦП ADC0 микроконтроллера C8051F067 (последняя строка таблицы 2) в пятом знаке после запятой отсутствует;
- при использовании встроенного ИОН и аппаратном способе расчёта интервала времени Δt разброс показаний АЦП ADC0 микроконтроллера C8051F067 составляет не более трёх единиц пятого знака после запятой (см. таблицу 3) и почти не зависит от Δt . Это означает, что встроенный ИОН микроконтроллера имеет значительно худшие параметры, чем встроенный ИОН АЦП ADS1210;
- программный способ расчёта времени и Δt приводит к более стабильным показаниям АЦП, несмотря на то что используется встроенный ИОН микроконтроллера.

Необходимо отметить, что каждое значение преобразования АЦП микроконтроллера C8051F067, например, при $\Delta t = 1,0$ с, было получено как результат

усреднения 16 384 однократных 16-разрядных отсчетов, что, возможно, и обеспечило такие хорошие результаты.

Учитывая, что диапазон измерений напряжений АЦП ADS1210 составляет 0...5 В, т.е. несколько шире диапазона измерений напряжений АЦП микроконтроллера С8051F067, который составляет 0...3 В при использовании внешнего ИОН AD780, можно сделать вывод, что заменить АЦП ADS1210 на АЦП микроконтроллера С8051F067 вполне возможно. По стоимости такая система будет в 3–4 раза дешевле, если учесть необходимость в дополнительном микроконтроллере для обслуживания ADS1210.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод передискретизации и усреднения результатов измерений, примененный к 16-разрядному АЦП ПУ, повышает его разрешающую способность на несколько бит, что позволяет ему конкурировать с 24-разрядным ДС АЦП.

Если АЦП встроен в микроконтроллер, то он имеет дополнительные преимущества перед АЦП в виде отдельной ИС, поскольку отпадает необходимость в аппаратных и программных средствах сопряжения ИС АЦП с микроконтроллером, не требуется дополнительный микроконтроллер и упрощается конструкция всего устройства.

Не следует забывать и о двух преимуществах АЦП ПУ в микроконтроллере перед отдельным ДС АЦП. Во-первых, при наличии аналогового коммутатора, установленного на входе АЦП, в ДС

Таблица 4. Выходные напряжения, В, при тестировании программой In8U.clw одного АЦП ADSCO С8051F067 при различных Δt (встроенный ИОН); Δt определяется по прерыванию в режиме PCA0-программного таймера

$\Delta t, c$	№ канала							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	2,00032	2,00033	2,00032	2,00032	2,00032	2,00033	2,00032	2,00032
0,2	2,00032	2,00032	2,00032	2,00033	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032
0,5	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032
1,0	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032	2,00032

АЦП необходимо сделать не менее 3–4 холостых преобразований до полной установки цифрового НЧ-фильтра для гарантированной точности его работы, а в АЦП ПУ, благодаря его скорости, в этом нет необходимости. Во-вторых, в ДС АЦП постоянно изменяются смещение нуля и коэффициент усиления встроенного операционного усилителя, что вынуждает производить калибровку смещения нуля и полной шкалы на регулярной основе. В АЦП ПУ такой операционный усилитель не предусмотрен, поэтому калибровка смещения нуля и полной шкалы производится только один раз и может быть вынесена в программу на компьютере.

Неудобством использования микроконтроллера С8051F067, по мнению автора, является его корпус TQFP64 с шагом выводов 0,5 мм, что затрудняет разводку и изготовление платы и распайку корпуса. Однако если использовать методы изготовления печатных плат, описанные в [8, 9], то такую плату (например, плату-переходник TQFP64–PGA64) можно изготовить даже в домашних условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.ti.com.
2. www.silabs.com.
3. Кузьминов А. Современные аппаратные средства связи микроконтроллера с компьютером по интерфейсу RS232. Компоненты и технологии. 2006. № 3–5.
4. Кузьминов А. Современные программные средства связи микроконтроллера с компьютером по интерфейсу RS232. Компоненты и технологии. 2006. № 6–11.
5. Кузьминов А.И. Интерфейс RS232: Связь между компьютером и микроконтроллером. От DOS к Windows 98/XP. ДМК-пресс, 2006.
6. www.microcompsys.narod.ru.
7. Баррингтон Б.Б. Как создавался Кларифон. Мир ПК. 1993. № 2.
8. Кузьминов А. Изготовление устройств на печатных платах с высоким разрешением в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. 2010. № 8; 2011. № 1, 2.
9. Кузьминов А. Метод фоторепродуцирования для изготовления фотошаблона печатных плат в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. 2010. № 5–7.

