ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ БЕЗЛИЦЕНЗИОННЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КОМПОНЕНТОВ STMICROELECTRONICS. ЧАСТЬ 2

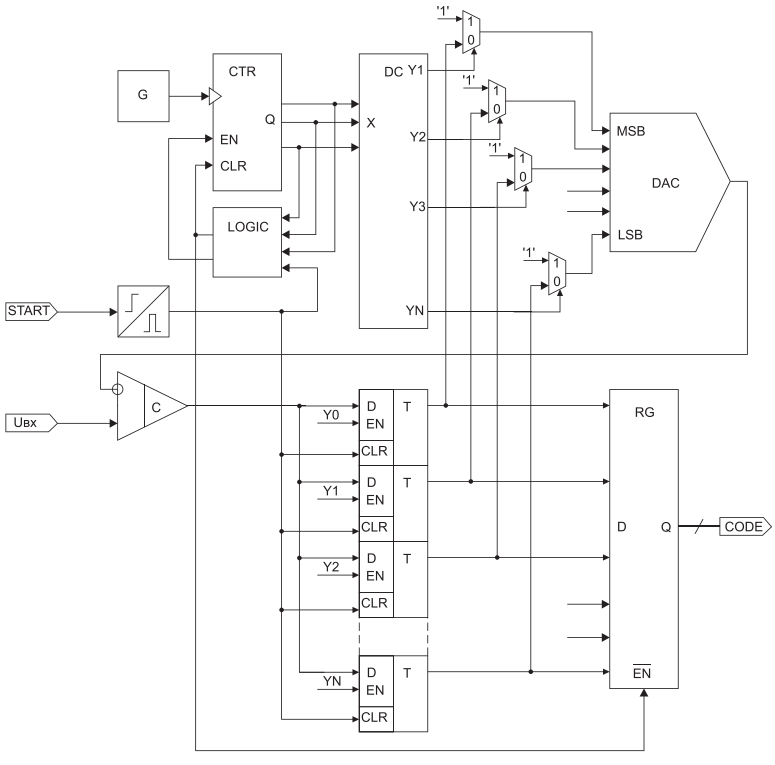
Константин Черных, ведущий инженер-конструктор ООО «ИРЗ»

Данная публикация является продолжением статьи[1], в ней пойдет речь об одном из наиболее важных устройств обработки информации — аналого-цифровом преобразователе, и в частности об АЦП компании STMicroelectronics, разработанном для применения в аппаратуре бортовых систем космических аппаратов.

Окружающий нас мир содержит огромное количество различных объектов и явлений, которые могут быть охарактеризованы набором тех или иных параметров. Большинство таких параметров носят количественный недискретный, так называемый аналоговый характер. Развитие науки и техники сделало возможным изучение физических величин, недоступных для восприятия человеческими органами чувств. В таких случаях измерение параметров изучаемых процессов возлагается на специализированную аппаратуру. При этом для анализа, оперирования, передачи и хранения количественной параметрической информации результатов измерений используется числовой вид.

Например, для приема параметрической информации, ее обработки, упорядочивания и передачи в удобном для получателя (в подавляющем большинстве случаев) цифровом виде предназначена отдельная категория устройств — системы телеметрии. В частности, телеметрические системы космических аппаратов служат для приема параметрической аналоговой информации датчиков, преобразования данной информации, как правило, в цифровой вид и передачи ее в форме телеметрических кадров для анализа на Землю посредством радиопередающих устройств либо в бортовой комплекс управления аппаратом для выработки соответствующих решений в процессе штатного функционирования.

Рис. 1. Упрощенная функциональная схема АЦП с параллельным выходом



Параметры, измеряемые телеметрическими системами, могут носить как электрический характер (напряжение, ток, сопротивление, заряд, емкость, частота сигнала и т. д.), так и неэлектрический характер (температура, сила, давление, интенсивность излучения, ускорение, величина длины перемещения, угол поворота и др.). В системах количественной оценки таких параметров сначала производится преобразование неэлектрических величин в электрические — например, температура объекта может характеризоваться сопротивлением установленного на нем терморезистора либо напряжением горячего спая термопары; величину линейного перемещения либо угла поворота можно оценить с помощью напряжения на механически связанном с объектом подвижном выводе переменного резистора, включенного по схеме резистивного делителя; интенсивность излучения можно преобразовать в напряжение с помощью схем на основе фоточувствительных полупроводниковых приборов. Кроме того, многие электрические величины также нуждаются в преобразовании для более удобного измерения. Так, напряженность магнитного поля может характеризоваться напряжением на выходе датчика Холла, емкость датчика может быть использована в схеме релаксационного генератора, частота сигнала с выхода которого может применяться для непосредственного подсчета колебаний в единицу времени. Как правило, большинство измеряемыхпараметровпреобразуетсявпропорциональную величину электрического напряжения: U = F(A), где A — некоторый аналоговый параметр, F — функция преобразования аналогового параметра в электрическое напряжение.

В процессе преобразования аналоговой информации в цифровой вид участвует одно из наиболее важных устройств — аналого-цифровой преобразователь. На вход аналого-цифрового преобразователя поступает аналоговый сигнал, на выходе пользователь получает цифровой код, пропорциональный отношению уровня входного напряжения к уровню известного опорного напряжения.

Над полученным кодом достаточно просто производить математические операции, в том числе с помощью средств вычислительной техники, сохранять его на носителях информации, передавать в другие системы, а главное — рассчитывать исходное значение измеряемого параметра с помощью обратной функции $A = F^{-1}(U)$.

АЦП различаются по своей архитектуре, в том числе АЦП параллельного типа, АЦП последовательного приближения, интегрирующие АЦП, сигма-дельта АЦП и другие.

Наиболее распространенным типом аналого-цифровых преобразователей, использующихся в телеметрических системах для измерения параметрических значений датчиков, является АЦП последовательного приближения. Упрощенная функциональная схема такого АЦП с параллельным выходом приведена на рис. 1.

Измеряемое входное напряжение поступает на неинвертирующий вход аналогового компаратора C. В начале цикла измерения АЦП подается активный уровень сигнала START, по которому происходит установка счетчика CTR в состояние, соответствующее первому коду цикла измерения. Одновременно производится обнуление триггеров T. Дешифратор DC вырабатывает сигнал логической единицы по выходу Y1, который позволяет мультиплексору подать на вход старшего разряда данных MSB (most significant bit) встроенного цифро-аналогового преобразователя DAC. Остальные разряды данных ЦАП принимают значение логического нуля, поскольку триггеры результата обнулены. Напряжение с выхода ЦАП подается на инвертирующий вход компаратора C. Если напряжение ЦАП, соответствующее в данном случае $U_{оп}/2$, больше напряжения $U_{вх}$, в первый триггер результата записывается значение логического нуля, иначе — значение логической единицы.

После этого АЦП переходит к следующему шагу преобразования. Значение счетчика CTR увеличивается на единицу. Дешифратор устанавливает сигнал логического нуля по выходу Y1 и сигнал логической единицы по выходу Y2, который позволяет мультиплексору подать на вход разряда DAC, следующего за старшим, сигнал логической единицы. Значение старшего разряда ЦАП при этом соответствует состоянию старшего разряда триггера результата. Оставшиеся младшие разряды данных ЦАП принимают значение логического нуля.

Далее алгоритм работы повторяется вплоть до последнего активного состояния счетчика. Таким образом, производится уравновешивание напряжений $U_{вх}$ и ЦАП.

По завершении последнего такта работа схемы прекращается, счетчик переходит в исходное состояние, а выходной регистр RG принимает значение кода результата из триггеров T.

Работу схемы поясняет рис. 2, на котором приводятся измеряемое напряжение $U_{вх}$, изменение напряжения на выходе ЦАП и вырабатываемый выходной код АЦП.

Достоинство АЦП данного типа заключается в том, что преобразование всегда выполняется за известное количество тактов, равное разрядности выходного кода.

Недостаток подобной схемы в том, что при изменении входного напряжения во время преобразования выходной код АЦП становится непропорциональным мгновенному значению $U_{вх}$ в момент подачи сигнала START, то есть появляется динамическая погрешность преобразования, что поясняет рис. 3.

Для устранения данного недостатка в схему АЦП вводится схема выборки/хранения (T/H — track and hold). Этот узел позволяет сохранять неизменным значение измеряемого напряжения $U_{вх}$, поданного на АЦП в момент начала преобразования, на время полного цикла преобразования.

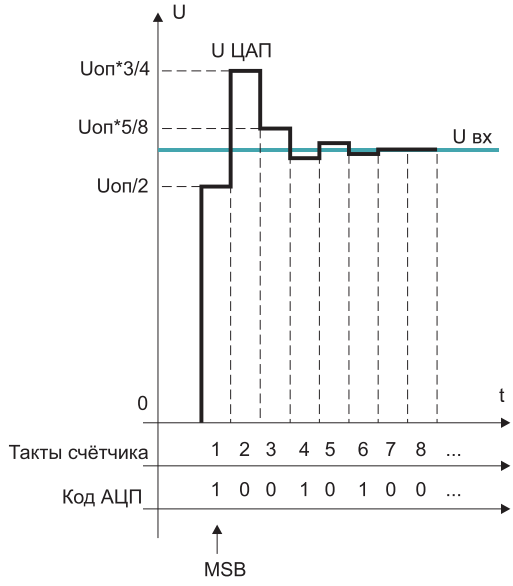


Рис. 2. Схема формирования выходного кода

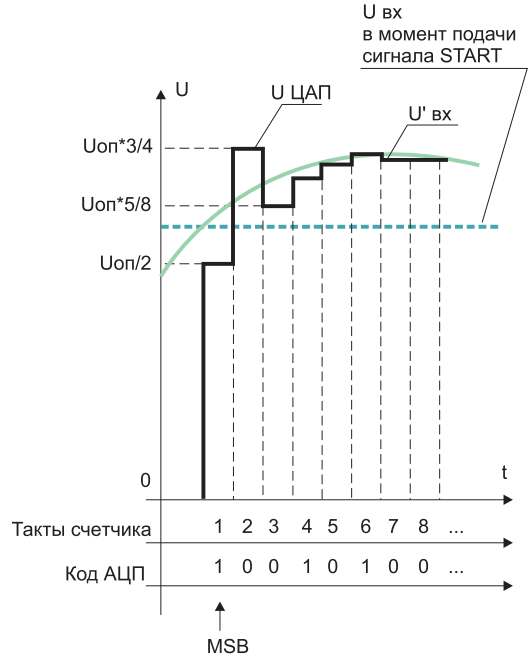


Рис. 3. Динамическая погрешность преобразования

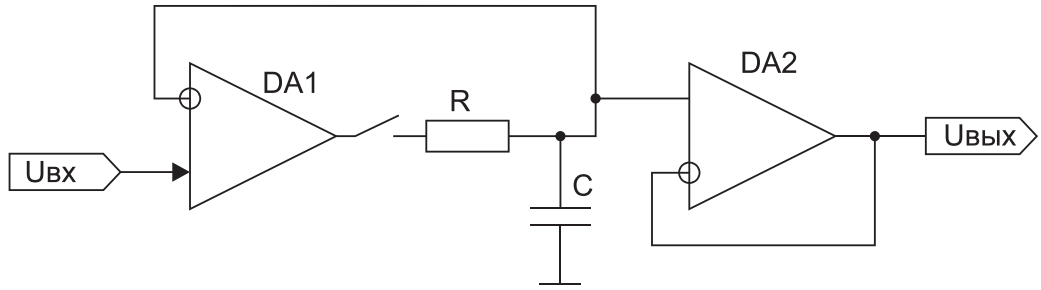


Рис. 4.
Схема устройства выборки-хранения

Пример упрощенной схемы устройства выборки/хранения, поясняющий общий принцип его работы, приведен на рис. 4.

При замкнутом положении ключа операционный усилитель DA1 заряжает емкость C до напряжения $U_{вх}$ через токоограничивающий резистор R. Таким образом осуществляется этап выборки сигнала. На втором этапе ключ размыкается, изменения напряжения $U_{вх}$ не приводят к изменению напряжения на емкости C. Операционный усилитель DA2 включен по классической схеме неинвертирующего усилителя в режиме повторителя, напряжение $U_{вых}$ равно $U_{вх}$. В связи с тем что входное сопротивление операционных усилителей достаточно велико, ток утечки емкости C настолько мал, что за время измерения сигнала $U_{вых}$ не приводит к сколь-нибудь значительному увеличению погрешности. Так реализуется этап хранения сигнала. Необходимо добавить, что в настоящее время применяются значительно более совершенные схемы рассматриваемых устройств выборки/хранения.

Примером построения современного АЦП последовательного приближения, снабженного внутренним устройством выборки/хранения, а также встроенным программно конфигурируемым мультиплексором аналоговых входных сигналов, является микросхема RHFAD128 компании STMicroelectronics. Функциональная схема прибора приведена на рис. 5.

RHFAD128, разработанный для применения в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов, представляет собой радиационно-

Таблица.
Характеристики радиационно-стойкого 12-разрядного АЦП последовательного приближения

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА	ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРА
Разрядность, бит	12
Напряжение питания аналоговых узлов, В	2,7–3,6
Напряжение питания цифровых узлов, В	2,7–3,6
Ток потребления в рабочем режиме, мА, не более	2
Полный размах входного напряжения в режиме однополярного сигнала, В	3,6
Погрешность преобразования, дв. ед., не более	±2
Интегральная нелинейность, дв. ед.	±1
Дифференциальная нелинейность, дв. ед.	0,9
Температурный диапазон, °C	–55…+125
Корпус	FLAT-16

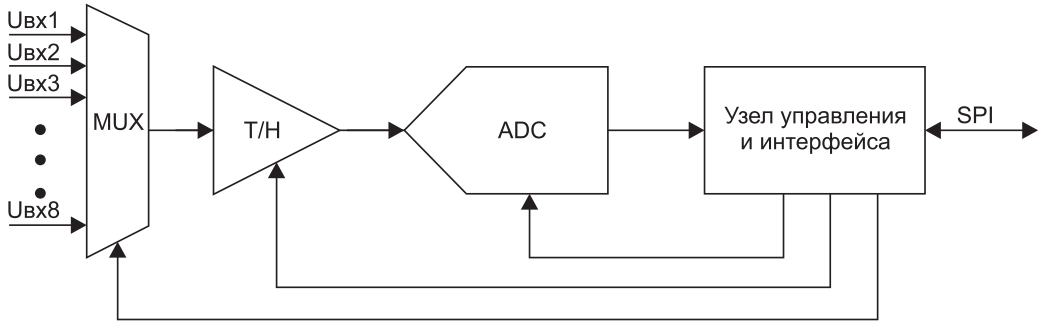


Рис. 5.
Функциональная схема RHFAD128

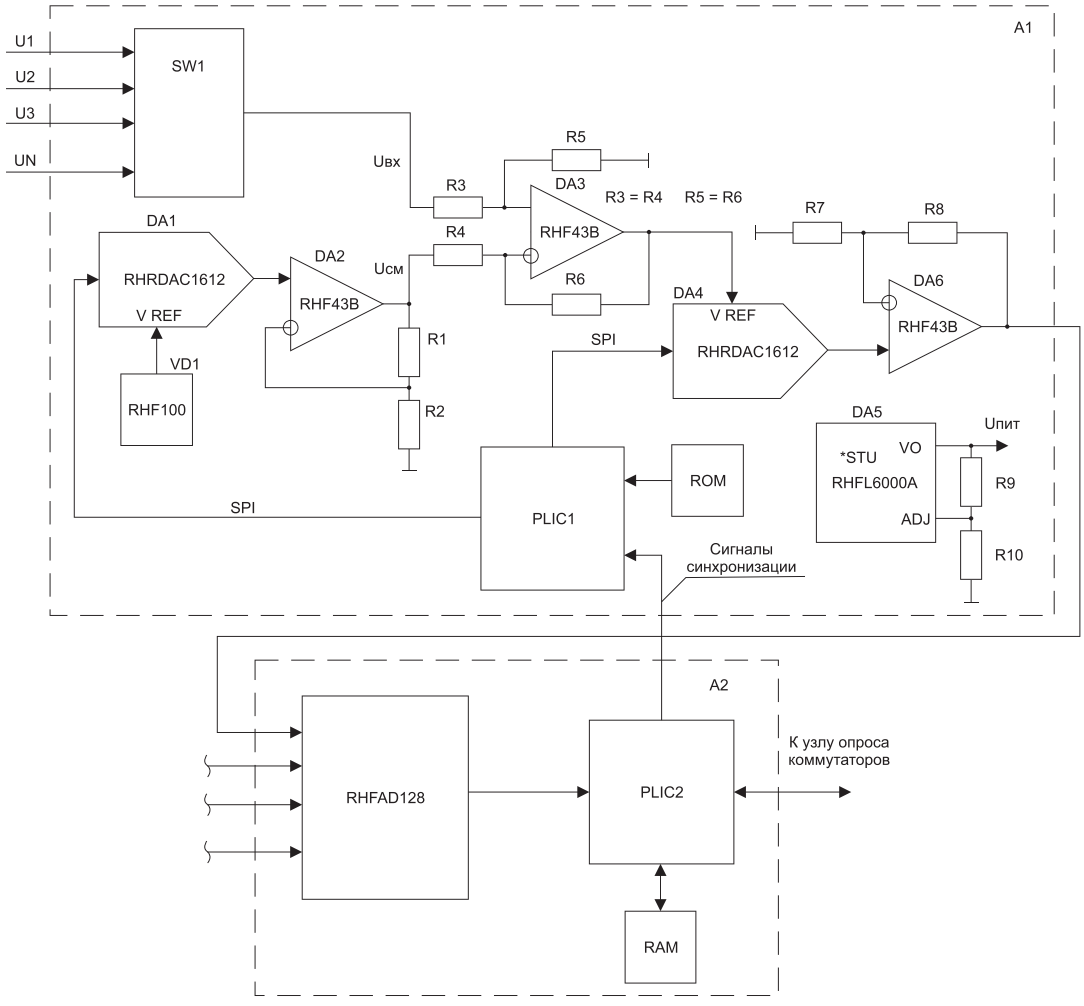


Рис. 6.

стойкий 12-разрядный АЦП последовательного приближения с низким энергопотреблением, позволяющий подключать до восьми однополярных источников сигналов либо до четырех дифференциальных источников сигналов и частотой преобразования 50 Квыб/с — 1 Мвыб/с.

Основные технические характеристики приведены в таблице.

АЦП поддерживает обмен с узлами верхнего уровня по последовательному интерфейсу SPI.

В качестве примера использования АЦП RHFAD128 можно произвести изменения в схеме, представленной на рис. 1 [1], при которых из состава узла A2 могут быть исключены приборы SW2, DA7, DA8 путем замены на данную ИС. Измененная схема представлена на рис. 6.

АЦП RHFAD128 устойчив к воздействию ионизирующего излучения космического пространства до уровня 300 крад, также он не подвержен возникновению SEL-эффектов вплоть до уровня воздействия ТЗЧ 120 МэВ•см^2/мг и SET-эффектов до уровня 60 МэВ•см^2/мг.

В заключение следует отметить, что прибор RHFAD128 поставляется компанией STMicroelectronics на территорию России без каких-либо ограничений, что делает его весьма привлекательным решением в процессе выбора элементной базы при проектировании бортовой аппаратуры. Также АЦП может быть рекомендован на замену ИС ADC128S102

[1] Черных К. В. Построение системы телеметрии космического назначения на базе безлицензионных радиационно-стойких компонентов STMicroelectonics // Вестник электроники. 2017. № 3–4 (60).