

УДК 004.383 + 004.896 + 004.75

А.Я. Анопrienко, к. т. н., проф. каф. КИ,
Р.Л. Варзар, аспирант, 3-й курс, каф. КИ,
С.В. Иваница, асс. каф. КИ,
Донецкий национальный технический университет
vrxfle@mail.ru, anoprien@gmail.com, ivanitsa-serg@rambler.ru

Закономерности развития аналого-цифровых преобразователей и перспективы использования постбинарного кодирования

В данной работе кратко рассматриваются основные виды аналого-цифровых преобразователей и их основные характеристики, а также тенденции постоянного совершенствования параметров АЦП и появление новых типов. Также рассматриваются недостатки стандарта IEEE 754, который используется в современных вычислительных системах для представления чисел в формате с плавающей запятой. Предлагается использовать интервальное и постбинарное кодирование для представления результатов преобразований аналого-цифровых преобразователей. Также предложена схема для реализации постбинарного аналого-цифрового преобразователя (ПАЦП).

Ключевые слова: АЦП, постбинарный код, тетракод, дискретизация сигналов

Введение

В настоящее время используется несколько основных типов аналого-цифровых преобразователей (АЦП), отличающихся параметрами, организацией и принципами работы: параллельные, последовательные (последовательного счета, интегрирующие, сигма-дельта и т. д.) и последовательно-параллельные (многотактные, многоступенчатые, конвейерные и т. д.) [1, 7-9].

Основными параметрами современных АЦП являются следующие [2, с. 36-38]:

- разрешающая способность;
- погрешность полной шкалы;
- погрешность смещения нуля;
- нелинейность;
- дифференциальная нелинейность;
- отсутствие пропущенных кодов;
- монотонность характеристики преобразования;
- температурная нестабильность;
- максимальная частота дискретизации;
- время преобразования;
- время выборки;
- отношение сигнал/шум;
- отношение сигнал/(шум и искажения);
- число эффективных разрядов;
- полный коэффициент гармоник;
- динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих;
- потребляемая мощность и т. д.

В каждом конкретном приборе к АЦП предъявляются особые требования по параметрам. Например, газоаналитические системы оснащаются датчиками, выдающими на выходе очень слабый аналоговый сигнал, который медленно изменяется во времени, поэтому в них необходимо использовать АЦП высокого разрешения. А,

например, детекторы частиц на Большом адронном коллайдере регистрируют частицы с очень большой скоростью, поэтому требуются особо быстродействующие АЦП.

Для обратного преобразования цифровых сигналов в аналоговую форму расширяется также и применение цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП).

Проведенный авторами анализ показывает, что развитие основных параметров АЦП и ЦАП подчиняется системе закономерностей, аналогичной известным закономерностям развития вычислительных систем, например, законам Мура, Джоя, Хогланда и т. д.

Развитие АЦП и ЦАП

Развитие АЦП и ЦАП может быть прослежено на достаточно длительном временном интервале.

Первое зарегистрированное упоминание о цифровых ЦАП датируется 18 веком в Турции. Тогда Турция была под Османской Империей и имела проблемы с водоснабжением. Поэтому при Махмуде II была разработана система для регулирования водоснабжения, состоявшая из специального резервуара и запорных механизмов, размеры которых были кратны степеням числа 2. Таким образом еще в 18 веке был придуман первый гидравлический 8-битный ЦАП на основе двоичной логики.

Следующая революция в преобразователях сигналов произошла в 19 веке с появлением телеграфа (Шиллинг П., 1825-1875 гг.), телефона (Белл А., 1875 г.) и разных систем кодирования информации: коды Грея, цепные коды.

Далее 1921 год был ознаменован изобретением импульсно-кодовой модуляции (Пол Рэйни).

Первые электронные 5-битные счетные АЦП и ЦАП были созданы в 1937 году Алеком Харли Ривзом. Это были полноценные устройства на электронных лампах, преобразующие аналоговый сигнал в 5-битный параллельный двоичный код и наоборот. А первый коммерческий АЦП Epsco "Datrac" появился в 1954 году параллельно с первыми коммерческими компьютерами ENIAC и UNIVAC.

Далее аналого-цифровые преобразователи развивались параллельно с развитием цифровой техники и сегодня уже существуют АЦП с разрядностью до 32 бит и частотой дискретизации до 1 гигавыборки в секунду.

Законы развития АЦП и ЦАП

На основе анализа данных из различных источников были построены графики, описывающие развитие основных параметров преобразователей сигналов начиная с 30-х годов XX века и до сегодняшнего дня.

График на рисунке 1 описывает рост развития разрядности преобразователей. Характерной является задержка роста в 90-е годы, связанная с тем, что достигнутая к тому времени разрядность в 24 бита является достаточной практически для всех приложений, а в тех редких случаях, когда её недостаточно, применяются прецизионные малошумящие усилители.

Но некоторые компании, например ESS Technology, начиная примерно с 2010 года, начали выпускать 32-разрядные АЦП и ЦАП для высококачественной аудиоаппаратуры, чтобы непосредственно кодировать звук в 32-разрядном формате.

На сегодня разрядность в 32-бита представляется более чем достаточной и в ближайшем будущем (20-30 лет) наращивание разрядности преобразователей наблюдаться, по всей видимости, не будет.

Графики на рисунках 2 и 3 показывают рост такого важного показателя как скорость преобразования (частота дискретизации) АЦП и ЦАП с 1930 по 2010 гг.

График на рисунке 4 является экспоненциальной аппроксимацией наблюдаемых тенденций роста скорости АЦП и ЦАП до 2050 года, когда частота дискретизации может достигнуть 60 ГГц.

Эту закономерность можно представить следующим экспоненциальным уравнением:

$$y = 3 \cdot 10^{-77} \cdot e^{0.0946x}$$

Полученную зависимость можно считать своего рода аналогией закона Мура после 1975 года:

$$y = 2^{16} \cdot 2^{\frac{x-1975}{1.5}}$$

Проблемы с представлением цифрового кода

Авторами были проведены исследования на модели 6-битного последовательно-параллельного АЦП с целью выявления проблем с представлением реального измеряемого сигнала в цифровой форме. АЦП были промоделированы в среде NI LabVIEW 8.6 (рис. 5). В результате моделирования было, в частности, установлено, что два одинаковых АЦП для одного и того же аналогового сигнала выдают близкие по значению, но всё-таки, разные цифровые коды, отличающиеся на 1-2 значащих бита. Например, для входного сигнала с точным значением 55.3549 1-ый АЦП выдает значение 55, а второй – 56, что обусловлено характерными для современных АЦП погрешностями в работе.

Кроме проблем точности представления измеренного значения, связанных с преобразованием аналогового сигнала в цифровую форму, существуют проблемы представления полученного значения в процессоре в формате с плавающей запятой. Эти проблемы связаны с недостатками стандарта IEEE 754, который используется практически всеми современными вычислительными системами для работы с числами с плавающей запятой.

Рассмотрим, например, число e с точностью до 18-го знака после запятой [4, с. 134-135]:

$$e_0 = +2,718281828459045235$$

Естественно, такое значение невозможно точно представить в традиционных, используемых современными процессорами, форматах чисел с плавающей запятой. Так, для формата single (32 бит IEEE 754) заданное число e представляется следующими двоичными полями (S – знак числа, E – смещенная экспонента, M – остаток от мантиссы):

$$S = 0; E = 10000000; M = 01011011111100001010100,$$

Точное десятичное значение, полученное из данных полей, равно

$e_{32b} = +2,71828174591064453125$ и имеет значимую погрешность представления для заданной точности:

$$\Delta_1 = e_0 - e_{32b} = +8,254840070375 \cdot 10^{-8}.$$

Характерно, что и в формате double (64 бит IEEE 754) также невозможно представить число e с точностью до 18-го десятичного знака после запятой.

Кроме этого, стандарт IEEE 754 подвержен следующим ошибкам [5, с. 196-210]:

- **Опасная редукция** – ошибки, связанные с точностью представления вещественных чисел в формате IEEE754.

- **Дикі помилки** – помилки, пов'язані з неправильним приведенням типів даних.
 - **Циклічні діри** – помилки, викликані зсувом мантис.
 - **Грязний нуль** – помилки викликані округленням.
 - **Числа убийці** – помилки, що виникають на межі нормалізованих/денормалізованих чисел.
- більшість чисел вещественной осі не можуть бути представлені точно числами з плаваючою точкою, і, відповідно, властивості арифметических операцій над числами з плаваючою точкою відрізняються (із-за неізбежних округлень) від властивостей ідеальних математических операцій над вещественними числами;
 - число в форматі з плаваючою точкою не несе жодної інформації про точність той величини, яку воно представляє.

Основні недоліки сучасного представлення чисел з плаваючою точкою включаються також в наступному [5, с. 116-119]:

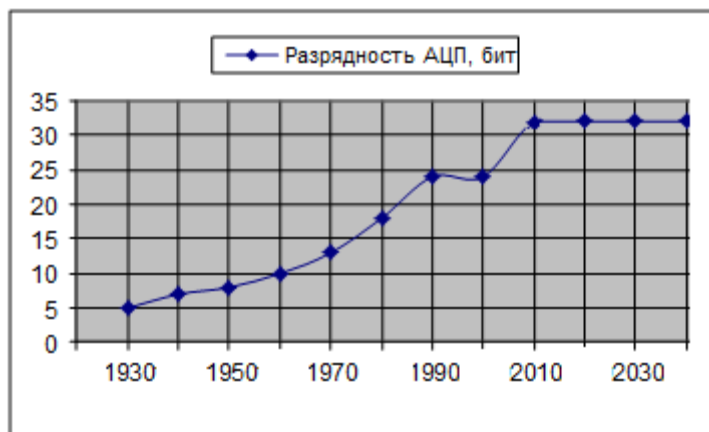


Рисунок 1 – Ріст розрядності АЦП і ЦАП в період з 1930 року (з екстраполяцією до 2030 року)

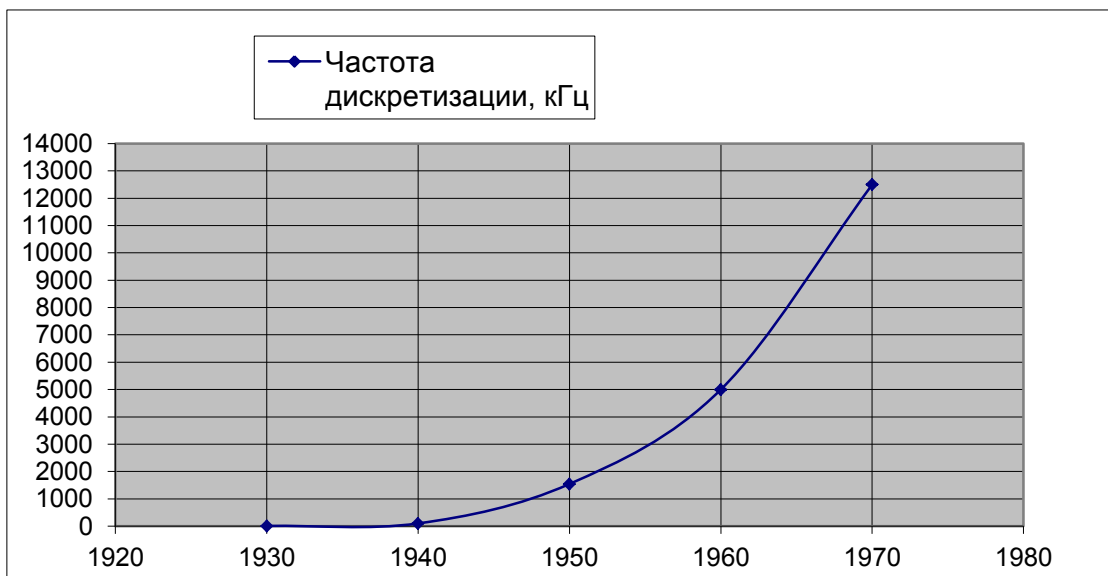


Рисунок 2 – Ріст швидкості перетворення (частоти дискретизації) АЦП і ЦАП з початку 30-х до кінця 60-х років ХХ століття



Рисунок 3 – Рост скорости преобразования (частоты дискретизации) АЦП и ЦАП с 1970 по 2010 гг.

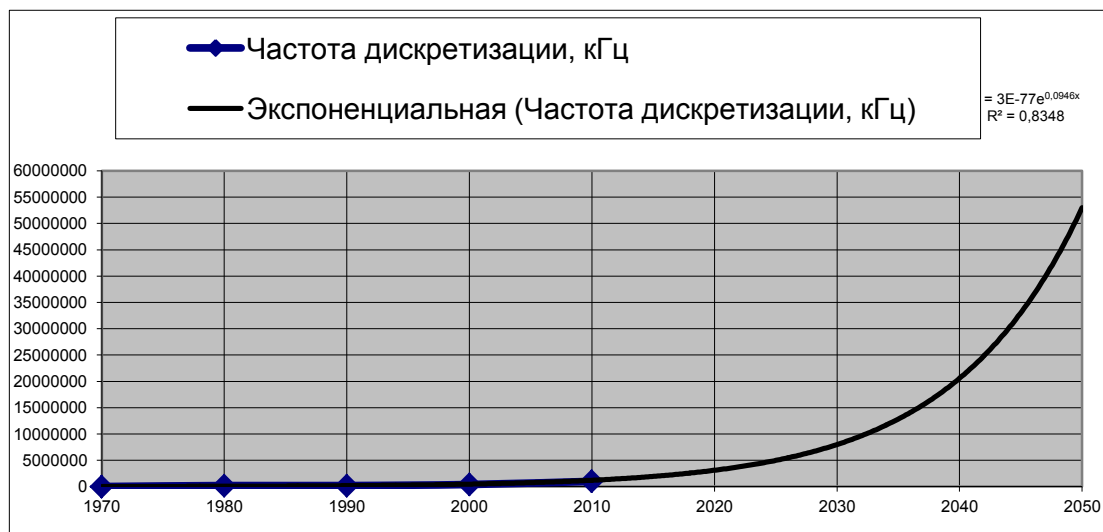


Рисунок 4 – Экстраполяция роста скорости преобразования (частоты дискретизации) АЦП и ЦАП до 2050 года

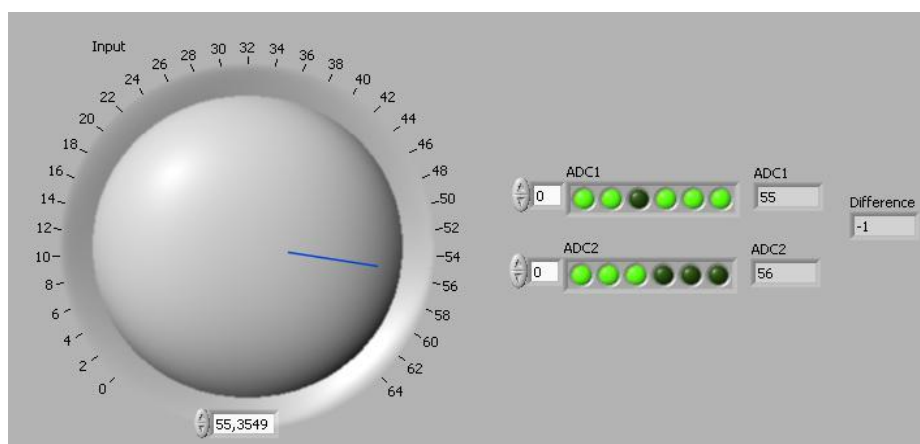


Рисунок 5 – Интерфейс разработанной программы моделирования 6-битного АЦП

Из этого всего следует вывод, что на последующих этапах развития АЦП потребуется такой способ представления оцифрованных данных, который позволил бы учитывать реальную точность полученных значений. Достигнуто это может быть использованием постбинарного кодирования [4, 5].

Постбинарный аналого-цифровой преобразователь

На основе постбинарного кодирования можно построить постбинарный аналого-цифровой преобразователь (ПАЦП).

В качестве примера актуальности ПАЦП рассмотрим существующий АЦП фирмы Analog Devices AD7718 с разрешением 24 бита. Но реально этот АЦП оцифровывает аналоговый сигнал в диапазоне $\pm 2,56 В$ с точностью 19-бит. Т. е. младшие 5 бит практически всегда представляют шум [3]. Тогда погрешность измерения для этого АЦП равна:

$$\Delta_{ADC} = \frac{\pm 2,56 В}{2^{24}} \cdot 2^5 =$$

$$= \pm 0,0000048828125 В$$

Из этого следует, что выходное значение АЦП следует представлять не в виде точного 24-битного числа, а в виде интервала $U = [U_0 - \Delta_{ADC}, U_0 + \Delta_{ADC}]$, который можно закодировать одним тетракодовым словом.

На рисунке 7 представлена предложенная схема постбинарного АЦП, состоящего из таких стандартных компонентов, как усилитель, устройство выборки и хранения (УВХ), 8-битный параллельный АЦП, также – двух принципиально новых компонентов – формирователя интервала (ФИ) и формирователя постбинарного кода (ФПК), в данном случае тетракода.

Заключение

Таким образом, на основе рассмотрения основных закономерностей развития аналого-цифровых преобразователей и их основных характеристик можно сделать вывод о том, что традиционные пути развития АЦП близки к исчерпанию. Разрядность выше 32-х бит вряд ли целесообразна и реально достижима, а частота порядка 60-ти ГГц представляется практически нереальной с учетом особенностей и тенденций развития современной цифровой техники.

Кроме этого следует учитывать существенные недостатки стандарта IEEE 754, который используется в современных вычислительных системах для представления чисел в формате с плавающей запятой.

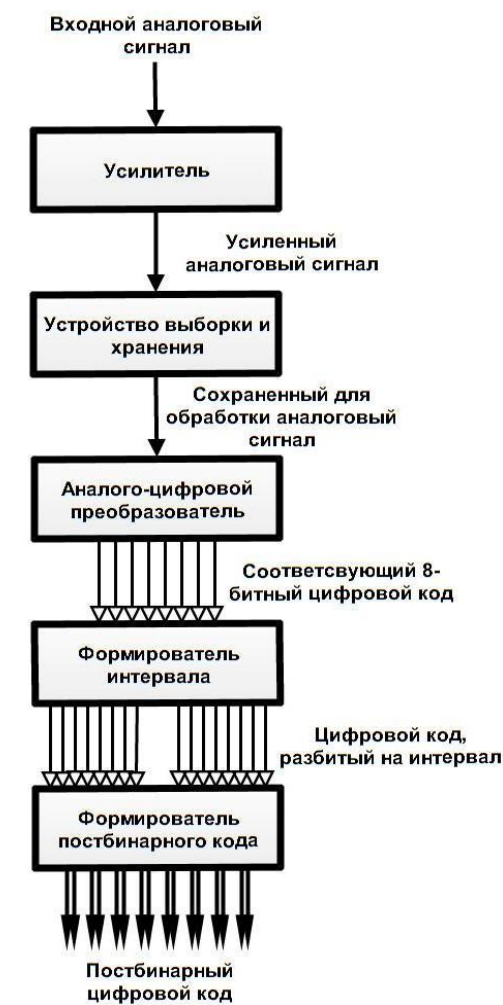


Рисунок 7 – Схема ПАЦП

В связи с этим наиболее целесообразной перспективой развития АЦП представляется использование постбинарного кодирования, на базе чего могут быть реализованы постбинарные аналого-цифровые преобразователи (ПАЦП).

Предполагается, что постбинарные АЦП позволят отслеживать абсолютную точность измерений аналоговых величин, а значит – улучшить качество измерительных приборов, автоматики и вычислительных систем [10].

В будущем планируется решение следующих задач:

1. Разработка алгоритмов представления чисел в постбинарном виде применительно к результатам преобразований АЦП.
2. Разработка отдельных узлов постбинарного АЦП.
3. Проведения экспериментов для оценки эффективности и точности работы ПАЦП по сравнению с обычными АЦП.

Список использованной литературы

1. Лехин С.Н. Схемотехника ЭВМ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 672 с.: ил.
2. Микросхемы АЦП и ЦАП. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 432 с.: ил. + CD. - (Серия «Интегральные микросхемы»).
3. Analog Devices AD7718 Data Sheet Rev 0. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7708_7718.pdf
4. Аноприенко А.Я., Иваница С.В. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции. / А.Я. Аноприенко, С.В. Иваница – Донецк: ДонНТУ, УНИТЕХ, 2011. – 248 с.
5. Аноприенко А.Я., Иваница С.В. Тетралогия, тетравычисления и ноокомпьютеринг. Исследования 2010-2012. – Донецк: ДонНТУ, Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2012. – 308 с.
6. Hayes B. A Lucid Interval. A reprint from American Scientist the magazine of Sigma Xi, the Scientific Research Society, Volume 91, Number 6, November-December, 2003, p. 484–488.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.
8. Муханин Л.Г. Схемотехника измерительных устройств: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 288 с.: ил.
9. Глинкин, Е.И. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей: монография / Е.И. Глинкин. – 2-е изд., испр. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 160 с.
10. Варзар Р.Л., Аноприенко А.Я. Аппаратная архитектура сенсорного модуля суперсенсорного компьютера и его параметры // Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг (ІУСКМ - 2013) / Збірка матеріалів IV Всеукраїнської науково-технічної конференції 24-25 квітня 2013 р., м. Донецьк, ДонНТУ, 2013. – В 2-х тт. – Т. 1. С. 720-728.
11. Аноприенко А.Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования» (МАП-2013). Выпуск № 1 (12) – 2 (13): Донецк: ДонНТУ, — 2013. С. 10–32.
12. Аноприенко А.Я. Модели эволюции компьютерных систем и средств компьютерного моделирования // Материалы пятой международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика» 24-27 сентября 2013 года, Донецк, ДонНТУ, 2013. С. 403-423.

Надійшла до редколегії 10.04.2014

О.Я. Аноприенко, Р.Л. Варзар, С.В. Иваница

Донецкий национальный технический университет

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПЕРЕТВОРЮВАЧИ І ПОСТБІНАРНОЕ КОДУВАННЯ

В даній роботі коротко розглядаються закономірності розвитку аналого-цифрових перетворювачів та їх основних характеристик, що впливають на точність перетворення аналогового сигналу в цифровий код. Також розглядаються недоліки стандарту IEEE 754, який використовується в сучасних обчислювальних системах для представлення чисел у форматі з плаваючою комою. Пропонується використовувати постбінарне кодування для представлення результатів перетворень аналого-цифрових перетворювачів. Також запропонована схема для реалізації постбінарного аналого-цифрового перетворювача (ПАЦП).

Ключові слова: АЦП, постбінарний код, тетракод, дискретизація сигналів.

O.Ya. Anopriyenko, R.L. Varzar, S.V. Ivanitsa

Donetsk National Technical University

ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS AND POSTBINARY CODING

In this paper the laws of evolution of analog-to-digital converters and their main characteristics are briefly discussed. The shortcomings of the IEEE 754 standard, which is used in modern computing systems to represent numbers in floating point format, are highlighted. Usage of the postbinary coding for present the results of transformations of analog-to-digital converters is proposed. Also a scheme for implementing postbinary analog-to-digital converter (PADC) is proposed.

Keywords: ADC, postbinary code, tetracode, discretization of signals.

Как правильно ссылаться на данную статью:

Аноприенко О.Я., Варзар Р.Л., Иваница С.В. Закономерности развития аналого-цифровых преобразователей и перспективы использования постбинарного кодирования // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ-2014). Выпуск 1 (19). – Донецк: ДонНТУ, 2014. С. 5-10.