



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-373-381

УДК. 621.389

АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ АЦП ВРЕМЯ-ИМПУЛЬСНОГО ТИПА С СИСТЕМОЙ ГРУБО-ТОЧНОГО ОТСЧЕТА

А.З. Ходоровский, А.В. Назаров

Московский авиационный институт
ул. Новая Басманная, 16-а, Москва, Россия, 107078

Приведен анализ динамических свойств развертывающих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) время-импульсного типа с системой грубо-точного отсчета (ГТО). Введено понятие коэффициента ускорения процесса преобразования и исследована его зависимость от числа разрядов и количества ступеней преобразования. Даны рекомендации по выбору параметров преобразователей. Предложена методика оптимального распределения разрядов по ступеням преобразования, обеспечивающая наилучшие динамические свойства грубо-точных преобразователей. Показано, что реализация грубо-точных методов обеспечивает многократное ускорение процессов преобразования в развертывающих АЦП время-импульсного типа, причем наибольший прирост скорости наблюдается при переходе от одноступенчатого к двухступенчатому преобразованию.

Ключевые слова: АЦП, система грубо-точного отсчета, динамические характеристики

Введение. Развитие современного рынка АЦП идет по двум направлениям. С одной стороны, продолжается совершенствование классических архитектур, направленное на удовлетворение растущих запросов потребителей. В настоящее время на рынке присутствуют более двух тысяч различных типов АЦП и все они имеют жесткую архитектуру и фиксированные параметры. Однако в последние годы стала проявляться тенденция к созданию АЦП, ориентированных на использование в системах обработки информации, которые можно разбить на две группы.

Первая группа предназначена для решения узкого класса задач. Эти АЦП работают обычно с одним источником аналоговых сигналов и используются, например, при обработке видеoinформации. Требования к преобразователям в них жестко фиксированы, а разработчики таких систем обычно удовлетворяются присутствующими на рынке микросхемами АЦП с жесткой архитектурой.

Вторая группа включает системы обработки информации, решающие круг задач обработки большого количества разнообразных аналоговых сигналов, требования к качеству обработки которых могут также сильно отличаться. К таким системам можно отнести многие измерительно-информационные и телеметрические системы. Применение в них АЦП с жесткой архитектурой и фиксированными параметрами существенно ограничивает возможности указанных систем.

Механическое же увеличение количества микросхем АЦП в соответствии с разнообразием требований, часто неприемлемо по экономическим и технологическим причинам. В связи с этим, в последние годы делается все больше попыток создания, так называемых, встроенных АЦП, учитывающих специфику систем обработки информации, в которых они устанавливаются. К сожалению, в большинстве своем данные АЦП строятся на базе классических архитектур, а их адаптация к условиям применения ограничивается, как правило, внешними параметрами, например, числом обслуживаемых каналов.

Таким образом, возникла необходимость в проведении работ по созданию устройств, способных путем программирования менять структуру и параметры АЦП «на лету», реализуя различные типы алгоритмов аналого-цифрового преобразования. В этих условиях на первый план выходят задачи исследования и оптимизации динамических характеристик АЦП, причем наиболее эффективным способом ускорения процессов в таких структурах является переход к грубо — точным методам преобразования сигналов.

В общем случае, к группе развертывающих — относят классические АЦП последовательного счета, а также различные типы интегрирующих АЦП [1—3]. Преобразователи этой группы просты в реализации, имеют сравнительно высокие точностные параметры, но, к сожалению, не обеспечивают высокого быстродействия. Одним из путей ускорения процессов в таких структурах служит переход к грубо-точным методам. В преобразователях при этом выделяется ряд ступеней, каждая из которых обеспечивает формирование своей группы разрядов выходного кода. Начинается преобразование со старшей ступени, обеспечивающей квантование сигнала с максимальным шагом, а заканчивается младшей ступенью, оцифровка в которой происходит с наименьшим шагом. К сожалению, ряд обстоятельств препятствует широкому распространению и внедрению данных методов. Так, кроме значительных аппаратных затрат на реализацию, связанных с согласованием шкал между соседними ступенями преобразования, не исследованным остается проблема оптимизации временных характеристик таких преобразователей, тесно связанная с исследованием их динамических свойств [4].

Отличительной особенностью развертывающих АЦП является наличие в каждом цикле преобразования двух операций: а) формирование монотонно изменяющегося уравнивающего сигнала и б) подсчет числа счетных импульсов за время уравнивания кодируемой величины. В АЦП с линейным и ступенчатым уравниванием максимальное время, затрачиваемое на получение цифрового отсчета, составляет $T_{\text{ПР}} = 2^n \tau$, где n — число разрядов преобразователя; τ — период счетных импульсов. В АЦП с двухтактным интегрированием эта величина вдвое выше.

Данное обстоятельство существенно сужает сферы применения классических развертывающих АЦП, поэтому разработчиков всегда интересовала возможность ускорения процесса преобразования в таких структурах. Одним из методов, решающих данную задачу, является метод грубо-точного отсчета (ГТО), который позволяет, при определенных условиях, существенно повысить динамические параметры указанных АЦП.

Предлагаемый метод. В любом АЦП преобразование сводится к получению двоичного кода $A = a_{n-1}a_{n-2}\dots a_0$, ($a_i \in [0, 1]$). Его численный эквивалент:

$$N(A) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \text{ связан с преобразуемой величиной формулой}$$

$$x = N(A)q + \varepsilon_{\text{кв}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{кв}}$ — погрешность квантования; q — шаг квантования (квант). При равномерной шкале квантования шаг определяется отношением диапазона кодируемой величины к числу квантов преобразования:

$$q = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2^n}, \quad (2)$$

где x_{max} , x_{min} — верхняя и нижняя границы диапазона соответственно.

Преобразуемая величина делит диапазон преобразования на нижнюю (от x_{min} до x) и верхнюю (от x до x_{max}) части.

Выходной код можно получить путем оцифровки как нижней, так и верхней частей (участков). При этом кодирование нижнего участка приводит к прямому коду результата, а верхнего — к обратному. На практике чаще кодируют нижний участок. Однако при переходе к грубо-точным методам востребованными могут оказаться оба варианта. Процесс преобразования в любом АЦП сводится к отысканию квантованного уровня, равно первого слагаемому в правой части формулы (1). Способ отыскания величины $N(A)q$ — основной признак, определяющий принадлежность преобразователя к тому или иному классу. В данной работе анализ проводится применительно к разветвляющимся АЦП, квантованию в которых подвергается не сам участок диапазона, а пропорциональный ему временной интервал ($x_1 - x_2$). Для его формирования в момент t_1 из границы участка (x_1), в сторону границы (x_2) запускается линейно изменяющийся сигнал (y) с коэффициентом наклона k :

$$y = k(t - t_1), \quad (3)$$

продолжающийся до момента t_2 перехода этого сигнала через границу x_2 . Математически величина t_2 есть решение относительно t уравнения:

$$x_2 = x_1 + k(t - t_1). \quad (4)$$

Технически же момент t_2 определяется с помощью аналогового компаратора, на входы которого подаются сигналы, соответствующие левой и правой частям уравнения (4). В момент равенства, компаратор меняет свое состояние, что и свидетельствует об окончании интервала. Уравнение (4) является не единственным способом представления уравнения. Переноса отдельные члены уравнения из одной части в другую можно получить различные варианты уравновешивания. Каждому из них будет соответствовать свой способ технического решения.

Формально процедуру квантования временных интервалов, т.е. подсчет числа счетных импульсов за время $(t_2 - t_1)$, можно представить так:

$$N(A) = \text{Ent} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\tau} \right], \quad (5)$$

где $\text{Ent}[A]$ — операция выделения целой части A .

Диапазон значений погрешности квантования временных интервалов Δt зависит от взаимного расположения момента времени t_1 и момента поступления первого счетного импульса. Когда начало преобразования синхронизировано со счетными импульсами, а первый импульс отстоит от t_1 на величину периода τ , диапазон возможных значений Δt оказывается в пределах $[0-\tau]$. При этом шаг квантования сигнала по уровню q определяется произведением $q = k\tau$, а погрешность квантования $\varepsilon_{\text{кв}} = k\Delta t$. С учетом этого формулу (1) можно переписать в виде:

$$x = N(A)k\tau + k\Delta t. \quad (6)$$

Так обстоит дело в классических АЦП. В преобразователях же с системой ГТО весь процесс преобразования разбивают на K этапов, причем на первых $(K - 1)$ этапах выбирается шаг $q = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2^{n_k}}$ и формируются n_k старших разрядов выходного кода. На последнем (K -м) этапе, с шагом $q_k = q$ формируются n_k младших разрядов выходного кода. Совокупность элементов, участвующих в преобразовании на i -м этапе принято называть i -й ступенью преобразования. При этом отдельные элементы могут входить в несколько ступеней. Выходной код преобразователя образуется как совокупность всех разрядных групп. Соответственно общее число разрядов преобразователя определяется суммой разрядов всех групп:

$$n = \sum_{i=1}^K n_i. \quad (7)$$

В общем случае, число ступеней преобразователя (K) может изменяться от 1 до n . При $K = 1$ АЦП с системой ГТО вырождается в классический АЦП последовательного счета. Оценкой времени преобразования в АЦП с системой ГТО может служить величина, определяемая соотношением:

$$T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^K 2^{n_i} \tau. \quad (8)$$

Этот параметр зависит от числа разрядов и ступеней преобразователя, и от распределения разрядов по ступеням. При фиксированных n и K время преобразования определяется только разрядностью ступеней. При этом минимальное время преобразования $T_{\text{пр min}}$ достигается, если при выборе числа разрядов ступеней руководствоваться следующей методикой.

1. Разделить общее число разрядов АЦП на количество ступеней: n/K .
2. Представить результат в виде суммы целой части (C) и правильной дроби: $n/K = C + r/K$, где r — это остаток от деления нацело числа разрядов АЦП на число ступеней преобразования.
3. Все множество ступеней преобразования K разделить на две группы K_1 и K_2 так, чтобы: $K_1 = (K - r)$ и $K_2 = r$.
4. Число разрядов каждой ступени группы K_1 установить равным целой части частного C , а число разрядов группы K_2 принять как $(C + 1)$, тогда время преобразования окажется минимальным и равным:

$$T_{\text{пр min}} = 2^C(K + r)\tau. \quad (9)$$

Порядок чередования ступеней при этом значения не имеет. Далее, определив коэффициент C через параметры преобразования: $C = (n - r)/k$, и подставив это выражение в формулу (9), получаем:

$$T_{\text{пр min}} = (K + r) \cdot 2^{\left(\frac{n-r}{K}\right)}. \quad (10)$$

Чтобы определить во сколько раз по сравнению с одноступенчатым преобразователем сокращается время на получение цифрового отсчета в АЦП с системой ГТО, введем коэффициент ускорения преобразования G_n^K , который формально можно представить в виде:

$$G_n^K = \frac{2^n \cdot \tau}{T_{\text{пр min}}}. \quad (11)$$

После подстановки выражения (10) в формулу (11) получаем:

$$G_n^K = \frac{2^{\frac{n(K-1)+r}{K}}}{K + r}. \quad (12)$$

Или в более удобном для расчета виде:

$$G_n^K = \frac{2^{n \cdot \frac{(n-r)}{K}}}{K + r}. \quad (13)$$

Легко видеть, что член $(n - r)/K$ в этом выражении представляет собой целую часть частного (C) от деления числа разрядов преобразователя на количество ступеней. Результаты расчетов коэффициентов G_n^K при различных значениях параметров n и K сведены в таблице 1.

На рисунках 1 и 2 представлены семейства функций, построенные на основании этих данных.

Таблица 1

Зависимость коэффициентов ускорения G_n^K от числа разрядов (n) и числа ступеней (K) грубо – точных АЦП: $G_n^K = f(n, K)$
[Dependence of the acceleration coefficients (G_n^K) on the number of bits (n) and the number of stages (K) of coarse-precision ADCs: $G_n^K = f(n, K)$]

K	n												
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	24	25
2	16	21	32	43	64	85	128	171	256	341	512	2048	2731
3	32	51	85	128	205	341	512	819	1365	2048	3277	21845	32768
4	43	73	128	205	341	585	1024	1638	2731	4681	8192	65536	104858
5	51	85	146	256	455	819	1365	2341	4096	7282	13107	116508	209715
6	51	93	171	293	512	910	1638	2979	5461	9362	16384	174763	299593
7	51	93	171	315	585	1024	1820	3277	5958	10923	20165	209715	381300

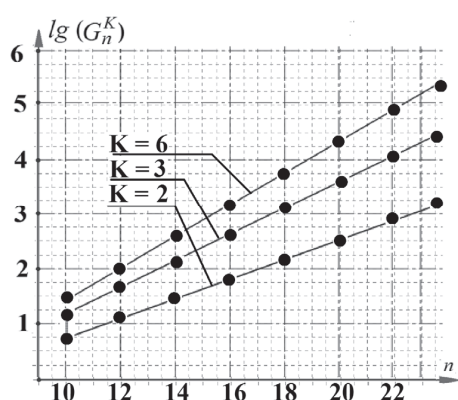


Рис. 1. Зависимость $\lg(G_n^K) = f(K)$
[Fig. 1. Dependence $\lg(G_n^K) = f(K)$]

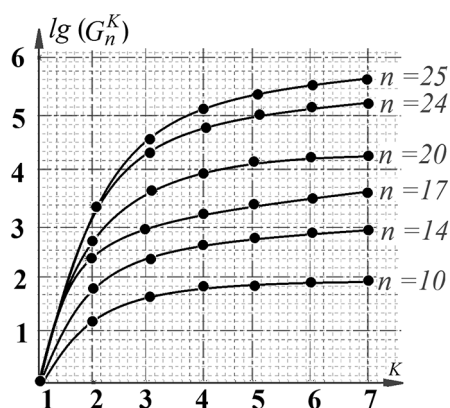


Рис. 2. Зависимость $\lg(G_n^K) = f(n)$
[Fig. 2. Dependence $\lg(G_n^K) = f(n)$]

Логарифмические зависимости значений коэффициентов ускорения от числа разрядов преобразования (n) в диапазоне $n = 10–25$ подчиняются линейному закону, который можно описать функцией

$$\lg(G_n^K) = L_K(n - 10). \quad (14)$$

Соответствующие значения коэффициентов наклона прямых в зависимости от числа ступеней приведены в таблице 2.

Таблица 2

Зависимость коэффициентов наклона прямых (14) от количества ступеней
[Dependence of the slopes coefficients of the straight lines (14) on the number of steps]

K	2	3	4	5	6	7
L_K	0,148	0,201	0,226	0,241	0,251	0,258

Выводы.

1. Предложена методика оптимального распределения разрядов по ступеням, обеспечивающая наилучшие динамические свойства грубо-точных преобразователей.

2. Реализация грубо-точных методов обеспечивает существенное ускорение процессов преобразования в развертывающих АЦП время-импульсного типа, причем наибольший прирост скорости наблюдается при переходе от одноступенчатого к двухступенчатому преобразованию. Коэффициенты ускорения при этом оказываются существенно зависящими от разрядности преобразователей.

3. Введено понятие коэффициентов ускорения, позволяющих оценить выигрыш в быстродействии, получаемый за счет перехода в развертывающих АЦП к системе ГТО.

4. Данные, приведенные на рисунках 1 и 2, показывают, что для 10-ти разрядных АЦП переход к 2-х ступенчатому грубо-точному методу сокращает время преобразования в 16, а для 25-ти разрядных — в 2731 раз. При переходе к 3-х ступенчатому преобразованию быстродействие возрастает еще в 2 раза для 10-и разрядных АЦП и в 12 раз — для 25-ти разрядных АЦП. Добавление же в эти преобразователи четвертой ступени дает прирост быстродействия еще в 1,3 раза и 3,2 раза соответственно. Таким образом, в работе показано, что:

— наиболее предпочтительным является использование в АЦП с системой ГТО от 2-х до 4-х ступеней преобразования;

— поскольку при числе ступеней равно $n/2$ для четных и $(n + 1)/2$ для нечетных n время преобразования достигает минимума, то дальнейшее увеличение количества ступеней не приводит к повышению быстродействия АЦП и, следовательно, с этой точки зрения не имеет практического смысла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гитис Э.И., Пискулов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1981. 360 с.
- [2] Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник. СПб.: Корона принт «Альтекс-А», 2003. 224 с.
- [3] Бабич Н.П., Жуков И.А. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования: учеб. пособие. Киев: «МК-Пресс», 2004. 576 с.
- [4] Ходоровский А.З., Назаров А.В., Азаров А.В., Магомедгаджиев А.М. Минимизация объема данных на выходе аналого-цифрового преобразователя при заданной погрешности преобразования. М.: МАИ, электронный журнал «Труды МАИ». № 84. 2014.

© Ходоровский А.З., Назаров А.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: август 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

Для цитирования:

Ходоровский А.З., Назаров А.В. Анализ быстродействия развертывающих ацп время-импульсного типа с системой грубо-точного отсчета // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 373—381. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-373-381

Сведения об авторах:

Ходоровский Александр Зиновьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий конструирования радиоэлектронных устройств Московского

авиационного института (МАИ). *Сфера научных интересов:* цифровая электроника, аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов, теория автоматов, конвейерная обработка данных. *Контактная информация:* e-mail: ahazz@mail.ru

Назаров Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий конструирования радиоэлектронных устройств Московского авиационного института (МАИ). *Сфера научных интересов:* автоматизация конструирования и системы автоматизации проектирования радиоэлектронных средств. *Контактная информация:* e-mail: rat-rut@yandex.ru

ANALYSIS OF PERFORMANCE A SCANNING ANALOG-DIGITAL CONVERTER OF THE “TIME-IMPULSE” TYPE WITH A COARSELY-ACCURATE SYSTEM OF A COUNTING

A.Z. Hodorovsky, A.V. Nazarov

Moscow Aviation Institute
Novaya Basmannaya str., 16-a, Moscow, Russia, 107078

Dynamic properties of ADC time-impulse type with a coarse-fine reference system are analyzed. The concept of the acceleration coefficient of the transformation process is introduced, and its dependence on the number of discharges and the number of conversion steps is investigated. Recommendations for the choice of the parameters of the transducers are given. A technique is proposed for the optimal distribution of discharges over the conversion stages, which ensures the best dynamic properties of coarse-accurate converters. It is shown that the implementation of coarse-precision methods provides multiple acceleration of the conversion. The fastest rate increase observed in the transition from a single-stage to a two-step transformation.

Key words: ADC, system of coarse-precise reference, dynamic characteristics

REFERENCES

- [1] Gitis E.I., Piskulovof E.A. Analog-digital converters: A manual for universities. M.: Energoatomizdat, 1981. 360 p.
- [2] Nikamin V.A. Analog-digital and digital-to-analog converters. Directory. SPb.: Crown print of “Alteks-A”, 2003. 224 p.
- [3] Babich N.P., Zhukov I.A. Computer circuitry. Methods of construction and design: Textbook. Kiev: “MK-Press”, 2004. 576 p.
- [4] Hodorovsky A.Z., Nazarov A.V., Azarov A.V., Magomedgadzhiev A.M. Minimization of volume of data at the exit of an analog-to-digital converter at the given error of transformation. M.: MAI, Trudy MAI Online magazine. No. 84. 2014.

Article history:

Received: August 2017

Accepted: September 2017

For citation:

Hodorovsky A.Z., Nazarov A.V. (2017) Analysis of performance a scanning analog-digital converter of the “time-impulse” type with a coarsely-accurate system of a counting. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 373–381. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-373-381

Bio Note:

Khodorovsky Alexander Zinovievich, Cand.Tech.Sci., Associate Professor of Information Technologies in the Design of Radioelectronic Devices, Moscow Aviation Institute (MAI). *Research interests*: digital electronics, analog-to-digital and digital-to-analog conversion of signals, theory of automata, pipelining of data. *Contact information*: e-mail: ahazz@mail.ru

Aleksandr V. Nazarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technology of Radio Electronic Device Design, Moscow Aviation Institute (MAI). *Research interests*: design automation and automation control systems for design of radio electronic devices. *Contact information*: e-mail: rat-rut@yandex.ru