

## УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОТ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНТЕГРИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ В ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ

В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев

Рынок интегрирующих АЦП сегодня представлен преобразователями сигма-дельта архитектуры ( $\Sigma\Delta$ -АЦП) и преобразователями напряжение-частота (ПНЧ). На отечественном рынке средств измерений (СИ) также продолжают применяться интегрирующие преобразователи многотактного типа (многотактного интегрирования).

Преобразователи напряжение-частота отличаются малыми габаритными размерами на кристалле, малым энергопотреблением, высокой экономичностью. Разрядность СИ на базе ПНЧ достигает до 16 бит. Данные преобразователи применяются, как правило, в специализированных областях, например, в системах телеметрии, где устанавливаются непосредственно на объекте контроля, и связываются с измерителем частоты по телеметрическому каналу связи (при этом частота, как унифицированный сигнал, характеризуется повышенной помехоустойчивостью при передаче по линиям связи) [1].

При удовлетворении имеющихся требований по быстродействию  $\Sigma\Delta$ -АЦП практически во всех случаях наиболее полно соответствуют совокупности требований по точности, надежности и простоте реализации. Разрядность выпускаемых микросхем  $\Sigma\Delta$ -АЦП достигает 32 бит (например, ADS1262). Не последнюю роль в их господстве на рынке интегрирующих преобразователей играет возможность производства по технологии изготовления цифровых микросхем [1–4].

Следует отметить, что теория и практика  $\Sigma\Delta$ -АЦП являются зарубежной разработкой, и основные достижения в данной области, а также конкретные архитектуры преобразователей, закреплены патентами США и Европы, принадлежащими фирмам производителям. Для построения отечественных СИ прецизионного класса, по мнению авторов, в качестве альтернативы алгоритмам  $\Sigma\Delta$ -преобразования при устранении определенных недостатков могут использоваться алгоритмы интегрирующего преобразования в относительный интервал времени [5].

Рассмотрим алгоритм интегрирующего преобразования в относительный интервал времени с двумя пороговыми напряжениями (рис. 1). В алгоритме развертывающая функция  $R(t)$  формируется поочередным интегрированием суммы или разности входного  $U_x$  и опорного  $U_0$  напряжений. Смена полярности опорного напряжения выполняется в моменты времени, соответствующие началу очередного такта синхронизации  $T_0$  (показаны вертикальными курсивными линиями), при условии, что на предыдущем такте синхронизации развертывающая функция  $R(t)$  пересекла положительный или отрицательный пороговый уровень  $U_n$ .

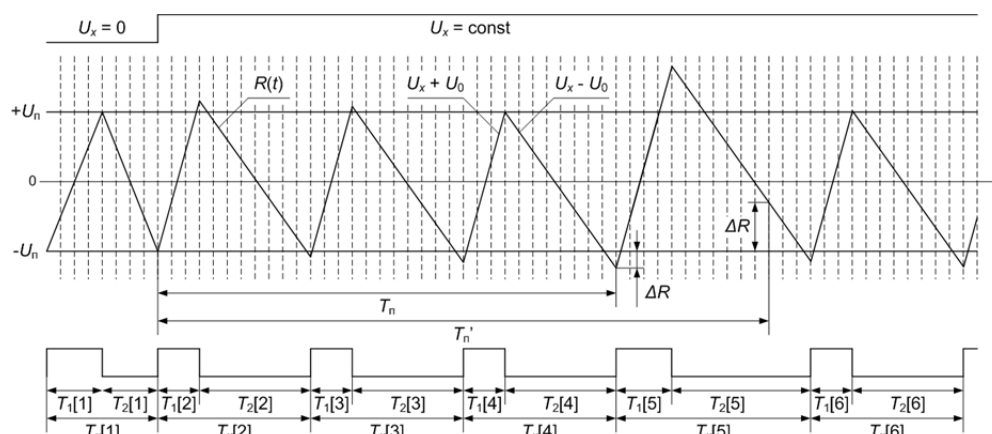


Рис. 1. Временные диаграммы работы интегрирующего АЦП с двумя пороговыми напряжениями

Существенными недостатками, ограничивающими практическое применение описанного алгоритма, являются:

- 1) наличие длительного переходного процесса, возникающего при подключении или скачкообразном изменении входной величины;
- 2) наличие методической погрешности от краевых эффектов.

Методическая погрешность преобразования интегрирующего АЦП в общем случае определяется отклонением от нуля разности между значениями развертывающей функции  $R(t)$  в начале и конце интервала преобразования:

$$R(t_k) - R(t_n) \neq 0.$$

При этом выделяют методическую погрешность квантования и методическую погрешность от краевых эффектов. Первая определяется величиной  $T_0$  и не превышает  $\Delta R_{\max} = \frac{2U_0 T_0}{\tau}$ , где  $\tau$  – постоянная времени интегратора. Погрешность от краевых эффектов состоит в асинхронности частных  $T_x$  и полных  $T_n$  циклов преобразования и по своей величине может существенно превосходить погрешность квантования. На временной диаграмме (рис. 1) интервалы преобразования  $T_n'$  и  $T_n$  характеризуются соответственно наличием и отсутствием данной погрешности [5].

Длительность частных циклов  $T_x$  для различных значений преобразуемого напряжения  $U_x$  будет различной, более того, при возникновении переходного процесса, величина  $T_x$  будет изменяться и при неизменности  $U_x$  (интервал  $T_x$  [6] на рис. 1). Таким образом, в случае фиксированной длительности интервала преобразования  $T_n$  без принятия специальных мер обеспечить отсутствие погрешности от краевых эффектов не представляется возможным.

С целью снижения погрешности от краевых эффектов осуществляют уменьшение амплитуды развертывающей функции  $R(t)$  за счет изменения величины порогового напряжения в процессе преобразования [4]. При этом известны способы ступенчатого изменения  $U_n$ , например в пять раз (рис. 2, а), способы линейного уменьшения (рис. 2, б), а также их комбинации [4, 7].

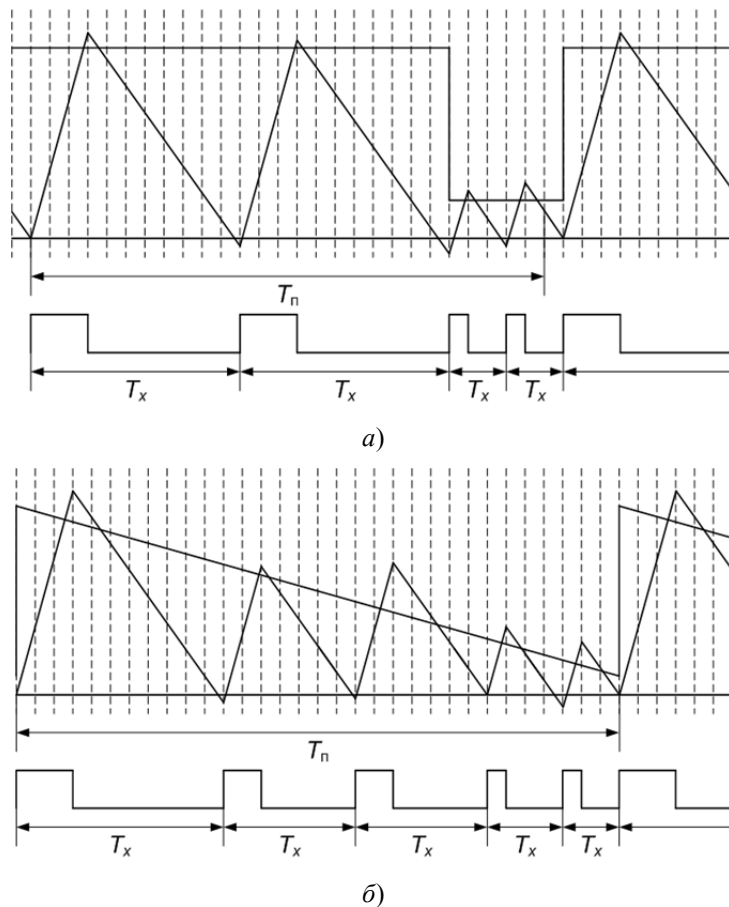


Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие способы уменьшения погрешности от краевых эффектов

Практической реализации данных способов присущи известные недостатки: возрастает число переключений опорного напряжения  $U_0$ , приходящееся на полный цикл преобразования. Увеличение числа переключений опорного напряжения служит источником инструментальной погрешности ввиду нестабильности фронтов импульсов опорного напряжения (следствие конечного времени перехода коммутационных элементов из одного состояния в другое), а также из-за ограниченной полосы пропускания операционного усилителя интегратора [4].

Использование последнего алгоритма сопряжено с техническими трудностями ввиду необходимости постепенного уменьшения разности двух пороговых уровней, таким образом, чтобы она достигла минимума (например, нуля) в заранее заданный (при фиксированном  $T_n$ ), а иногда и заранее неизвестный момент времени (например, при подстройке интервала преобразования под период сетевой помехи) [8, 9].

Для решения задачи уменьшения погрешности от краевых эффектов предлагается осуществлять изменение пороговых напряжений, не по заранее заданному правилу, а на основе информации о преобразуемой величине, получаемой в процессе преобразования. Временная диаграмма работы соответствующего алгоритма интегрирующего преобразования представлена на рис. 3. Формирование напряжений пороговых уровней осуществляется на частных интервалах преобразования  $T_{пч}$ , каждый из которых состоит из целого числа частных циклов интегрирования  $T_x$ . Причем величина пороговых уровней рассчитывается для каждого нового частного интервала интегрирования согласно выражению

$$U_{п} = \left| \frac{U_x^2 - U_0^2}{U_0} \right|, \quad (1)$$

где  $U_x$  – величина входного напряжения, вычисленная за  $k = 1, 2, \dots$  ( $k$  – целое число) предшествующих частных интервалов преобразования.

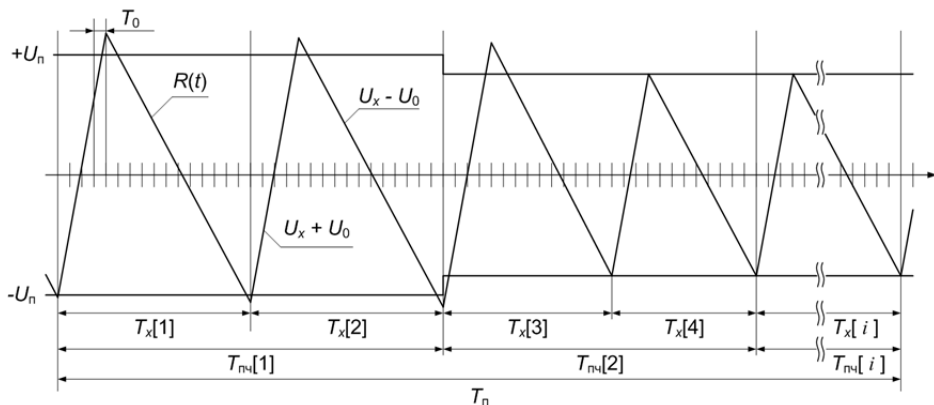


Рис. 3. Временная диаграмма работы, иллюстрирующая предложенный способ формирования пороговых напряжений

Рассмотрим предлагаемый алгоритм на конкретном примере. Пусть  $U_0 = U_{п} = 10\text{В}$ ,  $\tau = 5T_0$ , при  $U_x = 0\text{В}$  длительность частного цикла интегрирования  $T_x = T_1 + T_2 = (10 + 10)T_0 = 20T_0$ , при подаче  $U_x = 3\text{В}$  длительность первого частного цикла составит:  $T_x = (8 + 15)T_0 = 23T_0$ . При идеальной подстройке согласно выражению (1) пороговое напряжение будет равно  $U_{п} = 9,1\text{В}$ . Длительность  $T_1 = 2U_{п}\tau / (U_x + U_0) = 7T_0$ , а  $T_2 = 2U_{п}\tau / (U_x - U_0) = 13T_0$ , следовательно,  $T_x = 20T_0 = \text{const}$ .

Таким образом, в случае идеальной подстройки пороговых напряжений обеспечивается постоянство длительностей частных циклов  $T_x$ , а время переходного процесса определяется временем, затрачиваемым на вычисление нового значения  $U_{п}$ , после изменения  $U_x$ . При этом задание фиксированной длительности интервала преобразования  $T_n$  в виде целого числа частных интервалов интегрирования  $T_x$  обеспечит устранение погрешности от краевых эффектов.

#### Список литературы

1. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер ; пер. с англ. ; под ред. Е. Б. Володина. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.

2. Официальный сайт фирмы Texas Instruments. – URL: <http://www.ti.com>, свободный (дата обращения: 01.10.2014).
3. Шахов, Э. К.  $\Sigma\Delta$ -АЦП: Процессы передискретизации, шейпинга шума квантования и децимации / Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 50–57.
4. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
5. Шахов, Э. К. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
6. Ашанин, В. Н. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования: моногр. / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2009. – 214 с.
7. Лысенко, А. В. Аппаратное обновление электронных устройств на основе 3PLD кристаллов / А. В. Лысенко, Д. И. Морозов, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2011. – Т. 2. – С. 186–187.
8. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
9. Yurkov, N. K. Measurement of the parameters of three-element nonresonance two-terminal networks at a fixed frequency / N. K. Yurkov, M. V. Klyuev, E. V. Isaev // Measurement Techniques. – 2013. – V. 55. – February. – Issue 6, 11. – P. 1267–1274.

**Юрманов Валерий Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных технологий и систем,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(440039, Россия, г. Пенза,  
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)  
(841-2)49-60-09  
E-mail: YurmanovVA@gmail.com

**Пискаев Кирилл Юрьевич**

старший преподаватель,  
кафедра информационных технологий и систем,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(440039, Россия, г. Пенза,  
проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)  
(841-2)49-60-09  
E-mail: PiskaevK@gmail.com

**Аннотация.** Алгоритмы интегрирующего преобразования в относительный интервал времени без пропусков информации на сегодняшний день не находят широкого применения в измерительных системах прецизионного класса. Причина этого состоит в наличии переходного процесса и методической погрешности от краевых эффектов, присущих данным алгоритмам. При этом известные способы уменьшения указанной погрешности существенно увеличивают требования к характеристикам применяемой элементной базы, а следовательно, и технологии производства. При устранении данных недостатков интегрирующие АЦП на базе рассматриваемых алгоритмов могут составить конкуренцию господствующим на рынке  $\Sigma\Delta$ -АЦП. В работе предлагается решение поставленной задачи для алгоритма интегрирующего преобразования в относительный интервал времени, состоящее в способе формирования пороговых напряжений на основе оценки входной величины непосредственно в процессе преобразования.

**Ключевые слова:** аналого-цифровые преобразователи

**Yurmanov Valeriy Anatol'evich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information technologies and systems,  
Penza State Technological University  
(440039, 1a/11 Baydukova travel / Gagarina street,  
Penza, Russia)

**Piskaev Kirill Yur'evich**

senior lecturer,  
sub-department of information technologies and systems,  
Penza State Technological University  
(440039, 1a/11 Baydukova travel / Gagarina street,  
Penza, Russia)

**Abstract.** Algorithms of integrating conversion in the relative time interval today are not widely used in precision measuring systems. Because these algorithms have a long transition process and systematic error of edge effects. Known methods for reducing this error significantly increases the performance requirements applicable electronic elements, and therefore the production technology. With the elimination of these drawbacks ADC based on these algorithms can compete with the  $\Sigma\Delta$ -ADC. This paper proposes a solution to the problem consists in the process of formation of the threshold voltages on the basis of a rough measurement of the input voltage directly to the conversion process.

**Key words:** analog-to-digital converters integrating type;

ли интегрирующего типа; погрешность от краевых эффектов; методические погрешности АЦП; повышение точности интегрирующих АЦП; переходные процессы в интегрирующих преобразователях.

error of edge effects; methodological ADC errors; improving the accuracy of ADC; transient processes in integrating converters.

**УДК 621.3.087.92**

***Юрманов, В. А.***

**Уменьшение погрешности от краевых эффектов в интегрирующих преобразователях в относительный интервал времени / В. А. Юрманов, К. Ю. Пискаев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 38–42.**