

УДК 681.324.687

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
БЕЗКОНДЕНСАТОРНОГО АЦП НА ОСНОВЕ СКЛАДЫВАЮЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

*Кононов В.С., к.т.н., ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем»,
e-mail: casandra1983@mail.ru.*

**TECHNIQUE FOR INCREASING PRECISION
OF ADC WITHOUT SWITCHED-CAPACITORS USING FOLDING AMPLIFIERS**

Kononov V.S.

Ключевые слова: АЦП, безконденсаторное, архитектура, усилитель, складывающийся, точность.

Введение

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) без использования конденсаторов в качестве элементов хранения промежуточной информации в процессе преобразования применяются пока достаточно редко. Основной сферой их применения являются приложения, которые предполагают выполнение преобразований одним АЦП в широком диапазоне частот от нескольких килогерц до 1 ГГц и выше. Известно, что наличие конденсаторов в скоростных АЦП затрудняет их применение на низких частотах из-за влияния токов утечки на зарядовое состояние конденсаторов, емкость которых в таких АЦП относительно невелика.

Причин возникновения и нарастания токов утечки множество. В основном это связано с эффектами старения полупроводниковой структуры и влиянием эксплуатационных факторов [1, 2].

В настоящее время наибольшую известность получила архитектура с трехступенчатым конвейером и с, так называемой, двойной сверткой, которая применяется в 5-разрядных секциях безконденсаторных АЦП на основе трехвходовых складывающихся усилителей [1, 3] (рис. 1).

С помощью восьми таких усилителей 24-разрядный термокод, получаемый на выходе первой ступени, дважды свертывается, сначала во второй ступени, а затем в третьей ступени, и преобразуется в 32-разрядный термо-

Рассмотрены основные этапы развития безконденсаторной архитектуры АЦП. Приведены известные и новые способы повышения точности преобразования. Показано, что новый способ, основанный на использовании переменной длительности единичных сигналов термокода, обеспечивает наиболее высокую точность преобразования по сравнению с известными способами.

код на выходе третьей ступени. После этого термокод окончательно преобразуется в двоичный код, который выводится наружу. На этом процесс аналого-цифрового преобразования завершается.

Такой алгоритм в чистом виде обычно не используется, так как в процессе преобразования возникает большое количество ошибок.

Для преодоления отмеченного недостатка в работе [3] предложена архитектура, во второй и третьей ступенях которой авторы используют по одному дополнительному складывающему усилителю. Такой подход позволил свести процесс преобразования во всех ступенях к единому временному интервалу.

В результате основной источник ошибок был устранен, но изменившаяся из-за этого разрядность термокода на выходе третьей ступени с 32 бит до 36 бит создала новые проблемы при его преобразовании в двоичный код.

В работе [4] возникшие проблемы были решены ценой некоторого ухудшения точности преобразования путем усреднения 36-разрядного термокода и считывания только 32 бит такого кода. Не вдаваясь в подробности, отметим, что это стало возможным при соотношении тактовых частот на входе и выходе АЦП: $f_{Тех} / f_{Твых} = 9 / 8$, что не совсем удобно на практике.

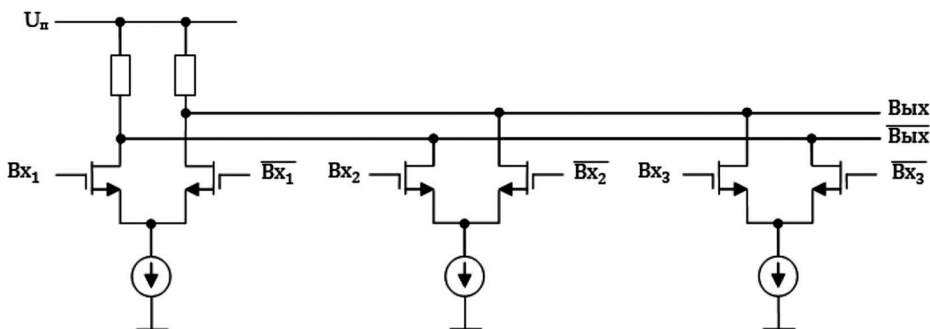


Рис. 1. Складывающийся усилитель: U_n – напряжение питания

Для приведения АЦП к единой тактовой частоте на его входе и выходе пришлось использовать встроенный блок ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты), блок-схема которого показана на рис. 2.

Однако, как показали исследования, использование такого блока сталкивается с проблемой устойчивости петли ФАПЧ, нивелирование которой трудно гарантировать. Кроме того, само по себе применение ФАПЧ в АЦП приводит к появлению дополнительного фазового шума, что ухудшает соотношение «сигнал-шум». По этим соображениям пришлось модифицировать безконденсаторную архитектуру без изменения принципа двухступенчатого свертывания, но отказавшись от использования блока ФАПЧ.

В итоге каждый компаратор в первой ступени был дополнен устройством, которое позволяет получать термокод с переменной длительностью единичных сигналов на выходе компаратора (рис. 3).

Всего таких компараторов двадцать два.

Как следует из рис. 4, сигнал с минимальной длительностью, равной периоду сигнала TC_0 , которая в свою очередь в 3 раза меньше типовой длительности, равной периодам сигналов TC_2 - TC_4 , появляется только тогда, когда нарастание входного сигнала (на рис. 4 не

показан) сменяется его спадом или наоборот.

Во второй ступени, как было отмечено выше, используются восемь складывающих усилителей. На выходе каждого такого усилителя находятся три защелки (рис. 5).

Для сохранения высокой точности преобразования с учетом переменной длительности сигналов на выходах первой ступени в схемы управления работой двух нижних защелок на рис. 5 внесены дополнения, назначение которых вытекает из рассмотрения этого рисунка. Сигнал C_1 зависит от изменения напряжения на входе АЦП. При нарастании этого напряжения сигнал C_1 стремится к нулю, а при спаде – к $U_{п.}$

В третьей ступени также используются восемь складывающих усилителей, но с четырьмя защелками на выходе каждого усилителя.

Модификация третьей ступени проведена аналогичным образом. В результате на выходе этой ступени в отличие от рассмотренных в работах [3, 4] случаев сразу появляется 32-разрядный термокод, который преобразуется в выходной двоичный код без потери точности. При этом тактовые частоты на входе и выходе АЦП сохраняются одинаковыми. Иногда между ними устанавливается четное соотношение, например, при использовании многопортового выходного интерфейса.

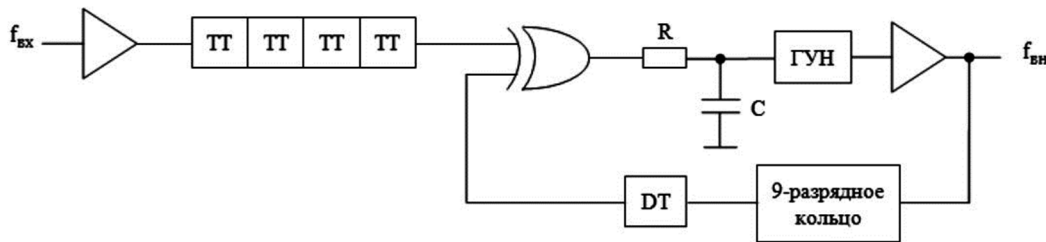


Рис. 2. Блок-схема ФАПЧ: ТТ и DT – T- и D-триггеры; ГУН – генератор управляемый напряжением; R и C – параметры зарядовой помпы

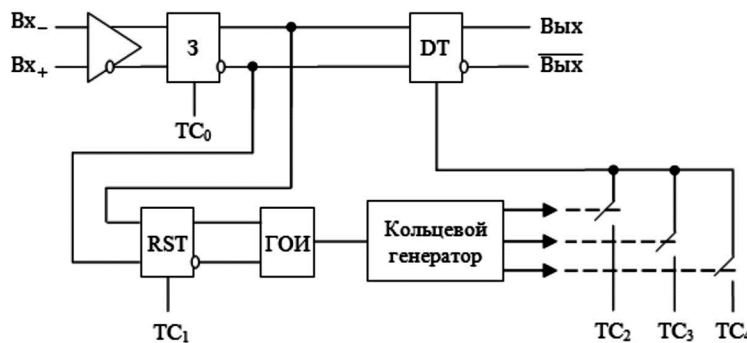


Рис. 3. Компаратор с устройством формирования термокода:

3 – защелка; RST – триггер RS типа; ГОИ – генератор одиночных импульсов; B_{x+} и B_{x-} – аналоговые входы; $B_{ых}$ и $\overline{B_{ых}}$ – цифровые выходы; TC_0 – TC_4 – тактовые сигналы

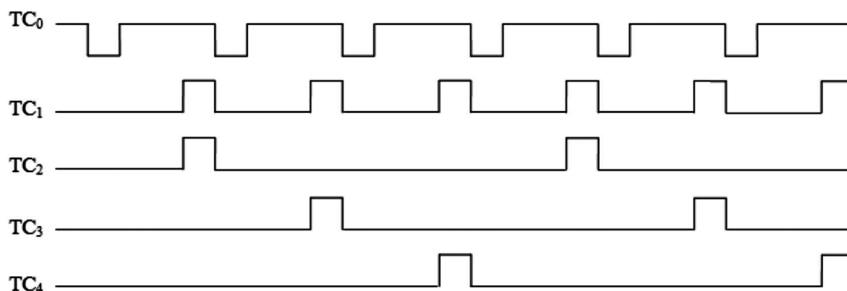


Рис. 4. Временная диаграмма тактовых сигналов

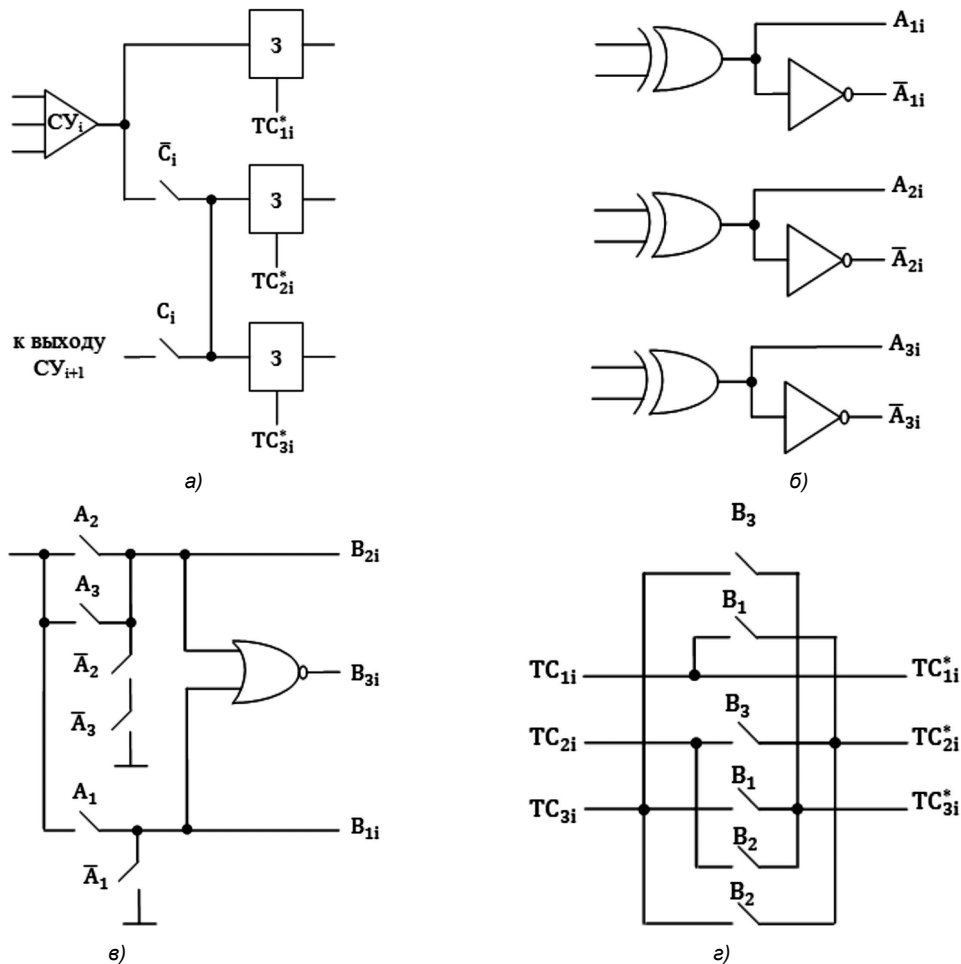


Рис. 5. Модифицированные схемы управления защелками на выходе i -го складывающего усилителя (CY_i): $TC_1, TC_2, TC_3, TC_{1i}^*, TC_{2i}^*, TC_{3i}^*$ – тактовые сигналы

На основе описанного способа разработана модель 12-разрядного КМОП-АЦП с программируемым выходным интерфейсом (4 КМОП-порта или 2 LVDS-порта). При использовании КМОП-технологии с проектными нормами 0,18 мкм каждый КМОП-порт обеспечивает частоту следования выходного кода до 125 МГц, а каждый LVDS-порт – до 500 МГц. В итоге частота преобразования в КМОП-режиме достигает 500 МГц, а в LVDS-режиме – до 1 ГГц. При этом статические и динамические характеристики такого АЦП находятся в пределах стандартных требований.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование термокода с переменной длительностью единичных сигналов в каждой ступени преобразования в 5-разрядной секции АЦП обеспечивает непосредственное получение 32-разрядного кода и, в итоге, более высокую точность преобразования по сравнению с известными способами.

2. Предложенный способ не требует использования процедуры ФАПЧ, которая вносит ошибки преобразования при согласовании тактовых частот внутри конвейера и на выходе АЦП и ухудшает соотношение «сигнал-шум».

3. Разработанная на основе предложенного способа модель АЦП обеспечивает устойчивое преобразование и высокую точность в широком диапазоне частот от единиц килогерц до 1 ГГц.

Литература

- Rudy van de Plassche. CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters [Text] / Rudy van de Plassche. – Kluwer academic publishers, 2003. – 588 p.
- Анашин В.С. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов [Текст] / В.С. Анашин, В.В. Бодин, В.Ф. Герасимов [и др.]; под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.
- Taft R.C. A 1.8-V 1.6-GSample/s 8-b Self-calibrating Folding ADC with 7.26 ENOB at Nyquist frequency [Text] / R.C. Taft and al // IEEE Journal of Solid-state Circuits. – 2004. – vol. 39. – №12, p. 2107–2115.
- Рембеза С.И. Высокоскоростной безконденсаторный КМОП-АЦП с интерполирующими защелками и реверсируемым тактированием [Текст] / С.И. Рембеза, В.С. Кононов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – №2, С. 23-26.