

Раздел II. Сложнофункциональные блоки смешанных систем на кристалле

УДК 621.372

Е.А. Жебрун

ИМПУЛЬСНО-ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ АЦП СМЕШАННЫХ СНК В КМОП-БАЗИСЕ

Рассмотрено решение задачи аналого-цифрового преобразования на базе принципа частотного (импульсного) преобразования исходных физических величин. Структурная организация АЦП обеспечивает многоканальный ввод данных в область оперативной памяти микроконтроллера и оценку производной входной величины. Для технологического процесса SGB25VD в КМОП-базисе разработан комплект принципиальных схем базовых узлов АЦП. Приведены результаты моделирования 14-разрядного АЦП в среде Cadence Virtuoso. Сформулированы выводы и показаны пути повышения точности преобразования.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП); системы на кристалле (СНК); сложно-функциональные блоки (СФ блоки).

E.A. Zhebrun

PULSE-POTENTIAL ADCS OF MIXED SOC IN CMOS-BASIS

We consider the solution of analog-digital conversion based on the principle of the frequency (pulse) transformation of initial physical quantities. The structural organization of the ADC provides a multichannel input into the area of microcontroller's RAM and evaluation of input quantity derivative. For technical process SGB25VD in CMOS-basis we developed principal schemes of basic ADC nodes. The simulation results of 14-bit ADC in Cadence Virtuoso are presented. We made the conclusions and showed ways of accuracy improvement.

Analog-digital converter (ADC); systems on chip (SoC); integral project blocks (IP blocks).

При осуществлении аналого-цифрового преобразования (АЦП) в задачах автоматического управления и технической диагностики в большинстве случаев возникает необходимость контролировать большое количество физических величин. Традиционно это осуществляется мультиплексированием каналов и требует использования специальных ограничителей спектра входного сигнала. Как следствие, значительно возрастает расход прецизионных аналоговых компонентов на один аналоговый порт. Цифровое ядро такой системы на этапе преобразования переводится в sleep-режим, поэтому общая производительность системы падает с ростом числа каналов преобразования.

Стремление реализовать смешанные микроэлектронные системы как системы на кристалле (СНК) является мощным стимулом для развития аналоговой микросхемотехники на КМОП-транзисторах. При этом применение КМОП-транзисторов в аналоговой микросхемотехнике как альтернатива биполярным структурам при любых технологических нормах существенно уменьшает достижимый диапазон рабочих частот, а в ряде случаев – и динамический диапазон проектируемых схем [1].

На сегодняшний день одной из самых перспективных и недорогих технологий является субмикронная высокочастотная SiGe-технология, предлагаемая компаниями

ИНР (Германия). В рамках основанного на данной технологии удешевлённого техпроцесса SGB25VD доступны как аналоговые (БиКМОП), так и цифровые (КМОП) транзисторы. Это обеспечивает хорошую основу для создания смешанных СнК.

В данной работе рассматривается создание в КМОП-базисе АЦП как СФ-блока СнК. Отказ от использования биполярных транзисторов обусловлен стремлением ещё более упростить и удешевить процесс изготовления кристаллов, когда и аналоговая часть, и цифровое ядро выполняются только на полевых транзисторах. Задача такого аналого-цифрового преобразования решается на базе принципа частотного (импульсного) преобразования исходных физических величин [2]. Как было показано в [3], этот подход позволяет достигнуть повышения разрядности АЦП и обеспечивает хорошую интеграцию аналоговой и цифровой частей системы. Использование КМОП-транзисторов техпроцесса SGB25VD позволило перейти к структуре, изображённой на рис. 1.

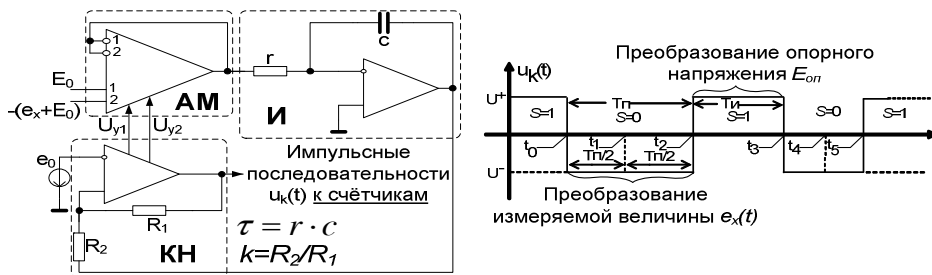


Рис. 1. Структурная схема АЦП импульсно-потенциального типа (слева) и временная диаграмма его работы (справа)

В импульсно-потенциальном АЦП преобразование длительности паузы (T_n) и длительности импульса (T_u) в цифровой код осуществляется в счетчиках контроллера с методической погрешностью, определяемой периодом тактовых импульсов ($2t_n$) его кварцевого генератора. Числовое значение T_u и T_n определяется из следующего соотношения:

$$T_u = \tau k \frac{U^- + U^+}{E_{on}}, T_n = \tau k \frac{U^- + U^+}{e_x(t) + E_{on}}. \quad (1)$$

При этом из структуры порта ввода исключаются собственно АЦП и ограничитель спектра входного аналогового сигнала.

Жесткая корреляция длительности импульсов на каждом периоде преобразования ($T = T_u + T_n = t_3 - t_0$) позволяет практически исключить влияние пассивных элементов на точность АЦП, при условии, что параметры (E_{on} и T_u) остаются постоянно на этом периоде. Следовательно, измеряемая величина e_x может быть вычислена из формулы

$$e_x(t) = \frac{T_u - T_n}{T_n} E_{on}. \quad (2)$$

Важным свойством такой структуры является возможность прямого доступа к памяти контроллера при любом числе входных каналов, а также их параллельная работа вместе с МК [4].

Базовыми узлами импульсно-потенциального АЦП являются компаратор (КН), аналоговый мультиплексор (АМ) и интегратор (И), реализуемые на базе операционных усилителей (ОУ) (рис. 1). Именно качественные показатели ОУ, и в первую очередь напряжение дрейфа для И и АМ, а также частота единичного усиления усилителя в режиме КН, определяют метрологические характеристики всего устройства.

Компаратор АЦП реализован на базе специально разработанного высокочастотного ОУ и обладает высокими скоростными характеристиками (табл. 1), а его выходная цепь позволяет управлять токовыми ключами мультиплексора.

Таблица 1

Параметры КН

v^+ , кВ/мкс	v^- , кВ/мкс	t_{ϕ}^+ , нс	t_{ϕ}^- , нс	U^+ , В	U^- , В	f_I , ГГц
9,8	2,1	2,2	4,2	2,5	-4	1

Полученные параметры достигаются за счёт использования каскадных структур и цепей собственной компенсации влияния дифференциального сопротивления цепи сток-исток [5]. Основной особенностью схемы являются дополнительные компенсирующие обратные связи, направленные на расширение диапазона рабочих частот [6]. Параметрическая оптимизация каскадов компаратора позволила повысить его быстродействие без изменения гистерезисного напряжения, которое не превышает 5 мкВ, что практически точно совпадает с условием линейности ОУ.

Мультиплексор является мультидифференциальным операционным усилителем с общей двухканальной обратной связью и работающим по принципу логического ИЛИ отдельных каскадов. В его основу заложен аналогичный ОУ с дополнительным дифференциальным каскадом, что в конечном итоге обеспечивает высокие метрологические параметры (табл. 2) и высокую температурную стабильность ЭДС-смещения (рис. 2).

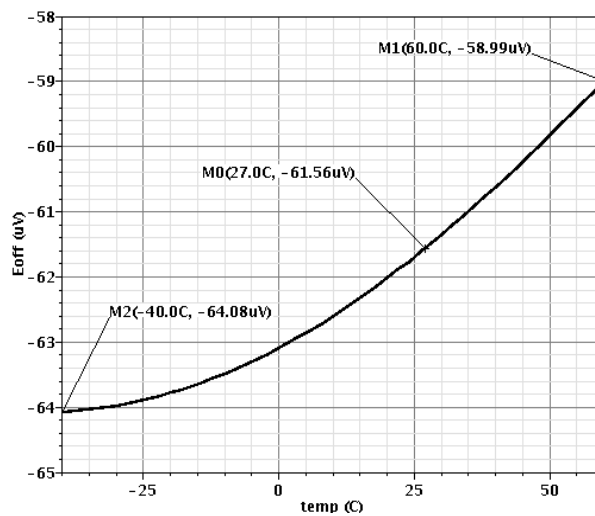


Рис. 2. Зависимость ЭДС-смещения ОУ мультиплексора от температуры

Общая структура МОУ с включёнными в неё цепями собственной и взаимной компенсации позволяет уменьшить дрейф нуля. Относительно небольшой технологический разброс номиналов элементов способствует идентичности каналов. Цепи переключения каналов мультиплексора интегрированы в выходную цепь компаратором (управляющие напряжения U_{y1} и U_{y2} , рис. 1). Результаты моделирования АМ показаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры мультиплексора

K_D , дБ	K_{DCCK} , дБ	f_I , ГГц	$E_{см}$, мкВ ($40^\circ C \leq t \leq 60^\circ C$)	U_{max}^+ , В	U_{max}^- , В
0	-160	1	60	2	-3

Так как при изменении температуры от -40 до 60 °C изменение E_{CM} мультиплексора не превысило 3 мкВ , систематическая составляющая погрешности может быть скомпенсирована за счёт введения дополнительных внешних источников ЭДС по каждому из входов МОУ.

К интегратору импульсно-потенциального АЦП предъявляются следующие требования: низкий уровень напряжения дрейфа и высокая линейность интегрирования. В данном узле использован ОУ, входящий в состав КН. В линейном режиме его коэффициент усиления составляет 120 дБ, а $E_{CM} = 60$ мкВ, что обеспечивает отклонение от идеальной характеристики не более чем на 8 мкВ во всём временном диапазоне интегрирования (рис. 3). Такой результат является достаточным для обеспечения высокой (до 16 бит) точности всего АЦП.

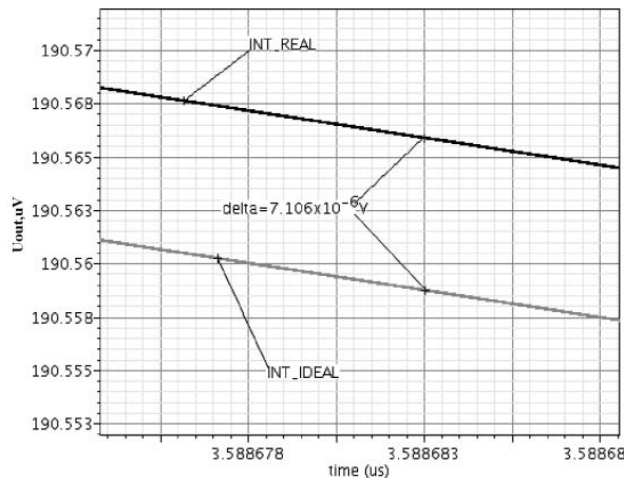


Рис. 3. Вычисление ошибки интегрирования интегратора

На рис. 4 приведена временная диаграмма работы АЦП при подаче на его вход линейно меняющегося напряжения. Результаты моделирования АЦП при различных входных сигналах сведены в табл. 3.

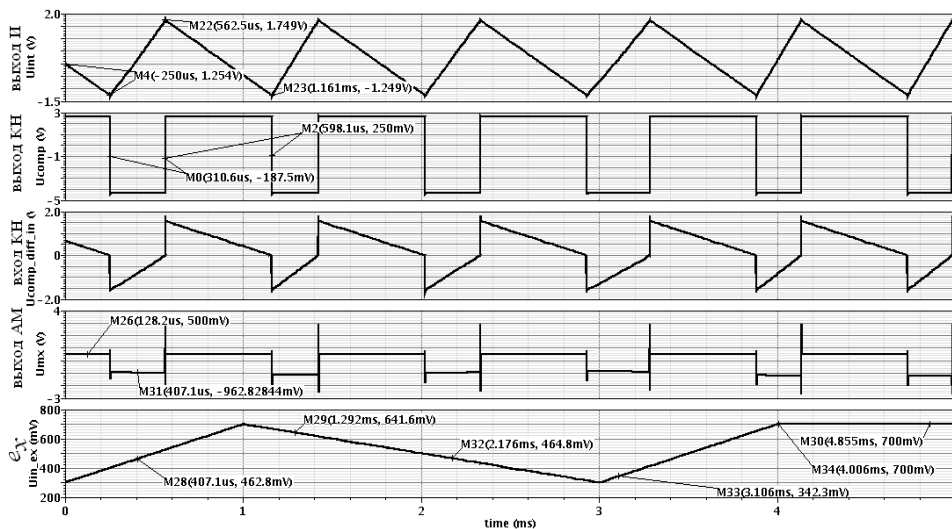


Рис. 4. Временная диаграмма работы АЦП

Приведённая в табл. 3 относительная погрешность измерения входной величины e_x увеличивается при малых (около 50 мВ) входных сигналах и уменьшается при больших (500 мВ) сигналах. Это вызвано тем, что для небольших амплитуд измеряемых сигналов становится существенным влияние напряжения дрейфа всего тракта преобразования. Указанная в табл. 3 погрешность $\delta_{изм}$ соответствует результирующей погрешности метода в системе Cadence Virtuoso. Полученная погрешность обеспечивает 14-разрядную точность АЦ-преобразования.

Таблица 3

Результаты моделирования АЦП при подаче постоянных сигналов

$T_{и\text{ расч}}$, мкс	$T_{и}$, мкс	$T_{п\text{ расч}}$, мкс	$T_{п}$, мкс	$e_{x\text{ вх}}$, мВ	$e_{x\text{ изм}}$, мВ	E_0 , мВ	δ , %	$\delta_{изм}$, %
598,2	598,1	299,1	299,1	500	499,8	500	-0,03	0,0010
598,2	598,1	373,9	373,8	300	300,0	500	<0,01	0,0017
598,2	598,0	498,5	498,4	100	99,9	500	-0,08	0,0050
598,2	597,9	2991,2	2992,0	-400	-400,1	500	0,02	0,0012
598,2	597,9	997,0	996,9	-200	-200,1	500	0,06	0,0025
598,2	598,0	664,7	664,6	-50	-50,1	500	0,21	0,0100

Таким образом, разработанный АЦП позволяет уменьшить технологические требования к компонентам СнК и повысить её производительность. Этот АЦП также не требует прецизионных аналоговых компонентов и позволяет простыми вычислениями (2) обеспечить относительно высокую точность определения измеряемой величины.

Для осуществления одного цикла преобразования необходим период T_u+T_n , что снижает быстродействие АЦП. Однако такие временные затраты оправдывают себя в современных многоканальных системах, где параллельная работа нескольких каналов преобразования в конечном итоге повышает быстродействие СнК.

Увеличение точности преобразования измеряемых величин достигается за счет применения в ОЗУ МК реверсивного счетчика, вычисляющего разницу T_u-T_n в соответствии с выражением (2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коротков А.С.* Интегральные радиоуправляемые устройства связи // Изв. РАН. Микроэлектроника. – 2006. – Т. 35, № 4. – С. 288-305.
2. *Крутчинский С.Г.* Нестандартные аппаратные средства адаптивных регуляторов и систем пассивной локации // Известия РАН. АИТ. – 2001. – № 7. – С. 164-172.
3. *Цыбин М.С., Жебрун Е.А.* Аналого-цифровые преобразователи радиационно стойких СФ блоков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 2 (115). – С. 57-62.
4. *Крутчинский С.Г., Баранов Р.Г.* Аналого-цифровые интерфейсы смешанных систем на кристалле // Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)”. Сборник трудов. – 2008. – № 1. – С. 354-359.
5. *Крутчинский С.Г., Жебрун Е.А., Золотарев А.В.* Повышение коэффициента усиления каскадов на КМОП-транзисторах цепями собственной компенсации // VIII Международный научно-практический семинар «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011 (в печати).
6. *Крутчинский С.Г., Жебрун Е.А., Золотарев А.В.* Расширение диапазона рабочих частот каскадов на КМОП-транзисторах // IX Международный научно-практический семинар «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011 (в печати).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Жебрун Евгений Андреевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: JackJK@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79614038879; кафедра систем автоматического управления; магистрант.

Zhebrun Eugeny Andreevich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: JackJK@mail.ru; 44 Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone. +79614038879; the department of automatic control systems; magister.

УДК 621.372.51

А.В. Золотарев

БЕЗДРЕЙФОВЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ СПЕКТРА С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТ

Рассмотрены принципы построения бездрейфового ограничителя спектра с расширенным диапазоном рабочих частот на базе суперемкости. Показана эффективность использования мультиференциальных операционных усилителей в структуре суперемкости для организации цепей собственной компенсации и минимизации параметрической чувствительности лестничных фильтров. Показано, что использование цепей собственной и взаимной компенсации позволяет получить высокие частотные свойства D-элементов. Для технологического процесса SGB25VD в КМОП-базисе разработана принципиальная схема лестничного фильтра третьего порядка, приведены результаты моделирования в среде Cadence Virtuoso.

Ограничитель спектра; фильтр нижних частот (ФНЧ); суперемкость; мультиференциальный операционный усилитель.

A.V. Zolotarev

DRIFT FREE SPECTRUM LIMITERS WITH WIDENED OPERATING FREQUENCY RANGE

The principles of constructing Drift free limiter range with extension-cussed a range of operating frequencies on the basis of superemkosti. The efficiency of using multiferentialnyh operational amplifiers in the structure for the organization of chains superemkosti own compensation and minimize the parametric sensitivity of the ladder filter. It is shown that the use of chains and their own mutual compensation allows high frequency properties of D-elements. To process in a CMOS SGB25VD basis developed a schematic diagram of a ladder filter of third order, the results of modeling in Cadence Virtuoso.

Spectrum limiter; low pass filter (LPF); supercapacitance; multidifferential operational amplifier.

Создание современных смешанных систем на кристалле (СнК), ориентированных на системы технической диагностики, предполагает разработку входных сложнофункциональных блоков (СФ блоков), обеспечивающих взаимодействие с внешними источниками первичной информации. Одна из наиболее передовых технологий, позволяющих не только значительно улучшить характеристики этих блоков, но и создавать устройства для решения задач в совершенно разных областях – микроэлектронные электромеханические системы (MEMS). Современные MEMS устройства фактически представляют собой результат трехмерной системной интеграции на одном общем носителе микроэлектронных схем и неэлектронных структурных элементов микроустройств, выполняющих сенсорные (измери-