

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.2

УДК 621.396

И.М. Пятак, Е.В. Леонтьев

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В СРЕДЕ LABVIEW

I.M. Piatak, E.V. Leontiev

DESIGN OF ELECTRONIC DEVICES WITH ADJUSTABLE PARAMETERS IN LABVIEW

Изложены общие принципы формирования модели РТУ с учетом цепи управления. Методика проиллюстрирована и практически реализована на примере создания модели конвейерного АЦП разрядностью 12 бит с системой цифровой калибровки и коррекции ошибки усиления стадии. Согласно результатам моделирования, при применении калибровки возможно использование операционных усилителей с коэффициентом усиления 48 дБ вместо 68 дБ, что позволит уменьшить потребляемую мощность АЦП в два раза.

СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ LABVIEW; КОНВЕЙЕРНЫЙ АЦП; ЦИФРОВАЯ КАЛИБРОВКА И КОРРЕКЦИЯ.

This paper shows the advantages of using graphical programming in LabVIEW to design a model of an electronic device with adjustable parameters. The model of the digital gain error calibration and correction system for a 12-bit 200-Ms/s pipelined ADC has been constructed. The results of computer simulation in LabVIEW are presented. As shown, digital error correction can reduce op-amp requirements while maintaining the same SNDR and SFDR ratios. For example, the simulation has shown that operational amplifiers with a DC gain of 48 dB instead of 68 dB can be used in a pipelined ADC with digital correction. This approach can reduce ADC power twofold.

LABVIEW; PIPELINED ADC; DIGITAL GAIN ERROR CALIBRATION AND CORRECTION.

Радиотехнические устройства (РТУ) с регулируемыми параметрами широко используются для создания многофункциональных радиоприемных устройств. При этом необходимо выполнение различных требований, например, по разрядности (динамическому диапазону), тактовой частоте, коэффициенту усиления. Так, полоса частот может варьироваться от 0,2 МГц в системах GSM до 5 МГц в системе WCDMA при требуемой разрядности от 6 до 12 бит для систем WCDMA и GSM соответственно. Коэффициент усиления входного малошумящего усилителя изменяется для стан-

дартов WCDMA и GSM в пределах от 18 дБ до 23 дБ [1]. Данные требования возможно обеспечить применением усилителей с регулируемым коэффициентом усиления, фильтрами с переменной частотой среза, генераторами, управляемыми напряжением, цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей (ЦАП, АЦП) с регулируемой разрядностью, тактовой частотой и потребляемой мощностью.

Для моделирования РТУ с регулируемыми параметрами необходимо создать модель, позволяющую разработчику управлять требуемыми параметрами и характери-

ками устройства. Распространенными средствами для моделирования систем являются MATLAB/Simulink и LabVIEW, поддерживающие основные математические вычислительные методы и снабженные готовыми программными модулями. Программный пакет MATLAB/Simulink создан для решения задач, связанных с моделированием систем управления, цифровой обработки сигналов, коммуникационных систем. Программная среда LabVIEW нацелена на решение более широкого круга задач, связанных как с моделированием систем, так и с обеспечением взаимодействия программы с управляющей аппаратурой сбора, обработки и отображения информации. Таким образом, среда LabVIEW не уступает по функциональным возможностям пакету MATLAB/Simulink, а поддержка управления аппаратным комплексом сбора и обработки данных и возможность перехода к этапу прототипирования РТУ с применением программируемых логических схем (ПЛИС) делает перспективным использование LabVIEW.

Наша цель заключается в разработке методики моделирования блока управления параметрами РТУ в среде LabVIEW. В статье сформулированы общие принципы формирования математической модели РТУ с учетом цепи управления. Методика проиллюстрирована и практически реализована на примере создания модели конвейерного АЦП разрядностью 12 бит.

Принципы формирования модели цепи управления. Основными составляющими модели цепи управления являются:

1. Устройство формирования сигнала управления, которое включает:

- блок формирования сигнала ошибки.

В общем случае сигнал ошибки определяется разностью между откликом управляемого РТУ и эталонным сигналом. В случае конвейерного АЦП источниками ошибок являются технологический разброс параметров элементов при изготовлении, рассогласование плеч дифференциальных каскадов, что приводит к изменению требуемых характеристик устройства по сравнению с номинальными значениями;

- блок формирования эталонного воз-

действия. Данный блок требуется для определения сигнала ошибки и калибровочных коэффициентов для управления параметрами РТУ;

- блок формирования сигнала управления РТУ.

2. Устройство управления параметрами РТУ, которое включает:

- блок формирования алгоритма управления (коррекции);
- блок сопряжения с управляемым РТУ (при необходимости).

В соответствии с изложенными принципами формирования системы управления рассмотрим построение модели конвейерного АЦП с системой цифровой калибровки и коррекции. Управляемым параметром модели является ошибка усиления стадии АЦП. Сигналами управления являются как непосредственно коэффициент усиления по постоянному току операционного усилителя (ОУ) в стадиях конвейера, так и алгоритмы цифровой калибровки и коррекции ошибки усиления стадии.

Построение модели конвейерного АЦП. Создание конвейерных АЦП на основе ОУ с низкой потребляемой мощностью является на данный момент актуальной задачей. В конвейерном АЦП 80 % мощности потребляют операционные усилители [2]. Операционный усилитель с низкой потребляемой мощностью имеет упрощенную структуру и низкий коэффициент усиления по постоянному току. Как следствие, коэффициент усиления стадии конвейера будет отличаться от требуемого значения, что приведет к формированию ошибки усиления. Цифровая калибровка и коррекция ошибки усиления стадии конвейерного АЦП позволит использовать в конвейерном аналого-цифровом преобразователе ОУ с низким коэффициентом усиления [3].

Среда LabVIEW позволяет разработчику использовать как алгоритмы, так и математические уравнения для создания модели РТУ. Например, для управления коэффициентом усиления по постоянному току (DC gain) операционного усилителя на каждой стадии конвейерного АЦП возможно использование выражения в аналитической форме (рис. 1).

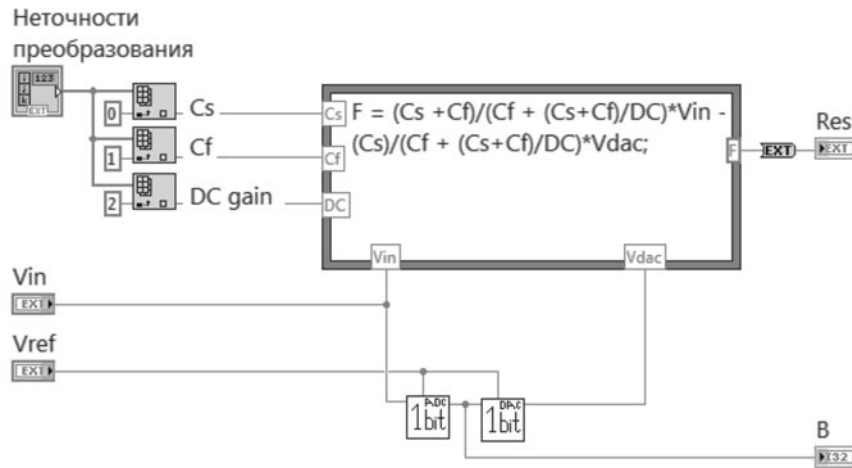


Рис. 1. Модель однобитной стадии конвейерного АЦП

На рис. 2 показана модель конвейерного АЦП разрядностью 12 бит, построенного на основе однобитных стадий преобразования.

Наличие встроенных библиотек помогает разработчику уменьшить время создания модели. Так, библиотека Signal processing имеет программы для построения спектра выходного сигнала РТУ, расчета динамических параметров РТУ, например, отношения сигнал/шум и искажения (SINAD), коэффициента нелинейных искажений (THD). На рис. 3 представлена зависимость эффективного числа бит (ENOB) от коэффициента усиления ОУ (DC gain), величина которого задается для каждой стадии преобразования согласно рис. 1. Эффективное число бит (ENOB) показывает, насколько разрядность преобразователя близка к раз-

рядности идеального АЦП.

Из рис. 3 видно, что конвейерный АЦП близок к идеальному ($ENOB = 12$) при значении DC gain > 80 дБ, что согласуется с теорией [4].

Чтобы уменьшить коэффициент усиления по постоянному току ОУ, сохранив при этом ENOB на высоком уровне, предлагается использовать в схеме конвейерного АЦП цифровую схему калибровки и коррекции ошибки усиления стадии. Под цифровой калибровкой понимается нахождение и сохранение во внутренней памяти АЦП калибровочных коэффициентов. Цифровая коррекция использует калибровочные коэффициенты для исправления ошибок преобразования [5]. Калибровка конвейерного АЦП производится по каскаду, начиная от

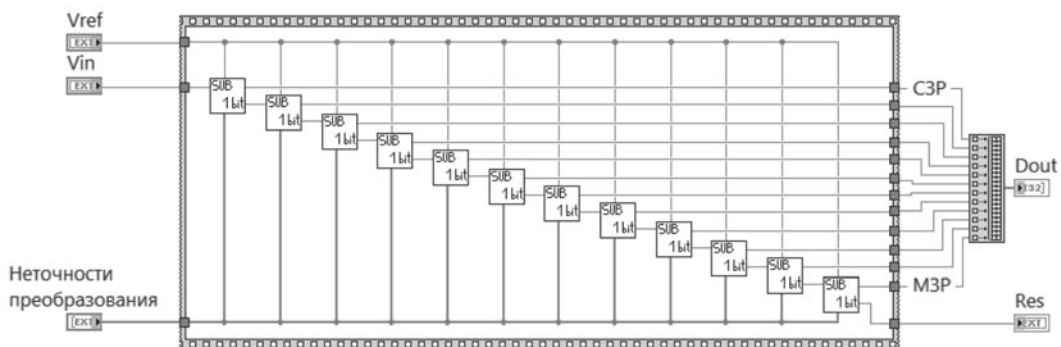


Рис. 2. 12-битный конвейерный АЦП на основе однобитных стадий

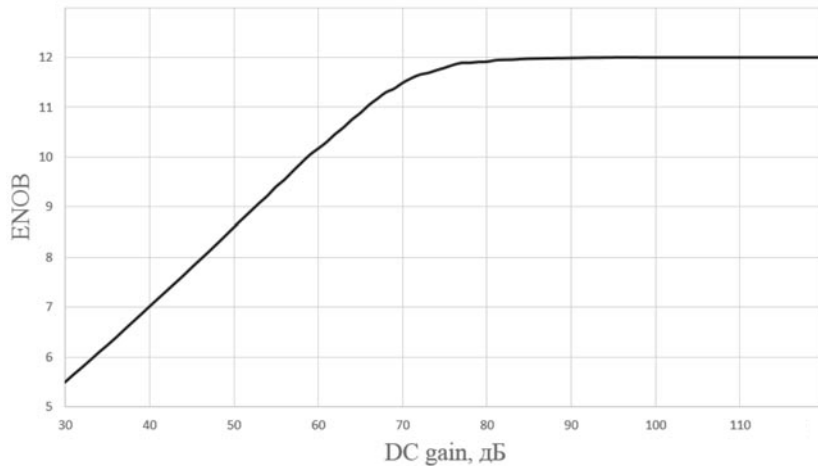


Рис. 3. График зависимости ENOB от DC gain

j -го каскада к более старшему ($j - 1$). На рис. 4 представлен алгоритм калибровки j -го каскада конвейерного АЦП.

Калибровка j -го каскада заключается в подаче на вход калибруемой стадии АЦП опорного напряжения (U_{REF}), деленного на целое число $\left(\frac{U_{REF}}{2}, \frac{U_{REF}}{4}\right)$, цифровое представление (d_{TEST}) данной аналоговой величины заранее известно и записано в память АЦП. Выходное напряжение j -го каскада передается на последующие от него стадии преобразования (АЦП $_{j+1}$), цифровой код которых умножается на калибровочный коэффициент (β_j). Далее формируется выходной код (d_{OUT}) от j -го и от откорректированного кода последующих от него

каскадов преобразования. Ошибка между кодами d_{TEST} и d_{OUT} служит сигналом для нахождения методом наименьших квадратов (МНК) калибровочного коэффициента β_j .

Результаты моделирования. На основе разработанной модели конвейерного АЦП проведено компьютерное моделирование в среде LabVIEW. На рис. 5 представлена зависимость ENOB от DC gain ОУ для конвейерного АЦП с цифровой калибровкой и коррекцией и без нее. Неравномерность представленной зависимости связана с неточностями определения калибровочного коэффициента младшими стадиями конвейерного АЦП.

На рис. 6 изображены спектры выходных сигналов АЦП с калибровкой и без нее. На вход АЦП был подан сигнал с частотой

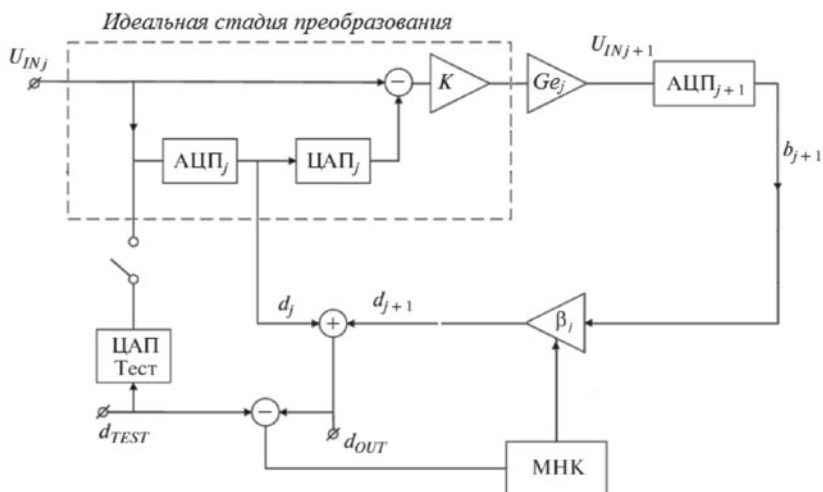


Рис. 4. Алгоритм калибровки j -го каскада конвейерного АЦП

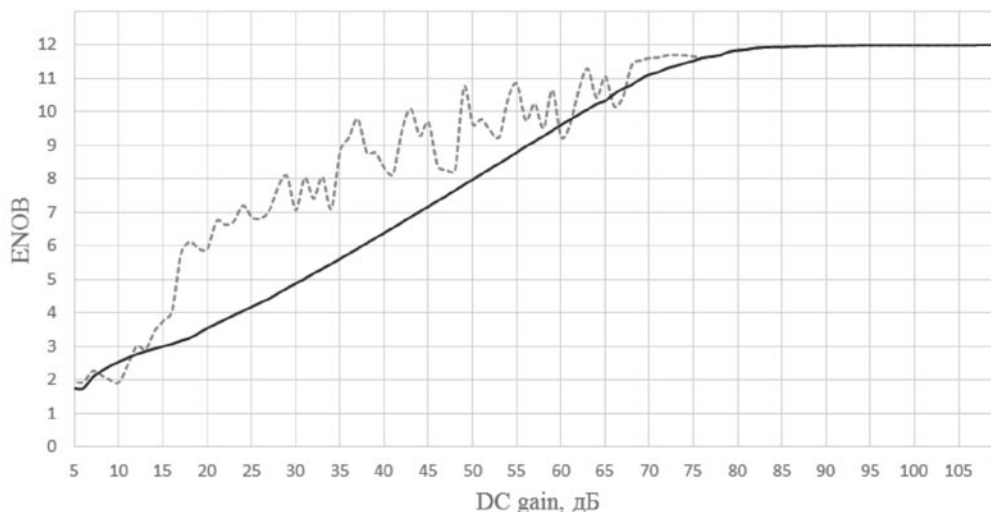


Рис. 5. Зависимость ENOB от DC gain ОУ
 (---) ENOB (АЦП с калибровкой); (—) ENOB (АЦП без калибровки)

5 МГц, тактовая частота равна 200 МГц.

На рис. 6 видно, что калибровка АЦП снижает нелинейность преобразователя и уменьшает амплитуды паразитных гармоник в спектре. При использовании алгоритма цифровой калибровки ошибки усиления динамический диапазон, свободный от гармоник (SFDR), увеличивается с 36 дБ до 64 дБ, при этом коэффициент усиления ОУ по постоянному току составил 37 дБ.

Согласно результатам компьютерного моделирования в среде LabVIEW, эффективнее всего калибровка ведет себя при значениях DC gain порядка 37 и 48 дБ. При DC gain = 37 дБ калибровка позволяет увеличить ENOB до 9,8 бит, что эквивалентно использованию в конвейере без цифровой калибровки ОУ с DC gain ≥ 62 дБ. При зна-

чении DC gain = 48 дБ ENOB = 10,75 бит, такое значение показателя ENOB в АЦП без калибровки может дать ОУ с DC gain ≥ 68 дБ. Выигрыш в уменьшении DC gain в первом случае составит 25 дБ, во втором — 20 дБ. При этом потребляемая мощность ОУ в конвейерном АЦП уменьшится в два раза при использовании ОУ с DC gain = 48 дБ вместо ОУ с DC gain = 68 дБ [6].

В статье описана методика формирования модели РТУ с учетом цепи управления. Практическая реализация методики показана на примере модели конвейерного АЦП разрядностью 12 бит с системой цифровой калибровки и коррекции ошибки усиления стадии. С помощью компьютер-

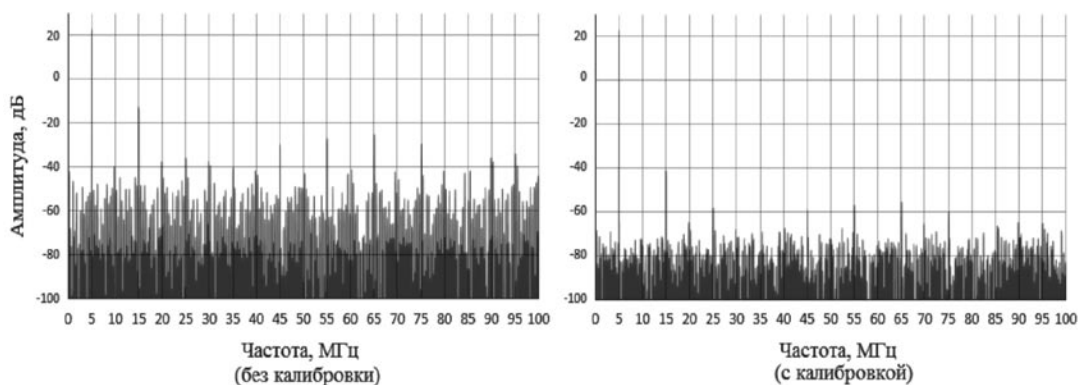


Рис. 6. Спектры выходных сигналов АЦП при DC gain = 37 дБ

ного моделирования в среде LabVIEW дана оценка возможности уменьшения ошибки усиления стадии и повышения соотношения сигнал/шум благодаря использованию цифровой калибровки и коррекции. Показано, что предложенная методика коррек-

ции позволяет использовать в конвейерном АЦП ОУ с пониженным коэффициентом усиления 48 дБ (вместо стандартно требуемых 68 дБ), что позволит снизить потребляемую мощность преобразователя в два раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротков А.С.** Многофункциональные микрoeлектронные радиоприемные устройства систем связи // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2007. № 6. С. 15–30.
2. **Коротков А.С.** Методы калибровки и коррекции аналого-цифровых преобразователей (обзор) // Микроэлектроника. 2014. № 3. Т. 43. С. 228–240.
3. **Murmann B.** Digitally assisted analog circuits // IEEE Micro. 2006. Vol. 26. No. 2. Pp. 38–47.
4. High Speed Data Converters, FE8113 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.iet.ntnu.no/>

courses/fe8113/Slides/Lecture2.ppt (дата обращения: 11.09.2015)

5. **Ракитин В.В.** Конвейерные аналого-цифровые преобразователи с цифровой калибровкой // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. Сб. трудов. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 493–496.
6. **Nieminen T., Halonen K.** Single and Two-stage OTAs for High-Speed CMOS Pipelined ADCs // 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). 2011. Pp. 877–880.

REFERENCES

1. **Korotkov A.S.** Multifunktsionalnyye mikroelektronnyye radiopriyemnyye ustroystva sistem svyazi [Multifunction microelectronic communications radio receivers]. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika [Proceedings of the universities. Electronics]*, 2007, No. 6, Pp. 15–30. (rus)
2. **Korotkov A.S.** Metody kalibrovki i korrektsii analogo-tsifrovyykh preobrazovateley (obzor) [Methods for the calibration and correction of the analog-to-digital converters (review)]. *Mikroelektronika [Microelectronics]*, 2014, No. 3, Vol. 43, Pp. 228–240. (rus)
3. **Murmann B.** Digitally assisted analog circuits, *IEEE Micro*, 2006, Vol. 26, No. 2, Pp. 38–47.

4. High Speed Data Converters, FE8113. Available: <http://www.iet.ntnu.no/courses/fe8113/Slides/Lecture2.ppt> (Accessed 11.09.2015).

5. **Rakitin V.V.** Konveyernyye analogovo-tsifrovyye preobrazovately s tsifrovoy kalibrovkoy [Conveyor ADCs with digital calibration]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem [Problems of development of advanced micro- and nanoelectronic systems]*. Moscow: IPPM RAN Publ., 2010, Pp. 493–496. (rus)
6. **Nieminen T., Halonen K.** Single and Two-stage OTAs for High-Speed CMOS Pipelined ADCs. *20th European Conference on Circuit Theory and Design*, 2011, Pp. 877–880.

ПЯТАК Иван Михайлович – инженер кафедры интегральной электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: i.m.piatak@gmail.com

PIATAK Ivan M. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: i.m.piatak@gmail.com

ЛЕОНТЬЕВ Евгений Владимирович – аспирант кафедры интегральной электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: johnleon010@gmail.com

LEONTIEV Evgeniy V. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: johnleon010@gmail.com