

13. Patent 2012992. МПК 5H03D13/00A. Impul'snyy chastotno-fazovyy detektor [Pulse phase frequency detector], Prokof'ev D.E.; patentoobladatel': Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Polet». Russian Federation, № 4913296/09; zayavl. 21.02.1991; opubl. 15.05.1994.
14. *Chenakin A.* Frequency Synthesizers: Concept to Product. Norwood, MA: Artech House, 2011, 214 p.
15. *Best R.E.* Phase-Locked Loops Design, Simulation, and Applications. 5th ed., New York: McGraw-Hill, 2003, 421 p.
16. *Gentile K.* Design a PLL Filter When Only the Zero Resistor and Capacitor Are Adjustable, Analog Dialogue, 2015, Vol. 49, No. 1. Available at: http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/49-02/PLL_loop_filter.html.
17. *Sistemy fazovoy sinkhronizatsii* [Phase synchronization systems], ed. by V.V. Shakhgil'dyan, L.N. Belyustina, Moscow: Radio i svyaz', 1982, 288 p.
18. Reshenie GKRCCh pri Mininformsvyazi RF 06.12.2004. № 04-03-04-004, Ob ispol'zovanii polosy radiochastot 1880 – 1900 MGts dlya oborudovaniya besprovodnoy telefonnoy svyazi tekhnologii DECT [About using of radio frequency bands 1880 – 1900 MHz for wireless telephone equipment of DECT technology].
19. *Dinges S.I.* Mobil'naya svyaz': tekhnologiya DECT [Mobile communication: DECT technology], Moscow: SOLON-Press, 2003, 272 p.
20. Termokompensirovannyye kvartsevye generatory [Temperature compensated quartz oscillators], Available at: <http://www.morion.com.ru/rus/oscillators/tcxo/>.
21. Voltage Controlled Oscillator ROS-1990+, Mini-Circuit's. Available at: <http://www.minicircuits.com/pdfs/ROS-1990+.pdf>.
22. *Golub V.* Sistema FAPCh i ee primeneniya [PLL system and its applications], ChipNews, 2000, No. 4, pp. 3-12.
23. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems], St. Petersburg: Professiya, 2004, 752 p.
24. Digital phase-frequency detector: HMC984LP4E. Hittite Microwave Corporation, Chelmsford, MA. Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc984.pdf>.
25. *Holma H., Toskala A.* WCDMA for UMTS: HSPA evolution and LTE. 5th ed., John Wiley & Sons Ltd, 2010, 597 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Пилипенко Александр Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; к.т.н.; доцент.

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich – Southern Federal University; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.317.49

Г.В. Прокофьев, К.Н. Большаков, В.Г. Стахин, А.А. Обеднин

**РАЗРАБОТКА МИКРОСХЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
С СИНУСНО-КОСИНУСНЫХ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ С ВЫСОКИМ
РАЗРЕШЕНИЕМ**

Выполнен обзор разработанной микросхемы обработки сигнала с синусно-косинусных датчиков положения высокого разрешения. Работа выполнялась с целью обеспечить разработчиков аппаратуры отечественной микросхемой преобразователя для замены существующих импортных аналогов. Микросхема обеспечивает обработку сигналов с различных датчиков положения, таких как магниторезисторы, элементы Холла, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, линейные дифференциальные трансформа-

торы, законченные синусно-косинусные энкодеры, сенсорные системы на основе оптических элементов. Микросхема обеспечивает разрешение преобразования до 16 бит на один период входного сигнала при скорости преобразования 500 нс. Для обеспечения постоянства времени преобразования угол-код в не зависимости от коэффициента децимации в разработанной системе используется интерполяция гармонического сигнала после его прореживания на фильтре-дециматоре. Для сопряжения с трансформаторными датчиками микросхема включает встроенный программируемый синтезатор синусоидального сигнала возбуждения первичной обмотки на основе прямого цифрового синтеза и блок квадратурной демодуляции сигнала с вторичных обмоток датчика. В статье описана архитектура, приведены технические характеристики и результаты моделирования микросхемы. Приведен анализ решений преобразователей угол-код и обоснован выбор архитектуры разработанной микросхемы на основе цифрового следящего преобразователя. Показано что по характеристикам разработанная микросхема превосходит существующие серийно выпускаемые отечественные и зарубежные аналоги. Приведены результаты моделирования зависимости ошибки преобразования примененного следящего преобразователя от амплитуды входного сигнала. Описаны примененные алгоритмы коррекции разбаланса амплитуд и фазового сдвига входных сигналов. Показан результат моделирования их работы. Показано что примененные алгоритмы позволяют скорректировать рассогласование входных синусно-косинусных сигналов по амплитуде и по фазовому сдвигу для обеспечения минимальной ошибки преобразования. Приведены пределы работы схемы коррекции температурной зависимости напряжения смещения входных сигналов по показаниям интегрированного температурного датчика. Для разработанного преобразователя достигнута точность преобразования в 0,017 градусов при токе потребления 48 мА и времени преобразования 500 нс. Показано что использование интерполяции отсчетов АЦП с целью повышения частоты выборки практически не влияет на ошибку преобразования следящего преобразователя.

БИС энкодера; датчик положения; энкодер углового положения; СКВТ; ЛВДТ; датчик угла.

G.V. Prokofiev, K.N. Bolshakov, V.G. Stakhin, A.A. Obednin

DEVELOPMENT OF ASIC FOR SINE-COSINE TO POSITION CODE CONVERSION WITH HIGH RESOLUTION

This article gives an overview of the signal processing chip developed with sine-cosine encoders with high resolution. Work was carried out to ensure that the domestic chip hardware developers to replace the existing drive imported analogues. The chip provides a signal processing with different position sensors such as magnetoresistors, Hall elements, sine-cosine transformers rotary, linear differential transformers, complete sine-cosine encoders, sensor systems based on optical elements. The chip provides a resolution conversion to 16 bits per one period of the input signal at a conversion rate of 500 ns. To ensure the permanence time conversion angle code in not depending on the decimation factor in the developed system uses a harmonic signal interpolation after thinning the filter-deciminator. To pair with a transformer sensor chip includes an embedded programmable synthesizer sinusoidal primary winding excitation signal based on direct digital synthesis unit and a quadrature demodulation signal with the secondary windings of the sensor. The article describes the architecture, given the technical characteristics and the results of simulation of circuits. The analysis of converters making angle code and justified choice of architecture developed chip-based digital servo drive. It is shown that the characteristics of developed chip surpasses existing commercially available domestic and foreign counterparts. Simulation results based conversion tracking error transducer applied to the input signal amplitude. Discloses the use of disparity compensation algorithms of the phase shift and the amplitudes of the input signals. It shows a simulation result of their work. It is shown that the use of algorithms allow to correct misalignment of the input sine-cosine signals in amplitude and phase shift for the minimum conversion errors. Limits given the temperature dependence of voltage offset correction circuit input signals on an integrated temperature sensor readings. For developed converter conversion accuracy is achieved in the 0,017 degrees at a current consumption of 48 mA and a conversion time of 500 ns. It is shown that the use of interpolation ADC samples in order to increase the sample rate does not affect the conversion tracking error transducer.

Encoder ASIC; position sensor; rotary encoder; resolvers; angle sensor.

Введение. Датчики положения широко используются во многих отраслях промышленности и народного хозяйства, в частности это датчики дроссельной заслонки и электронного рулевого управления в автомобилях, датчики углового положения ротора вентильных двигателей, датчики положения подвижных элементов в робототехнике, датчики положения в станках и промышленном оборудовании и т.д. Такие датчики состоят из собственно чувствительного элемента и схемы обработки и формирования сигнала положения. В качестве чувствительных элементов применяются сенсоры на различных принципах, в том числе: магнито-чувствительные элементы на эффекте Холла или магниторезистивном эффекте [1], синусно-косинусные энкодеры [2], синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ), линейные дифференциальные трансформаторы (ЛВДТ) [3, 4] или оптические сенсорные системы [5].

Основной тенденцией является интеграция всех схем обработки в единую микросхему с целью миниатюризации датчиков, снижения их стоимости и повышения надежности [6]. Другой главной тенденцией в развитии схем обработки сигналов является увеличение разрешения преобразования. Для многих современных задач необходимо обеспечивать угловое разрешение до 15–16 бит на один период синусно-косинусного сигнала.

Цели и задачи. Целью работы является разработка однокристалльной микросхемы, обеспечивающей обработку сигналов с датчиков положения всех основных типов, с разрешением до 16 бит на период входного синусно-косинусного сигнала.

Разработка архитектуры микросхемы. Существуют коммерческие микросхемы обработки сигналов, преобразующие как сигнал с датчиков типа СКВТ (AD2S1210 [7]), ЛВДТ (AD698 [8]), так и обрабатывающие синусно-косинусный немодулированный сигнал (iC-TW8 [9]). Из отечественных микросхем известны серийно выпускаемые специализированные микросборки 2602ПВ1, 2602ПВ2 (ОАО «НИИЭМП») [10], Ф020, Ф040 [11] ОАО «НПО Физика» и разрабатываемая ОАО «ПКК Миландр» микросхема 1310НМ025 [12, 13].

Для обеспечения наибольшей широты применения была определена необходимость проводить обработку сигналов с синусно-косинусных сенсорных систем различных конфигураций, в том числе СКВТ, ЛВДТ, синусно-косинусный магнитных и оптических.

Таким образом, в один кристалл требовалось интегрировать систему формирования сигнала возбуждения для СКВТ, ЛВДТ и специализированный демодулятор сигнала с вторичных обмоток трансформатора, преобразователь угол-код, блок обработки сигнала ЛВДТ и канал формирования опорного импульса для оптических датчиков положения (энкодеров).

Преобразователи угол-код строятся по двум базовым принципам – следящий преобразователь, минимизирующий сигнал ошибки между входным сигналом и его образом в памяти преобразователя (таблицы синуса и косинуса) [14], и на основе прямого вычисления арктангенса угла, наиболее распространены из которых системы на основе алгоритмов класса CORDIC [15, 16].

Преобразователь угол-код прямого вычисления обладает фиксированной задержкой преобразования, не зависящей от фазы входного сигнала. Однако данная архитектура чувствительна к качеству входного сигнала и не гарантирует монотонности преобразования, что необходимо для большинства систем управления, где в обратной связи используются датчики положения. Для повышения качества входного сигнала в системах прямого преобразования производят предварительную фильтрацию сигнала и используются различные ресурсоемкие алгоритмы обработки, например, вейвлет-преобразование [17, 18].

Следящая архитектура обеспечивает гарантированную монотонность преобразования, так как код положения представляет собой выход счетчика, считающего импульсы с генератора, частота и полярность которых зависит от сигнала ошибки между входным сигналом и образами синуса и косинуса, размещенными в памяти преобразователя [19]. Следящая система в режиме слежения обеспечивает максимальное быстродействие, однако время вхождения в режим слежения зависит от текущей фазы входного сигнала и в худшем случае равно времени необходимого для перебора всех значений счетчика. Для большинства приложений эта особенность следящей системы не является критичной.

Следящий преобразователь может быть реализован как аналого-цифровая система, так и полностью в цифровом домене. В аналого-цифровой реализации сигнал ошибки формируется в аналоговом виде на перемножающих цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП). Максимальное разрешение такой архитектуры составляет порядка 13 бит, что связано в первую очередь с ограничением точности перемножающих ЦАП из-за рассогласования их элементов, а также с размерами таких ЦАП высокой разрядности. В качестве примера коммерческих микросхем на основе аналого-цифровой следящей системы можно привести микросхему iC-NQ [20], а также микросхемы однокристалльных энкодеров разрешением до 13 бит [21, 22].

Для разрешений преобразования от 14 бит и выше уже применяется преобразование угол-код полностью в цифровом домене [23]. Это позволяет более просто производить предварительную математическую обработку входных сигналов, что позволяет компенсировать многие неидеальности сенсорной системы.

В результате анализа архитектурных решений для достижения высокого разрешения и обеспечения гарантированного отсутствия пропуска кода была выбрана реализация на основе цифрового следящего преобразователя.

Ключевым элементом, определяющим точность цифровой обработки, является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Наибольшим разрешением обладают АЦП, выполненные по архитектуре сигма-дельта [24]. Был разработан многобитный сигма-дельта модулятор второго порядка, выполненный по архитектуре CIFF (каскад интеграторов с прямой связью) [25]. Модулятор выдает 4-х битный поток отсчетов с частотой 8 МГц.

Структурная схема разработанной микросхемы ENC_ASIC3 показана на рис. 1.

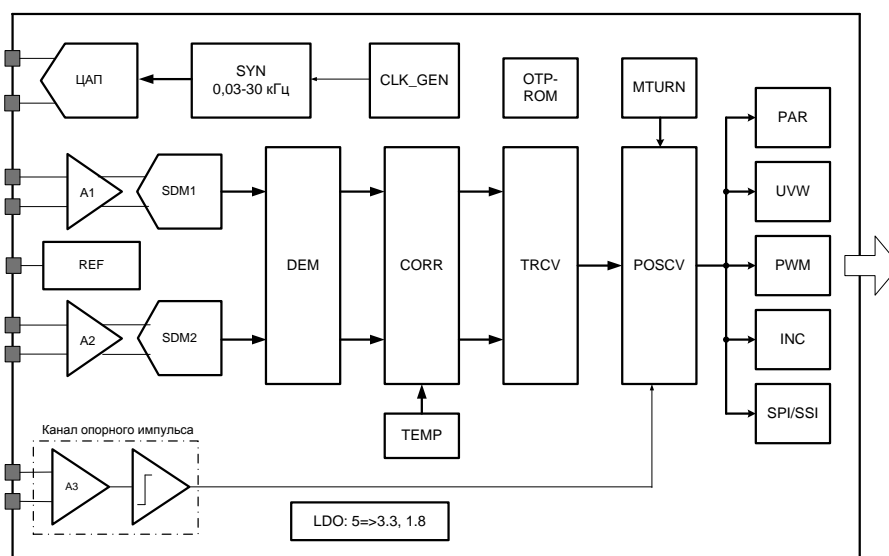


Рис. 1. Структурная схема разработанной микросхемы

Микросхема содержит встроенный синтезатор частоты на основе прямого цифрового синтеза SYN, формирующий синусоидальный сигнал с программируемой амплитудой и частотой. В качестве опорного используется сигнал встроенного RC-генератора CLK_GEN, также возможно подключение внешнего генератора тактовой частоты. Частота синтезатора программируется в диапазоне 30 Гц – 30 кГц с шагом 1 Гц. Синусоидальный сигнал фильтруется и преобразуется в аналоговый дифференциальный сигнал возбуждения первичной обмотки трансформатора.

Для обработки сигналов с датчика положения микросхема имеет 2 канала преобразования, включающие в себя программируемые дифференциальные усилители A1, A2 и сигма-дельта модуляторы SDM1, SDM2. С выхода модуляторов сигнал поступает на цифровой блок DEM, обеспечивающий квадратурную демодуляцию, децимацию и интерполяцию входного сигнала с разрешением до 16 бит и временем преобразования 500 нс. Фильтр-дециматор обеспечивает программируемую децимацию от 32 до 4096 отсчетов. Для минимальной децимации полоса сигнала составляет 62.5 кГц. Особенностью реализованной системы блока демодуляции и децимации является интеграция алгоритма интерполяции выходных отсчетов АЦП, позволяющая обеспечить постоянное значение частоты выборок в 2 МГц при разрешении преобразования 18 бит, несмотря на использование высоких значений децимации сигнала (от 32 до 4096). В связи с гармоническим характером сигнала на выходе датчика использование интерполяции применимо для данной системы. Это позволяет использовать АЦП с меньшим быстродействием и потреблением, при этом обеспечивая сравнимое время преобразования с преобразователями с существенно более скоростными АЦП.

Отфильтрованный и демодулированный сигнал поступает на блок CORR, обеспечивающий коррекцию сигнала, в том числе компенсацию температурного дрейфа напряжений смещения входных сигналов по встроенному датчику температуры TEMP, независимо для каждого канала, подстройку коэффициентов усиления каналов, компенсацию фазового сдвига между каналами.

Скорректированный сигнал поступает на следящий преобразователь, TRCV преобразующий входной сигнал в код положения с разрешением от 13 до 16 бит. Далее код положения корректируется в зависимости от установок пользователя в блоке POSCV, производится подсчет количества оборотов счетчиком MTURN и скомбинированный код положения поступает на схемы интерфейсов.

Микросхема обеспечивает формирование следующих выходных сигналов:

- ◆ цифровой последовательный SPI/SSI;
- ◆ инкрементальный квадратурный;
- ◆ широтно-импульсной модуляции;
- ◆ трехфазный UVW со сдвигом 120 градусов (эмуляция сигналов элементов Холла для вентильных двигателей);
- ◆ параллельный интерфейс.

Для подключения оптических инкрементальных датчиков микросхема включает канал опорного импульса, состоящий из предварительного усилителя и компаратора. Канал опорного импульса обеспечивает формирование сигнала нулевой метки инкрементального интерфейса.

Результаты моделирования микросхемы. Для разработанной микросхемы была рассчитана ошибка преобразования синусно-косинусного сигнала в код. На вход модели микросхемы подавался синусно-косинусный сигнал частотой 15 Гц и различной амплитудой, по выходному коду определялась ошибка преобразования. На рис. 2 показана зависимость значения ошибки преобразования от амплитуды входного сигнала (в % от максимально возможного размаха сигнала) для режима работы АЦП с децимацией 32 (обеспечивающей максимальную полосу пропускания АЦП 62.5 кГц), а характер ошибки в пределах периода входного сигнала на рис. 3.

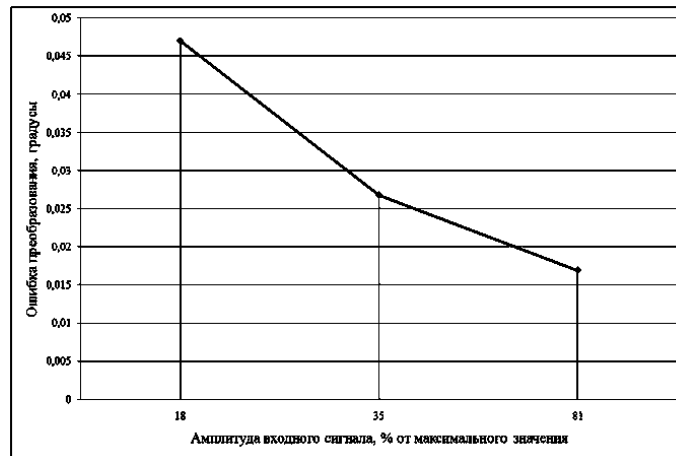


Рис. 2. График зависимости ошибки преобразования ENC_ASIC3 от амплитуды входного сигнала

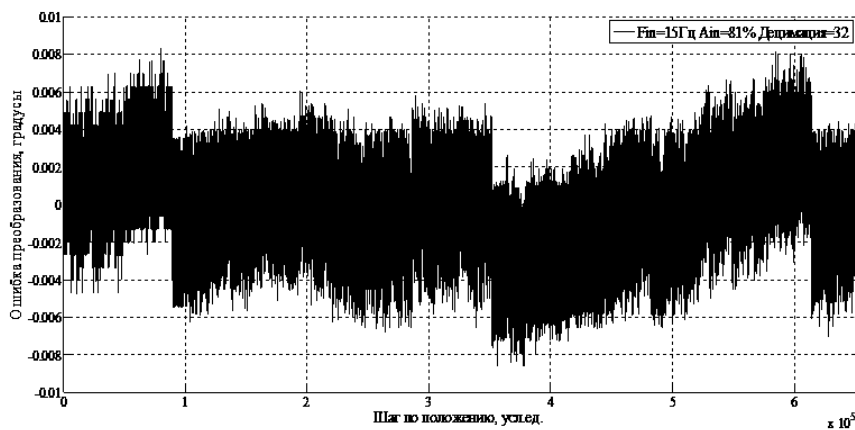


Рис. 3. График ошибки преобразования ENC_ASIC3 по положению, один полный период входного сигнала

Было исследовано влияние характеристик фильтра АЦП (коэффициент децимации и интерполяции) на точность следящего преобразователя. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние характеристик фильтра на ошибку следящего преобразователя

Децимация	Интерполяция	Ошибка преобразования, градусы
32	0	0,0169
64	0	0,0209
128	32	0,0167
256	64	0,0170
1024	256	0,0174
2048	512	0,0173
4096	1024	0,0174

Результаты исследований показывают, что использование интерполяции отсчетов АЦП с целью повышения частоты выборок практически не влияет на ошибку преобразования следящего преобразователя. Это обеспечивает возможность получить высокое быстродействие преобразователя угол-код с АЦП типа сигма-дельта при больших значениях децимации сигнала. Так для децимации 4096 и тактовой частоте модулятора 8 МГц номинальная частота выборок составляет 1953 Гц, однако за счет использования интерполяции в 1024 точек частота выборок на выходе фильтра и следящего преобразователя составляет 2 МГц. Как показывают результаты исследования, ошибка преобразования при этом не ухудшается по сравнению с использованием децимации 32 без интерполяции.

Полученные по результатам моделирования характеристики ENC_ASIC3 приведены в табл. 2 в сравнении с аналогичными параметрами конкурирующих разработок.

Таблица 2

Сравнение характеристик микросхемы ENC_ASIC3 с аналогами

Параметр	ENC_ASIC3, ЗНТЦ	AD2S1210, Analog Devices	iC-TW8, iC-Haus	2602ПВ2АП, НИИЭМП
Разрешение, бит	16	16	16	16
Ошибка преобразования, градусы	0,017	0,17	0,08	0,022
Ток потребления, мА	48	49	35	270

Полученная в результате моделирования ошибка преобразования 0,017 градусов значительно превосходит таковую для широко используемой микросхемы AD2S1210 и находится на уровне специализированной отечественной микросборки 2602ПВ2АП, но при этом существенно превосходя ее по току потребления. При этом в отличие от микросборки интегральное решение более компактное.

Был исследован алгоритм коррекции разбаланса амплитуд синусного и косинусного сигналов. Для этого на вход модели микросхемы подавался сигнал относительные амплитуды которых составляют 0,45 для синусного сигнала и 0,4 для косинусного сигнала, таким образом, разбаланс по амплитуде составляет около 12 % – амплитуда синусного сигнала на выходе блока DEM составляет 23208, а косинусного 26111 отсчетов.

Блок коррекции позволяет осуществлять подстройку отношения синусного и косинусного сигнала путем настройки 16-ти разрядного регистра GAIN_TRIM. Старший бит регистра осуществляет переключение канала, амплитуда которого пропорционально ослабляется, а остальные 15 бит осуществляют подстройку ослабления сигнала по выбранному каналу.

Для обозначенного выше значения разбаланса ошибка преобразования составляет 6.76 градусов, рис. 4.

Тракт преобразования для каждого канала определяется следующим выражением:

$$OUT = IN \cdot \frac{32768 + GAIN_TRIM[14:0]}{2^{16}}, \quad (1)$$

где OUT – код на выходе блока подстройки, IN – код на входе блока подстройки, $GAIN_TRIM[14:0]$ – 15-ти разрядный регистр подстройки усиления.

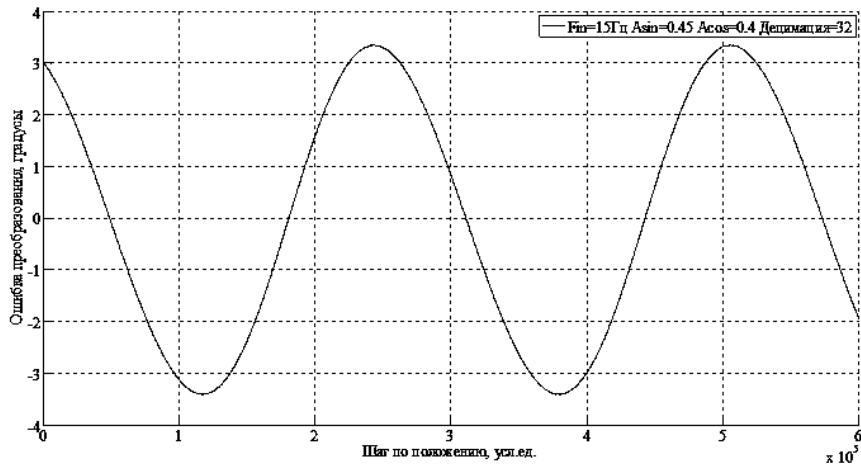


Рис. 4. График ошибки преобразования ENC_ASIC3 по положению для разбаланса амплитуд синусно-косинусного сигнала в 12 % без коррекции

Был определен коэффициент подстройки, который для данного разбаланса составил 25481, и соответственно значение регистра GAIN_TRIM составило 58249. Результирующая ошибка после выбранной компенсации уменьшилась до 0.0206 градусов, рис. 5.

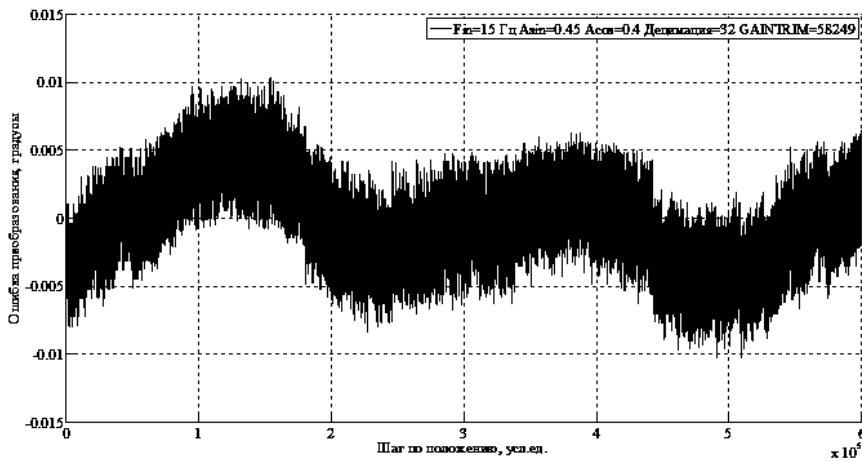


Рис. 5. График ошибки преобразования ENC_ASIC3 по положению для разбаланса амплитуд синусно-косинусного сигнала в 12 % с корректирующим коэффициентом подстройки GAIN_TRIM=58249

В соответствии с формулой (1) для спроектированной системы диапазон подстройки усиления для каждого канала составляет 0.5–1.0 с шагом подстройки 0.000015. Данный диапазон подстройки перекрывает большую часть разбалансов коэффициентов усиления каналов в реальных системах.

В реальных системах зачастую не наблюдается идеального отношения между фазами синусного и косинусного сигналов в 90 градусов. Из-за механических ошибок размещения сенсоров, подвижных частей датчиков, обмоток вращающихся-

ся трансформаторов ошибка фазового сдвига может составлять от единиц до 2–3 десятков градусов в любую сторону. Это диктует необходимость введения в систему блока коррекции фазового сдвига синусного и косинусного сигналов.

Разработанная система включает модуль коррекции фазового сдвига входного синусно-косинусного сигнала обеспечивающий подстройку отклонения фазового сдвига между синусным и косинусным сигналом в пределах $-37...+37$ градусов с шагом 0.00113 градуса. Блок подстройки фазы работает в соответствии с выражениями:

$$OutX = InX + \frac{PH_TRIM[15:0] \cdot InY}{2^{16}} \quad (2)$$

$$OutY = InY + \frac{PH_TRIM[15:0] \cdot InX}{2^{16}}$$

где $OutX$ – выход синусного канала блока коррекции фазы, InX – вход синусного канала, InY – вход косинусного канала, $OutY$ – выход косинусного канала блока коррекции фазы, $PH_TRIM[15:0]$ – код коррекции фазового сдвига (знаковый).

В соответствии с формулой сложения гармонических колебаний из (2) следует, что внесенный блоком коррекции фазы в систему фазовый сдвиг определяется как:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \arctg\left(\frac{PH_TRIM[15:0]}{2^{16}}\right). \quad (3)$$

Была промоделирована работа системы коррекции фазового сдвига. На вход модели микросхемы подавались синусный и косинусный сигналы, в которых был внесен дополнительный фазовый сдвиг равный $\pi/16$ или 11.25 градусов. Результирующая ошибка преобразования составила 11.3 градуса, график ошибки изображен на рис. 6.

Для коррекции данного фазового сдвига по формуле (3) был определен корректирующий коэффициент $PH_TRIM[15:0]$ равный 6455. Данный коэффициент был загружен в модель микросхемы, в результате такой подстройки ошибка преобразования снизилась до 0.0203 градуса, рис. 7. Таким образом, микросхема обеспечивает постройку отклонения фазы сигналов от 90 градусов, что необходимо для создания прецизионных датчиков положения.

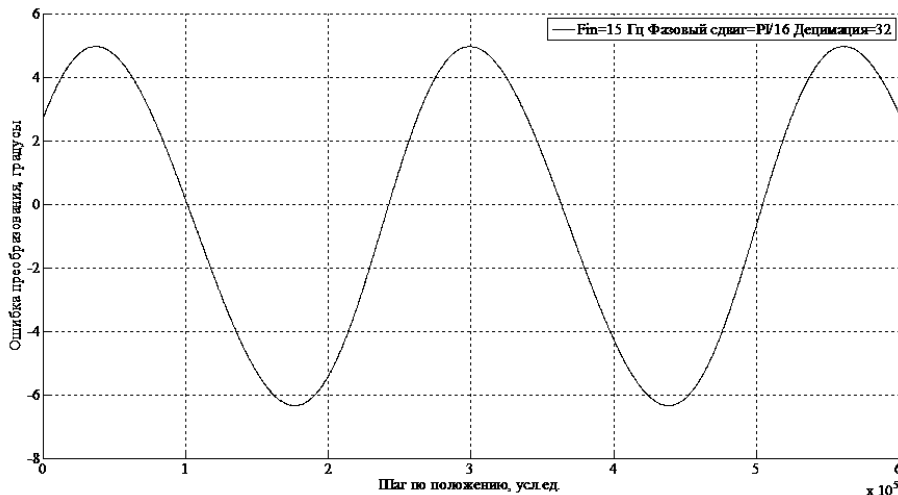


Рис. 6. График ошибки преобразования ENC_ASIC3 по положению для фазового сдвига синусно-косинусного сигнала в $\pi/16$ без коррекции

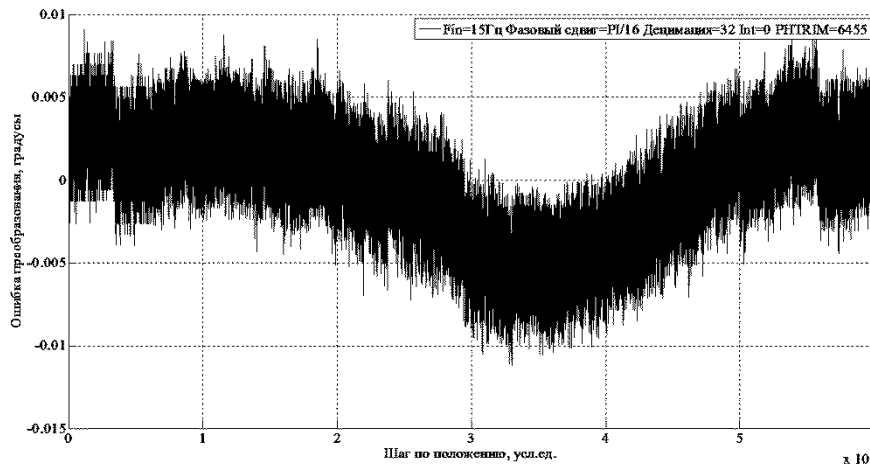


Рис. 7. График ошибки преобразования ENC_ASIC3 по положению для фазового сдвига синусно-косинусного сигнала в $\pi/16$ с корректирующим коэффициентом подстройки PH_TRIM=6455

Микросхема включает модуль коррекции температурной зависимости напряжения смещения входного сигнала по встроенному в микросхему датчику температуры. Коррекция производится путем сложения с полиномом второго порядка. Коэффициенты полинома задаются для каждого канала независимо. Обеспечивается компенсация температурной зависимости в пределах $\pm 7.8 \cdot 10^{-3}$ для линейного температурного коэффициента и $\pm 5.5 \cdot 10^{-5}$ для квадратичного температурного коэффициента.

Заключение. Результаты исследований модели микросхемы показывают правильность выбранной архитектуры. По результатам моделирования достигнутая точность преобразования составляет 0,017 градусов при токе потребления 48 мА и времени преобразования 500 нс. Использование алгоритма интерполяции выборки АЦП позволило обеспечить постоянную скорость преобразования, не зависящую от значения децимации, без существенного ухудшения точности преобразования. Результаты исследований показывают, что использование интерполяции отсчетов АЦП с целью повышения частоты выборки практически не влияет на ошибку преобразования синусно-косинусного следящего преобразователя. Это дает возможность при той же скорости преобразования АЦП получать существенно большую частоту выборки, и соответственно, обеспечить большее быстродействие преобразователя угол-код.

Разработанная микросхема позволит создавать угловые и линейные датчики положения с высоким разрешением. Благодаря высокой степени интеграции микросхема способна обрабатывать сигнал с датчиков различного типа, что делает ее спектр применения достаточно широким. Конкурентоспособные характеристики микросхемы позволяют создавать на ее основе отечественные датчики с передовыми характеристиками, в том числе для аппаратуры специального применения.

Благодарности. Разработка микросхемы выполняется при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки России, код исследований RFMEFI57914X0059.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 3. Физические основы и коммерческие перспективы технологий полупроводниковых и пермалоевых магниторезистивных датчиков // Компоненты и технологии. – 2005. – № 4.
2. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 6. Концепции создания магнитных угловых энкодеров на основе эффекта Холла // Компоненты и технологии. – 2005. – № 7.
3. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 8. Классические индуктивные преобразователи – надежный запас // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 16-23.
4. *Сысоева С.* Магнитоуправляемые, MEMS и мультисенсорные датчики движения 2009 года – функциональнее, точнее, миниатюрнее предшественников // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 54-63.
5. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 12. Актуальные классические принципы оптоэлектроники в автоэлектронике // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5.
6. Sensor Trends 2014. Trends in future-oriented sensor technologies. AMA Association for Sensor Technology, 2010.
7. AD2S1210 Datasheet. Analog Devices Inc., США.
8. AD698 Universal LVDT Signal Conditioner. Analog Devices Inc., США, 1995.
9. iC-TW8 16-bit SIN/COS interpolator with auto-calibration. iC-Haus GmbH, 2014.
10. Микросборки серии 2602. Технические условия АЕЯР.431320.413 ТУ. ОАО «НИИЭМП».
11. Микросборки преобразователя «УГОЛ-КОД» Ф020, Ф020.1 Ф040, Ф040.1. Краткое описание. ОАО «НПО «Физика».
12. Двухканальный АЦП переменной разрядности для СКВТ, ЛРДТ и Сельсинов. АО «ПКК Миландр», 2016.
13. *Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С.* Микросхема преобразователя угол-код для индуктивных датчиков // Современная электроника. – 2015. – № 3. – С. 2-5.
14. *Burke J., Moynihan J.F., Unterkofler K.* Extraction of High Resolution Position Information from Sinusoidal Encoders. Proc. PCIM-Europe 1999, Nuremberg. – P. 217-222.
15. *Захаров А.В., Хачумов В.М.* Алгоритмы CORDIC. Современное состояние и перспективы. Программные системы: теория и приложения. – Переславль-Залесский, 2004. ISBN 5-94052-066-0.
16. *Pramod K. Meher, Javier Valls, Tso-Bing Juang, K. Sridharan, Koushik Maharatna.* 50 Years of CORDIC: Algorithms, Architectures, and Applications // IEEE Transactions on circuits and systems–I: Regular papers. – September 2009. – Vol. 56, No. 9. – P. 1893-1907.
17. *Потехин Д.С., Тарасов И.Е., Тетерин Е.П.* Влияние коэффициентов и пределов интегрирования вейвлет-функции Морле на точность результатов анализа гармонических сигналов с нестационарными параметрами // Научное приборостроение. – 2002. – Т. 12, № 1. – С. 90-95. ISSN 0868-5886.
18. *Potekhin D.S., Tarasov I.E., Potekhin S.D.* Improvement of Metrological Characteristics of Inductive Displacement Sensor of Movement Based on Digital Vector Diagram Reconstruction of Signals In Windings. – 2015. – Vol. 10, No. 8. – С. 20343-20349.
19. *Nishimura H.* Tracking loop type digital angle converter and angle/digital converting apparatus. Патент США №7541951, 2009.
20. iC-NQC, 13-bit Sin/D Converter with signal calibration. iC-Haus GmbH, Германия. <http://www.ichaus.de/NQC>.
21. iC-MH, 12 BIT ANGULAR HALL ENCODER datasheet. iC-Haus GmbH, Германия. http://www.ichaus.de/upload/pdf/Mh_b1es.pdf.
22. ENC_ASIC2 - БИС однокристального магнитного энкодера положения. АО «ЗНТЦ», 2015. <http://www.zntc.ru/capabilities/design-center/products/2-encoder-position.php>.
23. High-Precision Sine/Cosine Interpolation. IC-Haus white paper, 2014, http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf.
24. *Plassche R.* CMOS Integrated analog to digital and digital to analog converters. Kluwer Academic Publishers, 2003.

25. Ziquan T., Shaojun Y., Yueming J., Naiying D. The Design of a Multi-bit Quantization Sigma-delta Modulator // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2013. – Vol. 6, No. 5. – P. 265-274.

REFERENCES

1. Sysoeva S. Avtomobil'nye datchiki polozheniya. Sovremennyye tekhnologii i novyye perspektivy. Chast' 3. Fizicheskiye osnovy i kommercheskiye perspektivy tekhnologii poluprovodnikovyykh i permaloevykh magnitno-rezistivnykh datchikov [Automotive position sensors. Modern technologies and new per-vision. Part 3. Physical basis and commercial prospects for technology semi-conductor and barmaleeva magneto-resistive sensor], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2005, No. 4.
2. Sysoeva S. Avtomobil'nye datchiki polozheniya. Sovremennyye tekhnologii i novyye perspektivy. Chast' 6. Kontseptsii sozdaniya magnitnykh uglovykh enkodirov na osnove effekta Kholla [Automotive position sensors. Modern technology and new perspectives. Part 6. The concept of creating a magnetic angular encoders based on Hall effect], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2005, No. 7.
3. Sysoeva S. Avtomobil'nye datchiki polozheniya. Sovremennyye tekhnologii i novyye perspektivy. Chast' 8. Klassicheskiye induktivnyye preobrazovateli – nadezhnyy zapas [Automotive position sensors. Modern technologies and new per-vision. Part 8. Classic inductive transducers – a reliable supply of], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2005, No. 9, pp. 16-23.
4. Sysoeva S. Magnitopravlyaemye, MEMS i mul'tisensornyye datchiki dvizheniya 2009 goda – funktsional'nee, tochnee, miniatyurnee predshestvennikov [Magnetically operated, MEMS and multi-sensor motion sensors 2009, more functional, more precisely, smaller predecessors], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2009, No. 8, pp. 54-63.
5. Sysoeva S. Avtomobil'nye datchiki polozheniya. Sovremennyye tekhnologii i novyye perspektivy. Chast' 12. Aktual'nyye klassicheskiye printsipy optoelektroniki v avtoelektronike [Automotive position sensors. Modern technology and new perspectives. Part 12. Relevant classical principles of opto-electronics in the automotive electronics], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2006, No. 5.
6. Sensor Trends 2014. Trends in future-oriented sensor technologies. AMA Association for Sensor Technology, 2010.
7. AD2S1210 Datasheet. Analog Devices Inc., USA.
8. AD698 Universal LVDT Signal Conditioner. Analog Devices Inc., USA, 1995.
9. iC-TW8 16-bit SIN/COS interpolator with auto-calibration. iC-Haus GmbH, 2014.
10. Mikrosborki serii 2602. Tekhnicheskiye usloviya AEYaR.431320.413 TU. OAO «NIIEMP» [Microbore series 2602. Specifications YEAR.431320.413 TU. JSC NIIEMP"].
11. Mikrosborki preobrazovatelya «UGOL-KOD» F020, F020.1 F040, F040.1. Kratkoe opisanie. OAO «NPO «Fizika» [Microbore Converter "ANGLE-CODE" Ф020, Ф020.1 Ф040, Ф040.1. Brief description. JSC "NPO "Physics"].
12. Dvukhkanal'nyy ATsP peremennoy razryadnosti dlya SKVT, LRDT i Sel'sinov. AO «PKK Milandr», 2016 [Dual-channel ADC bitness variable to synchro, LVDT and Synchros. JSC PKK Milandr", 2016].
13. Anufriev V., Luzhbinin A., Shumilin S. Mikroskhema preobrazovatelya ugol-kod dlya induktivnykh datchikov [Chip of the transducer angle code for inductive sensors], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2015, No. 3, pp. 2-5.
14. Burke J., Moynihan J.F., Unterkofler K. Extraction of High Resolution Position Information from Sinusoidal Encoders. Proc. PCIM-Europe 1999, Nuremberg, pp. 217-222.
15. Zakharov A.V., Khachumov V.M. Algoritmy CORDIC. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy. Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya [The CORDIC algorithms. Current status and prospects. Program systems: theory and applications]. Pereslavl'-Zalesskiy, 2004. ISBN 5-94052-066-0.
16. Pramod K. Meher, Javier Valls, Tso-Bing Juang, K. Sridharan, Koushik Maharatna. 50 Years of CORDIC: Algorithms, Architectures, and Applications, *IEEE Transactions on circuits and systems–I: Regular papers*, September 2009, Vol. 56, No. 9, pp. 1893-1907.

17. Potekhin D.S., Tarasov I.E., Teterin E.P. Vliyaniye koeffitsientov i predelov integrirvaniya veyvlet-funktsii Morle na tochnost' rezul'tatov analiza garmonicheskikh signalov s nestatsionarnymi parametrami [The influence factors and limits of integration of the wavelet function Morlaix on the accuracy of the results of the analysis of harmonic signals with time-varying parameters], *Nauchnoe priborostroenie* [Nauchnoe Priborostroenie], 2002, Vol. 12, No. 1, pp. 90-95. ISSN 0868-5886.
18. Potekhin D.S., Tarasov I.E., Potekhin S.D. Improvement of Metrological Characteristics of Inductive Displacement Sensor of Movement Based on Digital Vector Diagram Reconstruction of Signals In Windings, 2015, Vol. 10, No. 8, pp. 20343-20349.
19. Nishimura H. Tracking loop type digital angle converter and angle/digital converting apparatus. Patent USA №7541951, 2009.
20. iC-NQC, 13-bit Sin/D Converter with signal calibration. iC-Haus GmbH, Germany. Available at: <http://www.ichaus.de/NQC>.
21. iC-MH, 12 Bit angular hall encoder datasheet. iC-Haus GmbH, Germany. Available at: http://www.ichaus.de/upload/pdf/Mh_b1es.pdf.
22. ENC_ASIC2 - BIS odnokristal'nogo magnitnogo enkodera polozheniya. AO «ZNTTs», 2015 [BIS single chip magnetic encoder position. JSC "Zelenograd Nanotechnology Center", 2015. Available at: <http://www.zntc.ru/capabilities/design-center/products/2-encoder-position.php>.
23. High-Precision Sine/Cosine Interpolation. IC-Haus white paper, 2014. Available at: http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf.
24. Plassche R. CMOS Integrated analog to digital and digital to analog converters. Kluwer Academic Publishers, 2003.
25. Ziquan T., Shaojun Y., Yueming J., Naiying D. The Design of a Multi-bit Quantization Sigma-delta Modulator, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2013, Vol. 6, No. 5, pp. 265-274.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Д.С. Потехин.

Прокофьев Георгий Всеволодович – АО "Зеленоградский нанотехнологический центр"; e-mail: prokofiev@idm-plus.ru; 124527, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, 6; тел.: 84997206972; ведущий инженер.

Большаков Кирилл Николаевич – e-mail: bolshakov@idm-plus.ru; ведущий инженер.

Стахин Вениамин Георгиевич – e-mail: stakhin@idm-plus.ru; тел.: 84997208952; начальник дизайн-центра проектирования СБИС.

Обеднин Антон Александрович – e-mail: obednin@idm-plus.ru; главный конструктор.

Prokofiev Georgy Vsevolodovitch – JSC "Zelenograd nanotechnology center"; e-mail: prokofiev@idm-plus.ru; 6, Solnechnayaalleya, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia; phone: +74997206972; leading engineer.

Bolshakov Kirill Nikolayevich – e-mail: bolshakov@idm-plus.ru; leading engineer.

Stakhin Veniamin Georgievitch – e-mail: stakhin@idm-plus.ru; phone: +74997208952; chief of VLSI design centre.

Obednin Anton Aleksandrovitch – e-mail: obednin@idm-plus.ru; chief engineer.