

24. *Леонтьев Н.В.* Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». – Нижний Новгород, 2006. – 101 с.
25. Coupled-Field Analysis Guide. Release 12.1 // ANSYS, Inc., 2009. URL: [http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/ans\\_cou.pdf](http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/ans_cou.pdf).
26. *Tamara Bechtold, Gabriele Schrag, and Lihong Feng.* System-level Modeling of MEMS. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. – 562 p.
27. *Alain Batailly.* Exporting Ansys FEM models into Matlab mass and stiffness matrices // McGill University, Structural Dynamics and Vibration Laboratory, 2008. URL: <http://structdynviblab.mcgill.ca/pdf/AnsysMatlab.pdf>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Соколов.

**Воронков Олег Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: oleg.voronkov.1985@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: +79508449549; научно-технический центр «Техноцентр»; к.т.н.; научный сотрудник.

**Синютин Сергей Алексеевич** – e-mail: ssin@mail.ru; тел.: 88634311143; кафедра встраиваемых систем; зав. кафедрой; к.т.н.

**Voronkov Oleg Yurevich** – Southern Federal University; e-mail: oleg.voronkov.1985@gmail.com; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79508449549; Scientific and Technical Center "Technocenter"; cand. of eng. sc.; researcher.

**Sinyutin Sergey Alexeevich** – e-mail: ssin@mail.ru; phone: +78634311143; the department of embedded systems; head of department; cand. of eng. sc.

УДК 621.317.49

**Г.В. Прокофьев, В.Г. Стахин, А.А. Обеднин**

### **СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ**

*Для создания отечественных датчиков положения с конкурентоспособными характеристиками в России отсутствует собственная современная интегральная компонентная база, а именно, такие ключевые компоненты, как микросхемы преобразователя угла-код и однокристалльные преобразователи с интегрированными сенсорными элементами. Для решения этой проблемы ЗАО «Зеленоградский Нанотехнологический Центр» были разработаны микросхема преобразователя фазы квадратурного сигнала в код положения (угол-код) K1382HX045 и микросхема однокристалльного магнитного энкодера положения ENC\_ASIC2. Микросхема K1382HX045 предназначена для работы совместно с сенсорами с синусно-косинусным выходом и позволяет создавать датчики положения с разрешением до 8192 отсчетов на один период входного сигнала и временем преобразования 16 мкс. Благодаря широкому диапазону регулировки коэффициента усиления микросхема обеспечивает состыковку как с отдельными чувствительными элементами (магниторезисторы, элементы Холла), так и с законченными синусно-косинусными энкодерами с выходным сигналом большой амплитуды. Также микросхема обладает возможностью настройки по однопроводному интерфейсу, совмещенному с аналоговым выходом, для создания датчиков с минимальным количеством контактов, например, для автомобильных датчиков положения дроссельной заслонки. На основе микросхемы K1382HX045 был разработан абсолютный энкодер углового положения с разрешением 12 бит и ошибкой преобразования не более  $\pm 0.5$  град. Микросхема однокристалльного энкодера положения позволяет создавать компактные магнитные датчики углового положения с разрешением до 4096 отсчетов на один оборот и временем преобразования не более 1 мкс. Особенностью данной микросхемы является интегрированная в кристалл сенсорная система на основе пространственно разнесенных элементов Холла. Микросхема обладает большим набором выходных интерфейсов и пользовательских настроек, в том числе обеспечивает поддержку многооборотного*

режима работы и установку нулевого положения. Представленные микросхемы являются на данный момент единственными российскими разработками в данной области и могут использоваться для создания компактных и интеллектуальных датчиков положения, в том числе при импортозамещении датчиковой аппаратуры. По сравнению с зарубежными аналогами представленные разработки обладают конкурентоспособными характеристиками.

БИС энкодера; датчик положения; энкодер углового положения; датчик дроссельной заслонки; датчик угла.

**G.V. Prokofiev, V.G. Stakhin, A.A. Obednin**

### **MODERN DOMESTIC APPLICATION SPECIFIC INTEGRATED CIRCUITS FOR POSITION SENSORS**

*To create domestic position sensors with competitive features in Russia lacks its modern own integral component base, namely, the key components such as angle-to-code conversion chip and single-chip converter with integrated sensor elements. To resolve this issue JSC "Zelenograd Nanotechnology Center" has been developed phase of quadrature signal in the position code conversion chip (angle-to-code converter) K1382HX045 and single-chip magnetic position encoder ENC ASIC2. Integrated circuit (IC) K1382HX045 are designed for working with sensors with sine-cosine output and allow creating position sensors with resolution up to 8192 steps on one period of input signal and with conversion time 16 us. Through wide gain trim range this IC is support connection with single sensors (magnetoresistors, Hall sensors) and with complete sine-cosine encoders with output signal with large amplitude. Also this IC have function for trim setting through one wire interface which is combined with analog output. This function used for create sensors with minimum pin numbers, for example, for automotive throttle position sensors. Was designed absolute magnetic rotary encoder based on K1382HX045 with 12 bit resolution and total error  $\pm 0.5$  degree. Single chip integrated position encoder allow to create compact magnetic angle position sensors with resolution up to 4096 steps on one rotation and with conversion time up to 1 us. Feature of this circuit is sensor system that integrated on die (system on chip) with dimensionally spaced hall elements. This IC has wide range output interfaces and user settings, including support multi-turn mode and zero position settings. These integrated circuits now is single Russian development in current field and can used for creation compact and intelligent position sensors including import substitution in sensor equipment fields. Presented developments are competitive in compare to foreign analogues.*

*Encoder ASIC; position sensor; rotary encoder; throttle position sensor; angle sensor.*

**Введение.** Датчики углового 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.

Существует три основных принципа создания датчиков углового положения – оптический, индуктивный и магнитный. Наибольшую долю рынка занимают датчики углового положения на оптическом эффекте – состоящем из оптической мишени (работающей на отражение или просвет), светоизлучателя и массива фотоприемников [1]. Оптические датчики положения имеют самый широкий спектр угловых разрешений – от единиц до нескольких миллионов отсчетов на оборот. Однако в последние годы наблюдается тенденция вытеснения оптических датчиков магнитными в области малых и средних разрешений. Это связано с рядом преимуществ, которые дает магнитная технология над оптической, а именно:

1) датчики на магнитном эффекте конструктивно много проще оптических, а значит надежнее и дешевле;

2) магнитные датчики устойчивы к присутствию загрязняющих примесей, таких как водяной пар, масла, нефтепродукты и другие оптически активные примеси [2];

3) магнитные датчики позволяют создавать очень компактные конструкции, обладающие при этом хорошим разрешением;

4) в магнитных системах возможно создание таких конструкций, когда возбуждающая магнитная система конструктивно отделена от сенсорной системы, что дает новые возможности для конструкторов [3, 4].

Единственно в чем оптические датчики пока превосходят магнитные – максимально достижимое угловое разрешение. Однако в данной технологии похоже предел развития близок или уже достигнут.

Индуктивные датчики [5] по сравнению с магнитными не обладают какими-либо заметными преимуществами кроме отработанности конструкций и очень высокой надежности. Надо заметить, что технология индуктивных датчиков уже практически не развивается, так как достигла потолка своих возможностей. Это подтверждается и отсутствием уже в течение нескольких лет новых разработок специализированных микросхем обработки для данного типа датчиков.

Таким образом, именно датчики на магнитном эффекте являются в настоящее время наиболее перспективными для создания современных датчиков положения.

В настоящее время существует проблема создания компактных датчиков положения на основе отечественной ЭКБ для ответственных применений, т.к. отсутствует элементная база, а именно отечественные интеллектуальные датчики и микросхемы обработки заточенные под данное применение. Для решения этой проблемы коллективом дизайн-центра ЗАО «ЗНТЦ» были разработаны две специализированные микросхемы:

1) Микросхема преобразователя синусно-косинусного сигнала в код положения K1382HX045;

2) Микросхема однокристалльного магнитного энкодера положения ENC\_ASIC2.

Обе микросхемы реализуют современные тенденции в области систем обработки сигналов для датчиков положения, представляя собой максимально интегрированные решения с минимумом внешних компонентов.

**Преобразователь синусно-косинусного сигнала в код положения K1382HX045 [6].** Микросхема предназначена для работы с внешними чувствительными элементами или датчиками, формирующими сигнал положения в виде фазы синусно-косинусного (квадратурного) сигнала, такими как магниторезисторы, датчики Холла, законченные энкодеры с синусно-косинусным выходом. Структурная схема микросхемы показана на рис. 1, а основные технические характеристики в табл. 1.

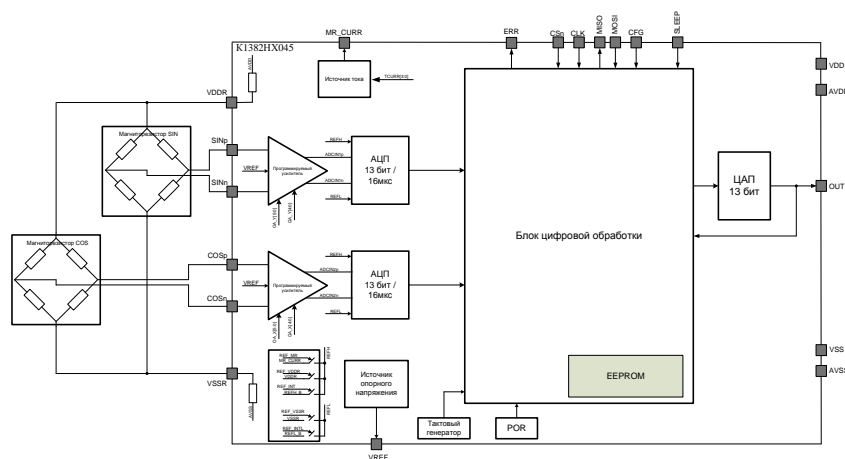


Рис. 1. Структурная схема микросхемы K1382HX045

Таблица 1

Параметр	Значение			Единицы измерения
	мин	тип	макс	
Напряжение питания	4,5	5	5,5	В
Ток потребления	-	11	13	мА
Электрическое разрешение, градусов	-	0,04	-	град.
Угловая ошибка	-1,35	-	1,35	град.
Настройка нулевого положения	0	-	360	град.
Время включения	-	-	2	мс
Время преобразования	-	-	16	мкс
Время установления выходного сигнала	-	-	1.8	мс
Частота сигнала CLK интерфейса SPI/SSI	-	-	4	МГц
Диапазон регулировки коэффициента усиления	13	-	110	раз
Диапазон рабочих температур	-60	-	+125	°С

Передаточная характеристика микросхемы показана на рис. 2.

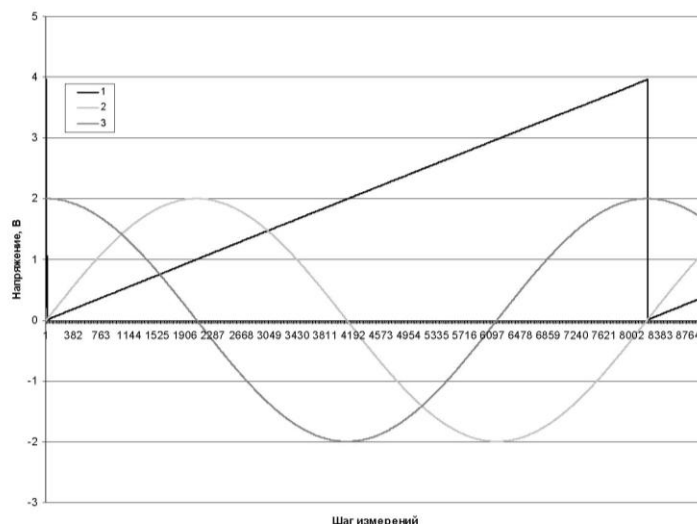


Рис. 2. Передаточная характеристика микросхемы K1382HX045. 1 – выходное напряжение, 2 – вход синус (дифференциальный), 3 – вход косинус (дифференциальный)

Микросхема содержит входные дифференциальные усилители с программируемым коэффициентом усиления и напряжения смещения. Коэффициент усиления программируется в пределах 13-110, что позволяет состыковать микросхему с широким набором чувствительных элементов. Также возможен режим отключения усилителя и подачи сигнала напрямую на вход АЦП, что актуально для законченных синусно-косинусных энкодеров с «большим» сигналом. С выхода усилителей сигнал поступает на 13-ти битные сигма-дельта АЦП с временем преобразования 16 мкс. Схема позволяет выбирать 3 возможных варианта подключения внешнего сенсора и подачи опорного напряжения на АЦП:

- 1) питание сенсора от напряжения питания микросхемы, опорное напряжение берется с плеч моста;

2) опорное напряжение берется от внутреннего стабильного опорного напряжения;

3) питание сенсора от встроенного источника тока, опорное напряжение берется с плеч моста.

С выхода АЦП сигнал поступает на блок цифровой обработки, осуществляющий вычисления кода углового положения с помощью алгоритма CORDIC [7]. Вычисленное значение кода положения корректируется – возможна подстройка нулевого положения, крутизны преобразования, ограничение верхнего и нижнего пороговых уровней, и далее поступает на выход SPI и на выходной ЦАП.

Микросхема имеет встроенную диагностику амплитуды входного сигнала, формирование сигнала ошибки при ее снижении ниже заданного порогового значения или превышении опорных уровней, а также имеет встроенный блок автоматической регулировки усиления, позволяющий привести амплитуду сигнала на входе АЦП к заданному уровню путем коррекции коэффициента усиления входных усилителей. Сигнал ошибки выводится на выходную контактную площадку ERR.

Для облегчения согласования синфазного уровня сигналов с чувствительных элементов (особенно для внешних синусно-косинусных энкодеров с отличным от питания микросхемы питанием) имеется выход опорного синфазного уровня входных усилителей.

Хранение данных осуществляется во встроенной EEPROM. Настройка микросхемы производится как по интерфейсу SPI, так и по однопроводному интерфейсу, совмещенному с аналоговым выходом.

Микросхема K1382HX045 является функциональным аналогом преобразователей, используемых в таких датчиках положения как KMA199 [8], KMA200 [9] фирмы NXP Semiconductors. По сравнению с ними микросхема K1382HX045 обладает большим быстродействием и интегрирует как аналоговый выход, так и SPI (с поддержкой режима SSI), а также однопроводный интерфейс.

Были проведены исследования микросхемы в диапазоне температур, которые показали ее работоспособность в широком диапазоне температур от -60 до +150 °С.

**Применение преобразователя K1382HX045 – энкодер углового положения абсолютный.** Энкодер углового положения преобразует угол поворота вала в пределах одного полного оборота 0-360 градусов в 12-ти разрядный цифровой код абсолютного углового положения, считываемый по последовательному цифровому интерфейсу SPI и в линейный аналоговый сигнал. В качестве чувствительных элементов датчика был использован синусно-косинусный зонд на миниатюрных преобразователях Холла производства ООО «НТЦ Вист групп сенсор» [10] и магнитная система из двух магнитов из материала SmCo. Структурная схема энкодера показана на рис. 3.

Энкодер передает данные и настраивается через цифровой интерфейс SPI, реализуемый на любом современном микроконтроллере. Микросхема поддерживает скорость обмена с тактовой частотой до 4 МГц (4.5 мкс на передачу одного значения углового положения). При необходимости передавать данные на значительное расстояние между микросхемой и разъемом могут быть установлены дифференциальные драйверы интерфейса RS-422. При этом, если нет необходимости производить настройку датчика "в поле", микросхема позволяет для считывания угловых данных использовать интерфейс SSI [11], состоящий только из линий Clock (вывод CLK микросхемы) и Data (вывод MISO микросхемы). В этом случае на вход CSn должна быть подключена схема формирования сигнала сброса низкого уровня с задержкой не менее 1 мс после включения питания.

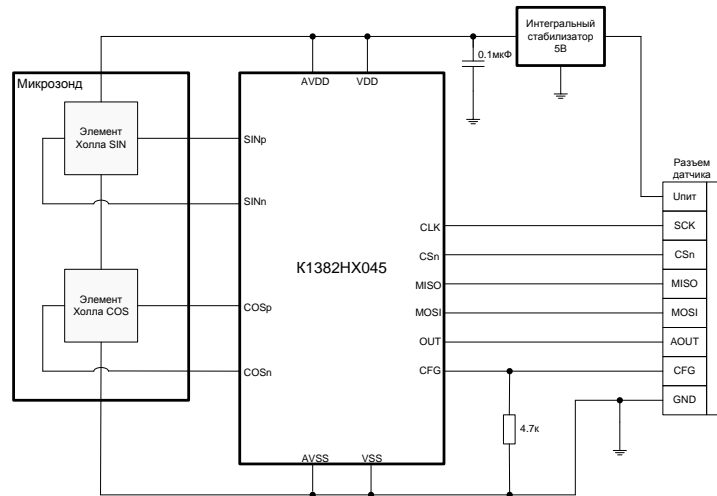


Рис. 3. Структурная схема энкодера углового положения

Фотография энкодера приведена на рис. 4.



Рис. 4. Энкодер углового положения на основе микросхемы K1382HX045

График ошибки преобразования на один полный оборот энкодера показан на рис. 5. Ошибка преобразования составляет не более  $\pm 0.5$  град.

На основе микросхемы K1382HX045 также был разработан датчик дроссельной заслонки для автомобилей VA3 [12], в качестве чувствительных элементов использовался квадратурный магниторезистор MPC-20 [13], аналогичный по характеристикам AMR-сенсору KMZ-41 фирмы NXP.

Помимо датчиков углового положения микросхема позволяет конструировать и датчики линейного перемещения на основе, например, магниторезистивного чувствительного элемента iC-SM5L [14] и аналогичных.

**Микросхема однокристалльного магнитного энкодера положения ENC\_ASIC2 [15].** В отличие от K1382HX045, данная микросхема является полностью интегрированным решением, совмещающим на одном кристалле массив магниточувствительных элементов и схемы аналоговой и цифровой обработки. Структурная схема микросхемы показана на рис. 6, а основные технические характеристики приведены в табл. 2.



Рис. 5. График ошибки преобразования на полный оборот энкодера.  
1 – ошибка преобразования угла, градусы

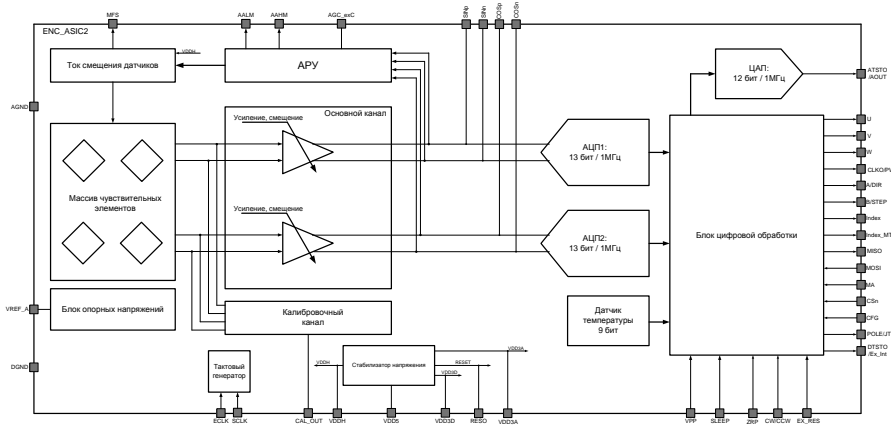


Рис. 6. Структурная схема микросхемы однокристалльного магнитного энкодера положения ENC\_ASIC2

Таблица 2

Параметр	Значение			Единицы измерения
	мин	тип	макс	
Напряжение питания	4,5	5	5,5	В
Ток потребления	-	-	30	мА
Электрическое разрешение, градусов	-	-	0,09	град.
Угловая ошибка	-0,35	-	0,35	град.
Настройка нулевого положения	0	-	360	град.
Диапазон индукции магнитного поля	20	-	80	мТл
Постоянное магнитное смещение	-15	0	15	мТл
Время преобразования	-	1	-	мкс
Время включения	-	1	2	мс
Частота сигнала CLK интерфейса SPI/SSI	-	-	4	МГц
Диапазон рабочих температур	-60	-	+125	°С

Как видно из структурной схемы, микросхема включает массив магниточувствительных элементов – элементов Холла, расположенных на кристалле таким образом, что выходной сигнал сенсорной системы формирует один период синусо-косинусного сигнала на один оборот торцевого диаметрально намагниченного магнита, расположенного над микросхемой [16, 17].

Магнитное поле магнита быстро падает от расстояния до его поверхности, что будет сказываться на амплитуде сигнала с сенсорной системы и следовательно, на ошибке преобразования, т.к. в зависимости от внешних условий, точности монтажа, вибрации зазор между поверхностью магнита и кристаллом микросхемы будет варьироваться.

Для определения диапазона изменения значения индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнита было проведено численное трехмерное моделирование магнитной системы для разных размеров цилиндрического магнита из материала NdFeB. Обобщенные результаты моделирования приведены на рис. 7 [18].

Результаты моделирования показывают, что для разных размеров магнитов и расстояния 1–2 мм от его поверхности индукция магнитного поля изменяется от 20 до 80 мТл.

Микросхема ENC\_ASIC2 имеет встроенную систему автоматической регулировки усиления, которая в зависимости от амплитуды синусо-косинусного сигнала корректирует ток через элементы Холла. Таким образом, сенсорная система формирует сигнал стабильной амплитуды в практическом диапазоне значений индукции магнитного поля, что обеспечивает определенную толерантность микросхемы к внешним воздействиям и неидеальностям монтажа.

Для компенсации напряжения смещения элементов Холла микросхема содержит встроенную систему компенсации по алгоритму модуляции-демодуляции или «spinning-current technique» [19].

Данная микросхема обеспечивает разрешение преобразования 4096 отсчетов на один оборот и скорость преобразования в 1 мкс, что соответствует скорости вращения вала двигателя с торцевым магнитом до 14000 об/мин.

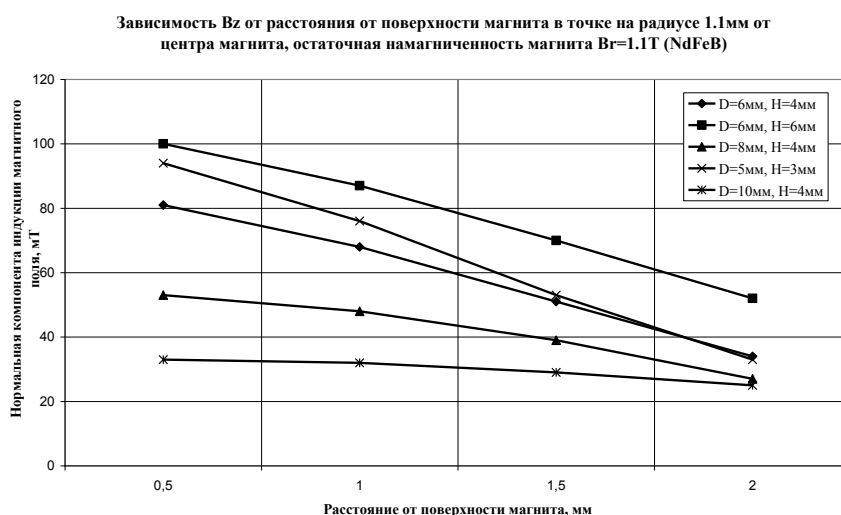


Рис. 7. Зависимость вертикальной компоненты индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнита для магнитной системы с магнитами разной конфигурации, результаты численного моделирования [18]



С выхода АЦП сигнал поступает на блок цифровой обработки. Вычисление кода положения производится конвейерным алгоритмом CORDIC [20] за один такт. Микросхема позволяет производить подстройку нулевого положения как записью постоянного значения в регистр нулевого положения, так и путем установки текущего положения нулевым путем подачи логического импульса на вход ZRP микросхемы. Микросхема поддерживает многооборотный режим работы, с программируемым до 1024 количеством оборотов.

Микросхема имеет широкий набор выходных интерфейсов: SPI/SSI, инкрементальный в виде квадратур A/B/Index и в виде шаг/направление, ШИМ, выход компаратора положения, аналоговый линейный выход, трехфазный интерфейс для управления обмотками вентильного двигателя, выход прерывания. Обобщенно временные диаграммы работы показаны на рис. 8 для трехоборотного режима.

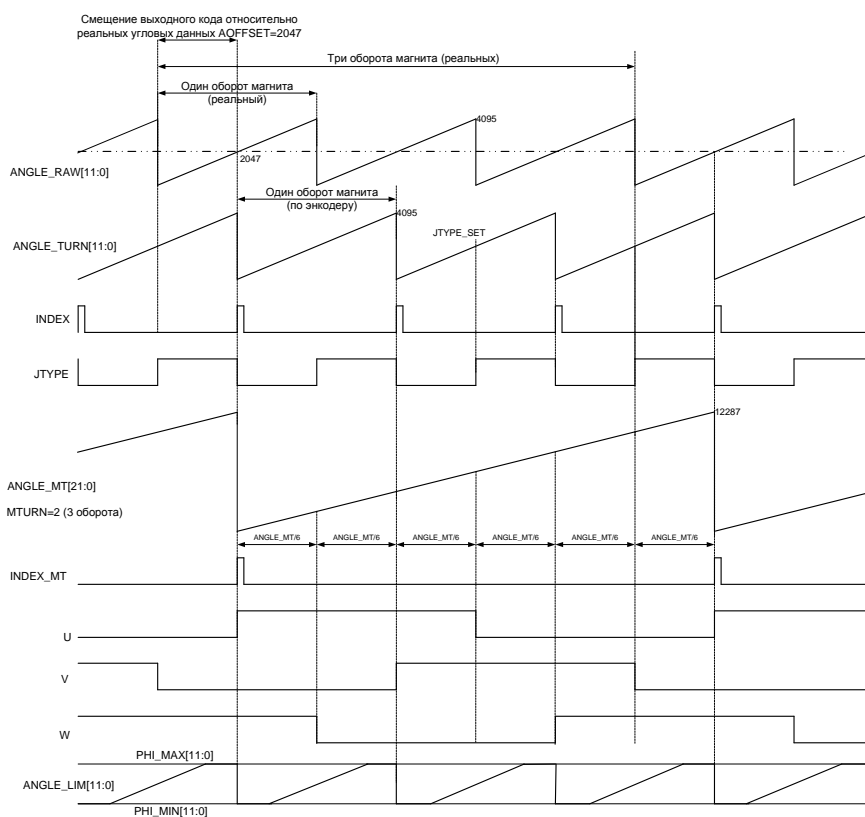


Рис. 8. Временные диаграммы работы микросхемы ENC\_ASIC2, многооборотный режим - три оборота

Микросхема имеет встроенный температурный сенсор, который может быть использован для диагностики. Показания температурного сенсора считываются по интерфейсу SPI.

Благодаря своим скоростным параметрам и практически полному отсутствию внешних компонент для работы, данная микросхема может быть применена в первую очередь для создания интегрированных в корпус систем управления вентильных двигателей. Это соответствует с современными тенденциями отказа от управления вентильным двигателем по трем дискретным датчикам Холла и переходу к управлению по энкодеру положения [21, 22].

Микросхема имеет специальный аналоговый выход калибровки амплитуда на выходе которого зависит от смещения магнита от центра сенсорной системы. Это позволит облегчить монтаж магнитной системы энкодера и обеспечить необходимую точность.

Сравнение микросхемы ENC\_ASIC2 с конкурирующими иностранными разработками приведено в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики	ENC_ASIC2	iC-MH, iC-Haus [23]	AS5145, AMS [24]	AM4096, RLS [25]
Разрешение	12	12	12	12
Время преобразования	1мкс	0.12мкс	96мкс	0.7мкс
Счетчик оборотов	10 бит	Нет	Нет	Нет
Синусно-косинусный выход	Есть	Нет	Нет	Есть
Аналоговый выход	Есть	Нет	Нет	Есть
Интерфейс SPI	Есть	Есть	Есть	Нет
Интерфейс SSI	Есть	Есть	Есть	Есть
Инкрементальный выход	Есть	Есть	Есть	Есть
Выход UVW	Есть	Есть	Нет	Есть
Выход ШИМ	Есть	Нет	Есть	Есть
Выход Step+Dir	Есть	Нет	Нет	Нет
Подстройка нулевого положения	Есть	Есть	Есть	Есть
Подстройка ограничивающих пороговых значений положения	Есть	Нет	Нет	Нет
Встроенный температурный сенсор	Есть	Нет	Нет	Нет
Выход калибровки	Есть	Нет	Есть	Нет

Результаты сравнения показывают, что разработанная микросхема ENC\_ASIC2 имеет конкурентоспособные характеристики по сравнению с зарубежными функциональными аналогами.

**Заключение.** Разработанные ЗАО «ЗНТЦ» микросхемы K1382HX045 и ENC\_ASIC2 представляют собой современные решения для создания датчиков положения, в первую очередь на магнитном эффекте. Благодаря высокой степени интеграции и большому количеству коммуникационных интерфейсов, особенно для микросхемы однокристалльного энкодера ENC\_ASIC2, данные разработки могут использоваться в широком классе применений. В частности на основе микросхемы ENC\_ASIC2 возможно создание компактных модулей датчиков положения для интеграции в вентильные двигатели, что соответствует современным тенденциям в приводной технике.

Разработанные микросхемы обладают конкурентоспособными характеристиками по сравнению с зарубежными аналогами и будут востребованы при разработке отечественной аппаратуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Ч. 12. Актуальные классические принципы оптоэлектроники в автоэлектронике. Компоненты и технологии. – 2006. – № 5.
2. Absolute Encoder Design: Magnetic or Optical? IC-Haus white paper, 2012, [http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP6en\\_Magnetic\\_vs\\_optical\\_17092012.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP6en_Magnetic_vs_optical_17092012.pdf).
3. Патент США № 20120153940. Энкодер углового положения с магнитной связью с уменьшением угловой ошибки. Дата публикации 21.06.2012.
4. RM44 magnetic encoder base unit datasheet. RLS merilna tehnika, 2010.
5. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Ч. 8. Классические индуктивные преобразователи – надежный запас. Компоненты и технологии. – 2005. – № 9.
6. K1382HX045 вер.2 БИС преобразователя фазы квадратурного сигнала в код положения (БИС датчика угла). <http://www.zntc.ru/upload/medialibrary/%D0%A1%D0%BF%D0%B5%D1%86%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20K1382%D0%9D%D0%A5045.pdf>.
7. *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.
8. KMA199E Datasheet. Programmable angle sensor. NXP Semiconductor, 2007.
9. KMA200 Datasheet. Programmable angle sensor. NXP Semiconductor, 2011.
10. *Драпезо А.П., Буслов И.И.* Применение микроминиатюрных измерительных преобразователей Холла из гетерозипитаксиальных структур и устройств на их основе в космическом приборостроении // Материалы XIII научно-практического семинара «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур». – 2013. – С. 56-58.
11. *Жданкин В.* Абсолютные датчики углового положения с интерфейсом SSI. СТА. – 2004. – № 1. – С. 48-57.
12. *Прокофьев Г.В., Стахин В.Г., Обедин А.А., Дюжев Н.А., Юров А.С., Мазуркин Н.С.* Создание магнитных датчиков углового положения на основе отечественной специализированной БИС преобразователя фазы квадратурного сигнала – код положения K1382HX045 // Материалы VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, АЭП-2014. – Саранск, 2014. – Т. 1. – С. 410-412.
13. *Дюжев Н.А., Юров А.С., Стахин В.Г.* Магниторезистивные сенсоры и датчики на их основе // Материалы XIII научно-практического семинара «Проблемы создания специализированных радиационно-стойких СБИС на основе гетероструктур». – 2013. – С. 68-79.
14. iC-SM5L LINEAR AMR SENSOR (5 mm) Datasheet. iC-Haus, 2006.
15. ENC\_ASIC2 БИС однокристалльного энкодера положения. [http://www.zntc.ru/upload/medialibrary/ENC\\_ASIC2\\_datasheet\\_v1.pdf](http://www.zntc.ru/upload/medialibrary/ENC_ASIC2_datasheet_v1.pdf).
16. *Сысоева С.* Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Ч. 5. Новые перспективы бесконтактных угловых измерений в диапазоне угла 360 градусов: снова датчики Холла – угловые магнитные энкодеры. Компоненты и технологии. – 2005. – № 6.
17. *Ausserlechner U.* A theory of magnetic angle sensors with hall plates and without fluxguides // Progress In Electromagnetics Research B. – 2013. – Vol. 49. – С. 77-106.
18. Отчет о прикладных научных исследованиях по теме «Разработка конструктивно-технологических решений создания микросенсорного интеллектуального магниточувствительного интегрального датчика положения для контроля подвижных узлов современных интеллектуальных робототехнических комплексов на основе микросистемной техники», ПНИ №RFMEFI57914X0059, ЗАО «ЗНТЦ», 2014. – С. 162-168.
19. *Alberto Bilotti, Gerardo Monreal, Ravi Vig.* Monolithic Magnetic Hall Sensor Using Dynamic Quadrature Offset Cancellation // IEEE journal of solid-state circuits. – June 1997. – Vol. 32, No. 6. – С. 829-836.
20. *Bruguera J.D., Guil N., Lang T., Villalba J., Zapata E.L.* CORDIC Based Parallel/Pipelined Architecture for the Hough Transform // J. VLSI Signal Processing. – 1996. – Vol. 12, no. 3. – С. 207-221.
21. *Einspieler R.* How improved magnetic sensing technology can increase torque in BLDC motors. AMS technical article.

22. Palaniappan S. Commutation of a BLDC Motor with Various Pole-Pairs Can Be Simplified By Using Absolute Encoder Feedback. Avago technologies, 2010. <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0458EN>.
23. iC-MH, 12 BIT ANGULAR HALL ENCODER datasheet. iC-Haus GmbH, 2008. [http://www.ichaus.de/upload/pdf/Mh\\_b1es.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/Mh_b1es.pdf).
24. AS5145H/AS5145A/AS5145B 12-Bit Programmable Magnetic Rotary Encoder datasheet. AMS AG. <http://ams.com/eng/content/download/50206/533867/12670>.
25. AM4096 – Angular magnetic encoder IC datasheet. RLS merilna tehnika, 2010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор П.Г. Михайлов.

**Прокофьев Георгий Всеволодович** – ЗАО "Зеленоградский нанотехнологический центр"; e-mail: [prokofiev@idm-plus.ru](mailto:prokofiev@idm-plus.ru); 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, 5, стр. 23; тел.: 84997206972; ведущий инженер.

**Стахин Вениамин Георгиевич** – e-mail: [stakhin@idm-plus.ru](mailto:stakhin@idm-plus.ru); тел.: 84997208952; начальник дизайн-центра проектирования СБИС.

**Обеднин Антон Александрович** – e-mail: [obednin@idm-plus.ru](mailto:obednin@idm-plus.ru); тел.: 84997206972; главный конструктор.

**Prokofiev Georgy Vsevolodovitch** – CJSC "Zelenograd nanotechnology center"; e-mail: [prokofiev@idm-plus.ru](mailto:prokofiev@idm-plus.ru); 5, Georgievskiy prospekt, bld. 23; Zelenograd, Moscow, 124498, Russia; phone: +74997206972; leading engineer.

**Stakhin Veniamin Georgievitch** – e-mail: [stakhin@idm-plus.ru](mailto:stakhin@idm-plus.ru); phone: +74997208952; chief of VLSI design centre.

**Obednin Anton Aleksandrovitch** – e-mail: [obednin@idm-plus.ru](mailto:obednin@idm-plus.ru); phone: +74997206972; chief designer.

УДК 621.3.089.2, 681.518.3

**И.В. Щербань, Д.С. Конев, С.А. Толмачев**

### **КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГРУБЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ И МОБИЛЬНОГО GPS НАВИГАТОРА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

*Рассмотрен метод комплексирования выходных данных мобильных спутниковых навигаторов наземных транспортных средств (ТС) и измерений автономных грубых инерциальных микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков. Интеграция спутниковой и инерциальной навигационных систем (НС) выполнена на уровне тесно связанных систем. Традиционные методы тесной интеграции изначально имеют методические ошибки, обусловленные допущением о малости отклонений погрешностей измерений инерциальных датчиков от их модельных значений и, соответственно, применением процедур линеаризации к этим модельным уравнениям. На практике же оказывается, что работу МЭМС датчиков на длительных временных интервалах и в различных условиях эксплуатации недопустимо описывать с помощью линейных моделей уравнений ошибок. Априорно неизвестный рост погрешностей линеаризации предопределяет известные проблемы со сходимостью стохастических фильтров. Например, в условиях деградации наблюдаемого спутникового созвездия время установления оценок может достигать десятков минут. Подобные временные провалы в навигационных измерениях для НС транспортных средств, используемых в реальном времени, недопустимы. Разработан метод комплексирования измерений грубых инерциальных датчиков и выходных данных мобильных спутниковых навигаторов ТС, основанный на нелинейной фильтрации в пространстве состояний. Метод обеспечивает устойчивое непрерывное оценивание полного вектора состояния наземного ТС с достаточной точностью в условиях деградации видимого спутникового созвездия. Кроме того, метод работоспособен при полном отсутствии спутниковой информации в течение временных интервалов длительностью не более 1 минуты. Процедура начальной коррекции по полному созвездию спутников, обязательная для тра-*