

Ожикенов Касымбек Адильбекович – Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева; e-mail: kas_ozhiken@mail.ru; 050013, г. Алма-Ата, ул. Сатпаева, 22а; тел.: 87012237538, 87073357729; кафедра робототехники и технических средств автоматизации; зав. кафедрой; к.т.н.

Касимов Абдуразак Оразгелдиевич – e-mail: 64razak@mail.ru; тел.: 87017423095; кафедра радиотехники, электроники и телекоммуникации; зав. кафедрой; к.т.н.

Михайлов Петр Григорьевич – Пензенский государственный технологический университет; e-mail: pit_mix@mail.ru; г. Пенза, пр-д Байдукова, 1а; тел.: 89273288810; д.т.н., профессор.

Аналиева Ажар Уразбаевна – e-mail: Eazhara_1980@mail.ru; аспирант.

Ozhikenov Kasymbek Adilbekovich – Kazakh National Technical University. K.I. Satpayev; e-mail: kas_ozhiken@mail.ru; 22A, Satpayev street, Alma-Aty, 050013; phone: +77012237538, +77073357729; the department of robotics and automation of technical equipment; head of department; cand. of eng. sc.

Kasimov Abdurazak Orazgeldievich – e-mail: 64razak@mail.ru; phone: +77017423095; the department of radio engineering, electronics and telecommunications; head of department; cand. of eng. sc.

Mikhailov Peter Gavrilovich – Penza State Technological University; e-mail: pit_mix@mail.ru; 1A, pr. Baidukov, Penza, Russia; phone: +79273288810; dr. of eng. sc.; professor.

Analieva Urazbaevna Azhar – e-mail: Eazhara_1980@mail.ru; postgraduate student.

УДК 004.942

О.Ю. Воронков, С.А. Синютин

МЕТОД СОЗДАНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ МЭМС В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ANSYS

Описывается роль макромоделей (моделей пониженного порядка) в проектировании и испытаниях МЭМС, поясняются их преимущества по сравнению с полными моделями метода конечных элементов (МКЭ) для поведенческого моделирования динамических характеристик МЭМС в реальном времени и гибких исследований свойств полученных объектов. Приводится математическая интерпретация процедуры понижения порядка системы уравнений динамики путём перехода от полной модели, представленной в форме уравнений в переменных состояния, к уравнениям в переменных состояния макромоделей. В обобщённой форме излагается компьютерный метод формирования макромоделей в программе ANSYS на базе исходных полных моделей МКЭ со снижением требований к мощности ЭВМ и сохранением точности оригинальной модели для последующего экспорта матриц массы, жёсткости, демпфирования и пр. в программу MatLab в целях моделирования динамики МЭМС. Описываются и графически иллюстрируются четыре основных этапа работы над макромоделью в системе ANSYS: подготовка модели, этап создания, этап использования и этап расширения. Указываются взаимосвязь этих этапов, результирующие файлы, получаемые в конце каждого этапа и требуемые для дальнейшей работы, раскрывается понятие связанного анализа, обозначается возможность дальнейшей отправки результатов расчёта в систему MatLab. Актуальность работы заключается в необходимости поведенческого моделирования динамики МЭМС в реальном времени для тщательной проверки работоспособности объектов, что трудноосуществимо с применением полных моделей МКЭ по причине их громоздкости, а значит, затрат большого объёма компьютерных ресурсов. Научная новизна результатов состоит в пошаговом описании алгоритма построения макромоделей МЭМС на основе полной модели МКЭ для возможного последующего преобразования данных в формат MatLab Simulink.

Микроэлектромеханическая система; метод конечных элементов; макромодель; ANSYS; MatLab; база данных.

O.Yu. Voronkov, S.A. Sinyutin

THE METHOD OF MACROMODELS CREATION IN ANSYS PROGRAM PACKAGE

The paper describes the role of macromodels (reduced order models) in MEMS design & testing, explains their advantages in comparison with the finite element method (FEM) full models for behavioral modeling of MEMS dynamic characteristics in real-time & flexible study of the objects properties. A mathematical interpretation of the procedure for reducing the system dynamics equations order by switching from the full model in the form of state variables equations to the state variables equations of the macromodel is presented. A computer method for macromodels based on initial full FEM models forming with computer power requirements reducing & accuracy of the original model preserving in ANSYS program for subsequent export of mass, stiffness, damping, etc. matrices into MatLab program for the MEMS dynamics simulation is described in the generalized form. Four main stages of work over the macromodel in ANSYS are described & illustrated graphically: model preparation, generation pass, use pass, & expansion pass. The interrelationships of these stages, the resulting files that are received at the end of each stage & required for further work are marked, the concept of related analysis is explained, the possibility of further calculation results export into MatLab system is denoted. Relevance of the work is the need for MEMS dynamics behavioral modeling in real time to thoroughly verify the objects, what is difficult to realize with the help of full FEM models because of their complexity & costs large amounts of computer resources. Scientific novelty of the results is step by step description of the algorithm for MEMS macromodel based on full FEM model constructing for possible future data conversion into MatLab Simulink format.

Micro-electro-mechanical system; finite element method; macromodel; ANSYS; MatLab; database.

Введение. Отличительной чертой микроэлектромеханических систем (МЭМС) является тесная связь процессов из многих областей физики: механики, гидродинамики, электростатики и т.д. [1, 2]. По этой причине для математического описания динамики МЭМС используются уравнения в частных производных, в большинстве случаев являющиеся нелинейными, и с учётом их взаимного влияния друг на друга численное моделирование динамики устройств чрезмерно усложняется [3–7]. Аналитическое решение таких уравнений реализуется с применением методов конечных элементов (МКЭ) и разностей (МКР), сложность реализации которых сильно зависит от точности математической модели. Как правило, полные модели для их решения указанными методами содержат несколько сотен или тысяч переменных, вклад каждой из которых в общую работоспособность системы во многих случаях не вполне очевиден [8, 9]. Кроме этого, трудноосуществимым оказывается поведенческое моделирование в реальном времени, требующее значительных компьютерных ресурсов при столь большом количестве переменных [10]. В результате полные модели для МКЭ и МКР используются, главным образом, для анализа параметров готовых изделий, нежели для их проектирования [11–13].

Постановка задачи. Ставится задача сокращения числа переменных, описывающих движение анализируемого объекта в пространстве состояний, до нескольких базовых координат. Указанной цели служат так называемые **макромодели**, или **модели пониженного порядка**, которые отражают лишь наиболее важные поведенческие черты системы в нескольких переменных состояниях, описываемых небольшим числом ОДУ динамики [5, 14–16]. Такую компактную модель можно подвергнуть автономному моделированию или включить в состав совокупности моделей на уровне целой системы. Поскольку количество переменных в макромодели значительно меньше по сравнению с полной моделью для методов конечных или граничных элементов, её эффективность при моделировании в реальном времени представляется очевидной. Помимо экономии времени и машинных ресурсов, макромодели имеют ещё одну положительную черту, которая состоит в лёгкости построения на их основе поведенческих моделей, например, в среде *MatLab Simulink* [5].

Для получения макромоделей из полных моделей МКЭ используются разные методы, например, схемотехнический, методы Галёркина, Крылова и др. [17–20]. Система *ANSYS*, выполняющая конечно-элементное моделирование объектов [11, 21–24], применяет для этих целей встроенный алгоритм, основанный на модальном разложении [5].

Математическая суть понижения порядка модели МКЭ состоит в том, что система уравнений в переменных состояния вида

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bf(t), \\ y(t) &= C^T x(t), \end{aligned} \quad (1)$$

имеющая высокий порядок, претерпевает сокращение количества переменных, используемых для описания динамики объекта, после чего приводится к виду:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\text{пониж.}}(t) &= A_{\text{пониж.}}x_{\text{пониж.}}(t) + B_{\text{пониж.}}f(t), \\ y(t) &= C_{\text{пониж.}}^T x_{\text{пониж.}}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Размерность матриц A , B , C и внутренних векторов состояния в макромоделе (2) оказывается значительно меньше, чем в модели МКЭ (1); при этом размерность вектора входных воздействий f и вектора выхода y сохраняется [5].

Процедура формирования макромоделе в *ANSYS* для её последующего преобразования в формат программного пакета *MatLab* в целях поведенческого моделирования состоит из четырёх этапов [25, 26]: подготовки модели, этапа создания, этапа использования и этапа расширения (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема процедуры формирования макромоделе

Подготовка модели. Подготовка модели включает в себя формирование конечно-элементной сетки на трёхмерной модели объекта и запись физических файлов, содержащих описание физических сред. В структурном файле хранится информация о механических свойствах конструкции, характеристики материалов и т.д., в электростатическом – параметры проводников, ёмкостных взаимодействий и т.д. В начале этого этапа работы не требуются дополнительные файлы, а в конце сохраняются необходимые для этапа создания физические файлы и база данных модели (рис. 2).



Рис. 2. Подготовка модели и физических файлов

Этап создания. Этап создания предполагает выполнение статического и модального анализа, получение информации о смещениях и собственных векторах и непосредственное создание макромодели на основе конечно-элементной сетки. Процедура создания макромодели требует много времени, но должна быть выполнена лишь один раз, после чего становится возможным осуществление любого анализа с точностью, свойственной МКЭ, но значительно более высокой скоростью. В качестве исходных используются файлы, полученные на предыдущем этапе. Подробное описание этапа создания представлено на рис. 3.

Этап использования. Этап использования включает в себя связанное структурно-электростатическое исследование динамики макромодели с применением необходимого инструментария. На этом этапе к модели через порты могут быть присоединены контрольно-измерительные приборы для изучения влияния механических воздействий, колебаний температуры, электрических полей и пр. на работу системы (рис. 4). Механические деформации отображаются лишь в отдельных точках, называемых главными узлами, что является следствием сокращения числа переменных после понижения порядка модели.

Этап расширения. Этап расширения представляет собой обратное преобразование полученных на этапе использования результатов к полноразмерной модели МКЭ. Это требуется для проверки работоспособности систем в ситуациях критических нагрузок, создания трёхмерных анимированных графических моделей объектов (рис. 5).

Взаимосвязь этапов и файлов. Описываемая методика работы над макромоделью характеризуется получением на очередном этапе файлов, необходимых для запуска следующего этапа с их использованием в качестве исходных данных. Такая иерархическая структура, предполагающая зависимость дальнейших результатов от ранее полученных данных, может быть названа **связанным анализом** [25]. Взаимосвязь этапов разработки макромодели и файлов, создаваемых по окончании каждого этапа, представлена на рис. 6.

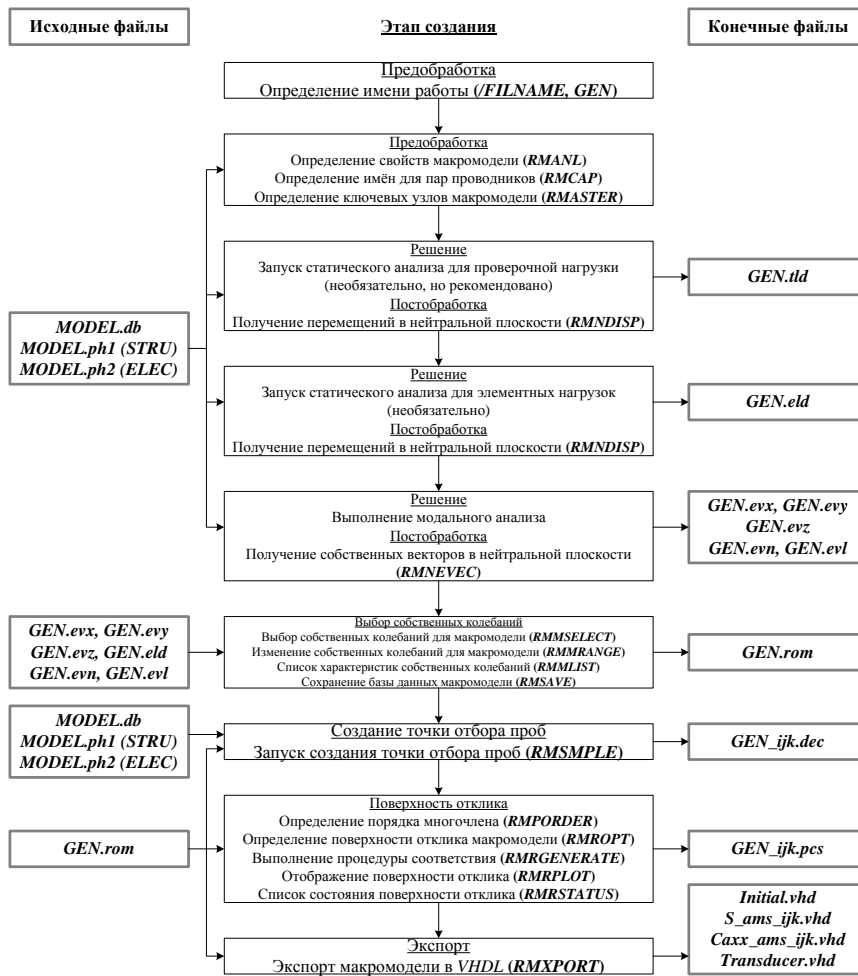


Рис. 3. Этап создания

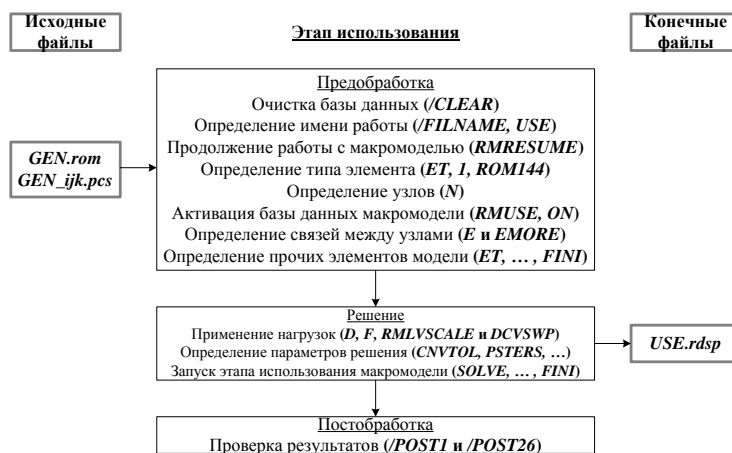


Рис. 4. Этап использования

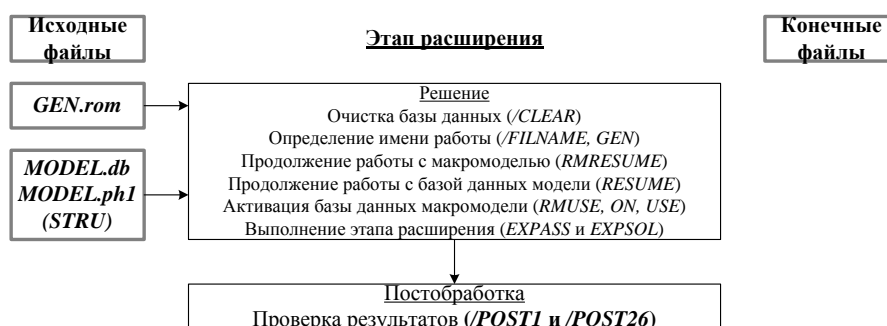


Рис. 5. Этап расширения



Рис. 6. Взаимосвязь этапов и файлов

По завершении описанной процедуры необходим ряд преобразований полученной базы данных, чтобы оказалось возможным извлечение матриц массы, жёсткости и прочих из базы и их экспорт в среду *MatLab*. Алгоритм преобразований изложен в работе [27]. После этого может быть сконструирована поведенческая *Simulink*-модель для изучения динамики макромодели, сформированной из вышеупомянутых матриц, которые были получены в *ANSYS* и экспортированы в *MatLab*.

Заключение. Таким образом, в данной работе представлен алгоритм формирования макромодели МЭМС встроенными средствами программного пакета *ANSYS* на базе полной модели МКЭ, в обобщённой форме описаны все этапы работы и результаты, получаемые на каждом этапе. Преимуществом такого подхода перед работой с полной конечно-элементной моделью является возможность существенно упростить модель МЭМС, сконструированную в *ANSYS*, и адаптировать её к среде системы *MatLab* для моделирования динамики объекта в реальном времени с минимальным снижением точности, что достигается сохранением главных динамических характеристик объекта после сокращения числа уравнений. Кроме того, полученная макромодель может быть переведена на различные языки описания аппаратуры, например, *VHDL*, что значительно расширяет сферу её применения.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wachutka G.* The art of modelling coupled-field effects in microdevices and Microsystems // Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems. – 1999. – P. 697-703.
2. *Ziegler F.* Mechanics of Solids and Fluids. Springer, 1998.
3. *Лысенко И.Е.* Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 103 с.
4. *Chollet F., HB. Liu.* A (not so) short Introduction to Micro Electromechanical Systems // URL: <http://memscyclopedia.org/Document/introMEMS.pdf>.
5. *Petrenko A.I.* Macromodels of micro-electro-mechanical systems (MEMS) // Institute of the Applied System analysis of NTUU “KPI” URL: <http://grid.kpi.ua/files/2011-2.pdf>.
6. Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White. MEMS Mechanical Sensors. London: In-Print-Forever, 2003. – 282 p.
7. *Korvink Jan G. and Paul Oliver.* MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications. Norwich: William Andrew, Inc., 2006. – 965 p.
8. *Senturia S.D.* Microsystem Design. Kluwer Academic Publishers, 2001.
9. *Gerlach G. and Dötzel W.* Introduction to Microsystem Technology, A Guide for Students, Wiley, Microsystem and Nanotechnology Series, 2008.
10. *Senturia S.D., Aluru N. and White J.* Simulating the behavior of MEMS devices: Computational methods and needs // IEEE Computational Science and Engineering. – 1997. – № 4. – P. 30-43.
11. *Бруяка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. и др.* Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
12. *Рилей Джордж А.* Мир микро- и наноэлектроники: учебное пособие по современным технологиям в производстве микросистем: Пер. с англ. Курск: «Экспромт», 2009.
13. *Eloe J.C.* MEMS and Nano Divergence: Status of MEMS industry. YoleDevelopment, Sept. 2009.
14. *Hung E.S. and Senturia S.D.* Generating efficient dynamical models for microelectromechanical systems from a few finite-element simulation runs // IEEE Journal of Microelectromechanical Systems. – 1999. – № 8. – P. 280-289.
15. *Zhao X., Abdel-Rahman E.M., and Nayfeh A.H.* A reduced-order model for electrically actuated microplates // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2004. – № 14. – P. 900-906.
16. *Voigt P., Schrag G., König E.-R. and Wachutka G.* Modeling Strategies for Microsystems // Tech. Dig. of MSM'98. – 1998. – P. 517-521.
17. *Lienemann J.* Complexity Reduction Techniques for Advanced MEMS Actuators Simulation // PhD Thesis, University of Freiburg, 2006.
18. *Bai Z., Dewilde P.M., and Freund R.W.* Reduced order modeling. In W.H.A. Schilders and E.J.W. ter Maten, editors, Numerical Methods in Electromagnetics, Handbook of Numerical Analysis. – Elsevier, Amsterdam, 2005. – Vol. XIII. – P. 825-895.
19. *Bui-Thanh T., Willcox K., and Ghattas O.* Model reduction for large-scale systems with high-dimensional parametric input space // SIAM J. Sci. Comput. – 2008. – № 30 (6). – P. 3270-3288.
20. *Segalman D.J.* Model reduction of systems with localized nonlinearities // ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2007. – № 2. – P. 249-266.
21. *Лысенко И.Е., Куликова И.В., Полищук Е.В. и др.* Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS: Учебно-методическое пособие. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 42 с.
22. *Басов К.А.* ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДКМ Пресс, 2005. – 640 с.
23. *Жидков А.В.* Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования: Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». – Нижний Новгород, 2006. – 115 с.

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.
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 ± 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