

НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.383

МАГНИТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ НУЛЕВОГО СИГНАЛА В ГИБРИДНОМ ДВУХКООРДИНАТНОМ МЭМС-ГИРОСКОПЕ R-R-R-ТИПА

С.Ф. Коновалов, Ю.А. Пономарев, Д.В. Майоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: quayside@mail.ru

В настоящее время одним из основных препятствий на пути повышения точности МЭМС-гироскопов является квадратурная погрешность, основной причиной возникновения которой является искажение геометрии упругого подвеса в процессе его изготовления. Рассмотрены двухкоординатный гибридный МЭМС-гироскоп R-R-R-типа и причины возникновения искажений формы поперечного сечения упругого подвеса, приводящие к возникновению паразитных колебаний маятника по измерительным осям. Предложен способ компенсации нулевого сигнала, вызванного квадратурной погрешностью, путем изменения формы магнитного поля в рабочих зазорах датчиков момента. Проведен выбор геометрии профиля элементов магнитопровода, отвечающих за форму поля в зазорах, в целях повышения эффективности метода. Оценена эффективность предложенного метода и сделаны выводы о возможности его применения.

Ключевые слова: микроэлектромеханический датчик угловой скорости, гироскоп, квадратурная погрешность.

MAGNETIC COMPENSATION OF A ZERO SIGNAL IN A TWO-AXIS HYBRID R-R-R-TYPE MEMS GYRO

S.F. Konovalov, Yu.A. Ponomarev, D.V. Mayorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: quayside@mail.ru

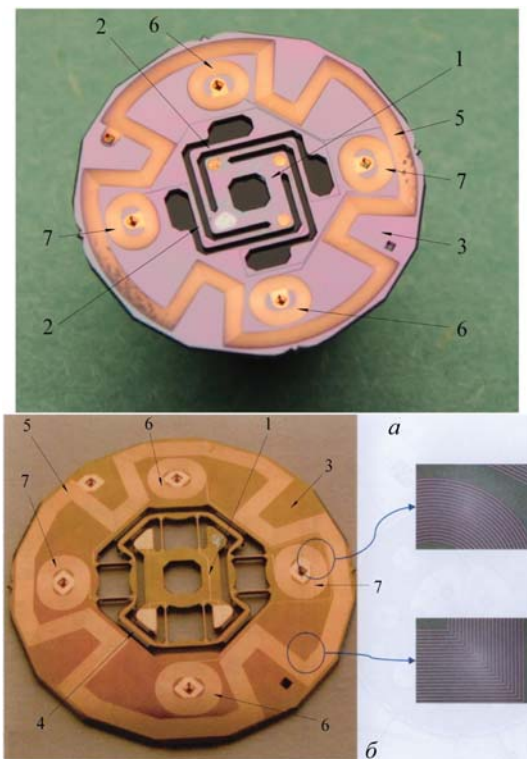
Currently a main obstacle to high-performance of MEMS gyros is the quadrature error, which is basically caused by geometry distortion of the flexible suspension during its manufacturing. The two-axis hybrid R-R-R-type MEMS gyro and the causes of originating of the shape distortions of the flexible suspension cross-section, which lead to emergence of pendulum stray oscillations around the gyro output axes, are considered. The way for compensation for a zero signal (induced by the quadrature error) by transforming a shape of the magnetic field in working gaps of torque motors is offered. To increase an efficiency of the offered method, the selection of shape geometry of magnetic conductor influencing the magnetic field shape in gaps is performed. The efficiency of the offered method is estimated, and conclusions on the possibilities of its application are drawn.

Keywords: microelectromechanical angular rate sensor, gyroscope, quadrature error.

Основные погрешности МЭМС-гироскопов R-R-R типов связаны с искажением формы упругих балок подвеса крутильного маятника, вызванным технологическими причинами. Для гибридного МЭМС-гироскопа [1–3], маятник которого (рис. 1) изготавливается методами

Рис. 1. Варианты маятниковых узлов двухкоординатного МЭМС-гироскопа R-R-R-типа:

1 — неподвижная центральная часть; *2* — спиралевидный упругий подвес; *3* — подвижная часть; *4* — упругий подвес с внутренней рамкой; *5* — печатные обмотки возбуждения; *6, 7* — печатные обмотки компенсационных моментных датчиков



жидкостного травления из вафли монокристаллического кремния с плоскостью среза (100) и ориентацией балок по направлениям $\langle 010 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$, при изготовлении упругих балок необходимы двусторонняя фотолитография и травление вафли. При одностороннем травлении размеры щелей, окружающих балки, удваиваются и становятся равными двойной толщине вафли, что не позволит рациональным образом использовать ее площадь. Из-за ошибок совмещения масок при их двусторонней фотолитографии профиль поперечного сечения упругих перемычек приобретает искажения (рис. 2). При таком профиле балок силы F_z , возбуждающие крутильные колебания маятника, становятся неперпендикулярными нейтральному сечению балок и будут вызывать колебания маятника вокруг выходных осей прибора, перпендикулярных оси возбуждения крутильных колебаний. Эти колебания создают так называемый нулевой сигнал гироскопа, имеющий ту же частоту, что и полезные сигналы гироскопа, вызванные наличием измеряемых угловых скоростей. Фазовый сдвиг нулевого сигнала относительно полезного сигнала гироскопа в газозаполненных приборах зависит от соотношения моментов инерции маятника, коэффициентов демпфирования и угловой жесткости упругого подвеса относительно выходных осей прибора. Он может изменяться в процессе эксплуатации гироскопа, например при изменении температуры, поэтому компенсация нулевого сигнала в электронике прибора затруднена. Желательно

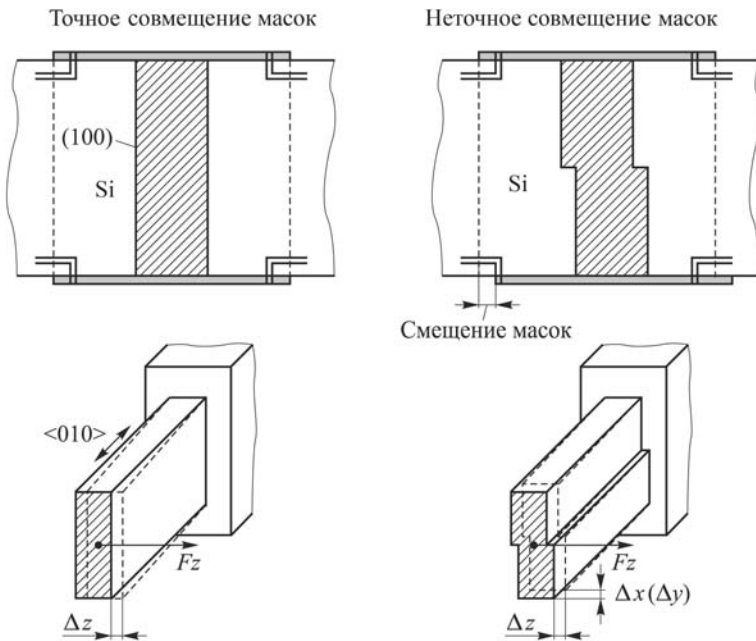


Рис. 2. Погрешности формы поперечного сечения упругих перемычек

устранить колебания непосредственно в самом электромеханическом узле гироскопа в процессе регулировки на этапе сборки [4–9].

В работе [1] рассмотрен гироскоп с магнитоэлектрическими датчиками момента и описана возможность компенсации нулевого сигнала с помощью регулировки направления возбуждающей магнитоэлектрической силы F_z , а также показано, что если в магнитной системе магнитоэлектрического датчика момента возбуждения колебаний (рис. 3) вместо нижних магнитов использовать магнитопроводы с профилированными торцами (регулируемые головки), то в зазорах наряду с основным аксиальным полем B_1 , вызывающим возникновение тангенциальной составляющей силы F_1 , будет образовываться радиальное магнитное поле B_2 , способствующее появлению аксиальной составляющей силы F_2 , способной компенсировать вредные колебания маятника от искажения упругих балок подвеса. При этом значение и направление силы F_2 регулируются путем разворота регулировочных головок, как показано на рис. 4.

Оценим эффективность предложенного метода компенсации нулевого сигнала гироскопа. Для этого смоделируем магнитное поле в системе возбуждения гироскопа. Моделирование выполнено в среде ANSYS.

На рис. 5 показана использованная при моделировании схема расчета магнитного поля в случае выполнения регулировочных головок без профилирования. На рис. 6 (кривые 1) и 7 (кривые 1) приведены распределения по диаметру магнитного зазора аксиальной (B_1) и

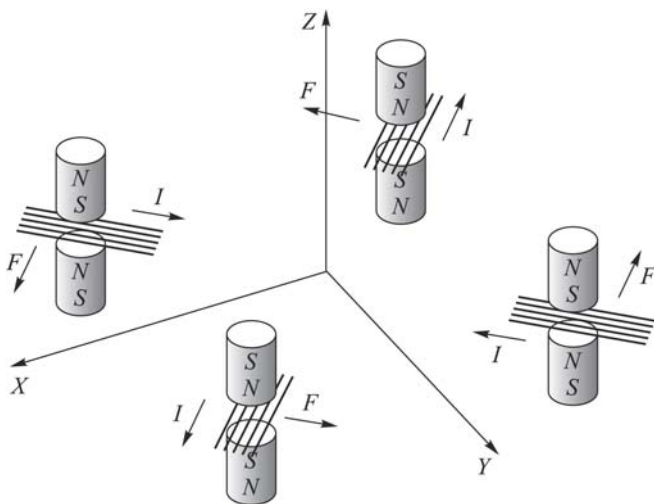


Рис. 3. Система возбуждения колебаний маятника

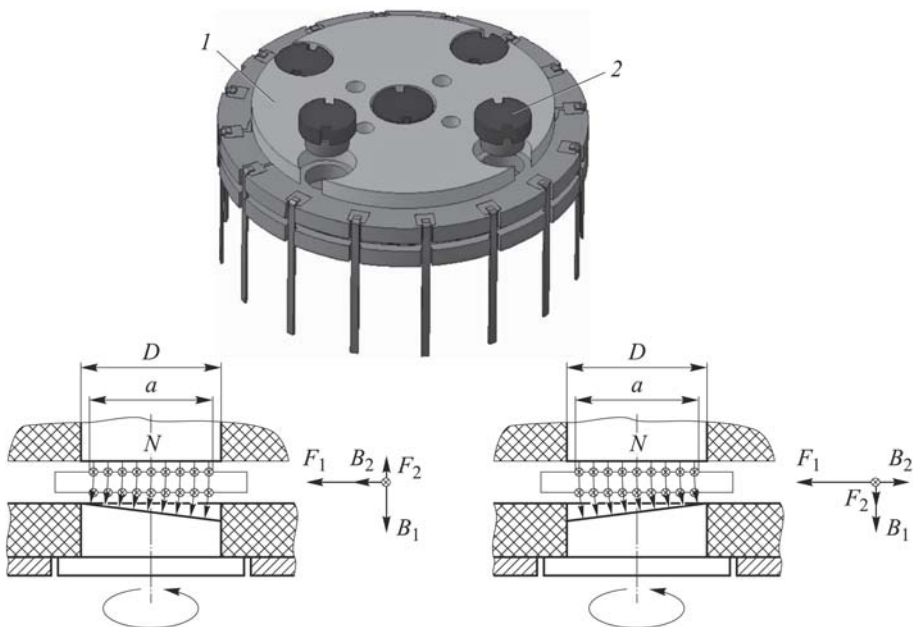


Рис. 4. Собранный чувствительный элемент гироскопа и схема формирования момента, компенсирующего нулевой сигнал гироскопа:

1 – чувствительный элемент гироскопа; 2 – регулировочные головки

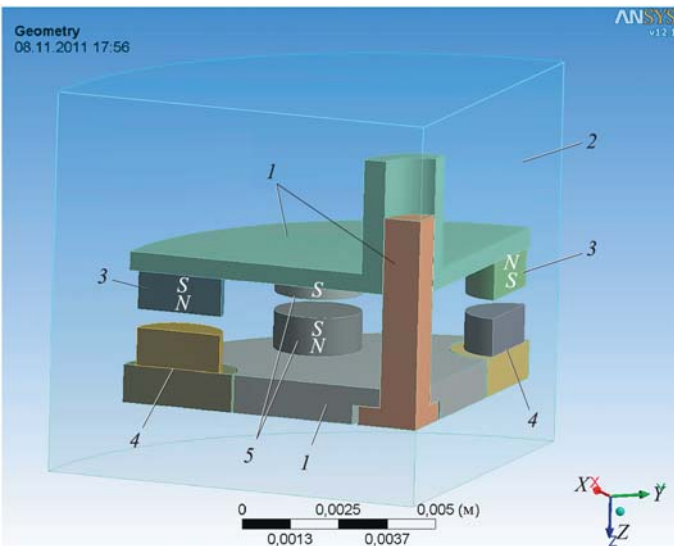


Рис. 5. Расчетная схема магнитной системы с регулировочными головками без профилирования:

1 — магнитопроводы из магнитомягкого материала; 2 — воздушный объем; 3 — магниты системы возбуждения; 4 — регулировочные головки, выполненные из магнитомягкого материала, содержащие цилиндрический вкладыш и головку с пазами под отвертку; 5 — магниты компенсационного моментного датчика

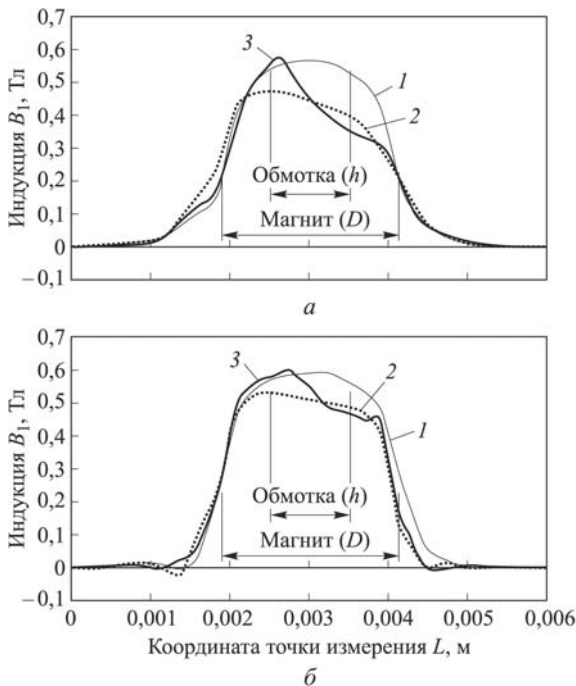
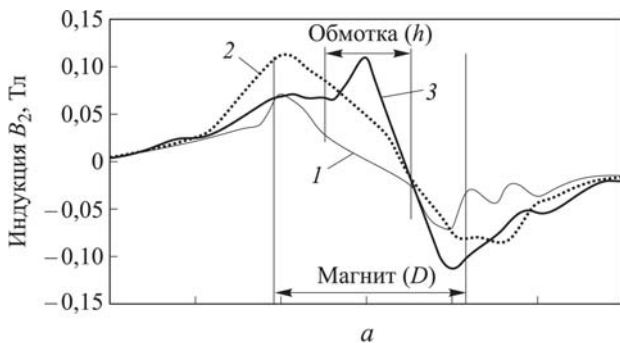
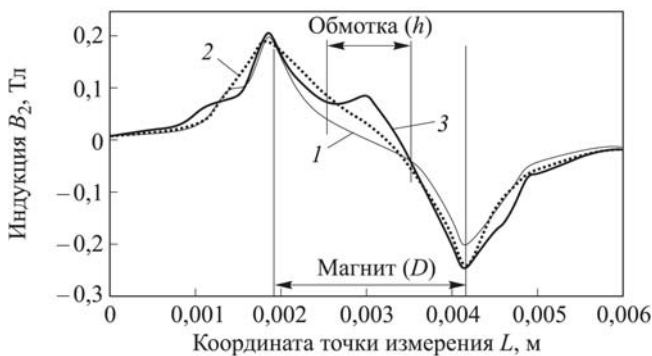


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в аксиальном направлении:
а — со стороны регулировочной головки; *б* — со стороны магнита; кривая 1 — регулировочная головка без профилирования; кривая 2 — то же со скосом; кривая 3 — то же со ступенькой



а



б

Рис. 7. Распределение магнитной индукции в радиальном направлении (обозначения см. рис. 6)

радиальной (B_2) составляющих магнитной индукции для случая, изображенного на рис. 5. Значения индукции даны для слоев воздушного зазора, соответствующих расположению нечетных обмоток (на расстоянии 50 мкм от обращенных к маятнику торцевых поверхностей магнита и вкладыша). На рисунках обозначены зоны, соответствующие диаметру магнита (D) и ширине обмотки возбуждения (h).

Из рис. 7 следует, что при отсутствии профилирования торцевой поверхности магнитопровода радиальная составляющая магнитного поля (кривая 1) в зоне расположения обмотки (h) симметрична относительно центральных витков обмотки возбуждения. В связи с этим в датчиках отсутствует сила F_2 аксиальной направленности.

На рис. 8 показана расчетная схема для случая магнитопровода со скошенным на 10° торцом. Распределение индукции (в тех же слоях воздушного зазора, что и для варианта рис. 5) в аксиальном и радиальном направлениях показано на рис. 6 и 7 (кривые 2). Видно, что скос незначительно изменил аксиальную составляющую магнитной индукции B_1 и, следовательно, тангенциальную составляющую магнитоэлектрической силы F_1 , а распределение радиальной индукции B_2 стало несимметричным. В результате асимметрии распределения B_2

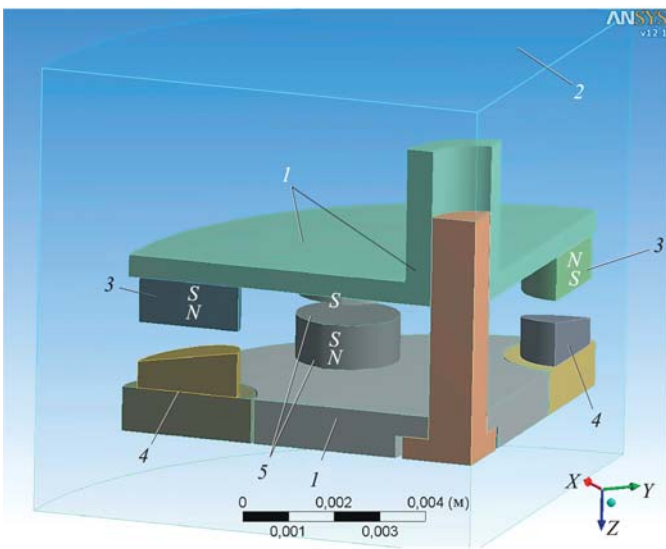


Рис. 8. Расчетная схема регулировочной головки со скошенным торцом:
 4 – регулировочные головки со скошенными торцами (остальные обозначения см. рис. 5)

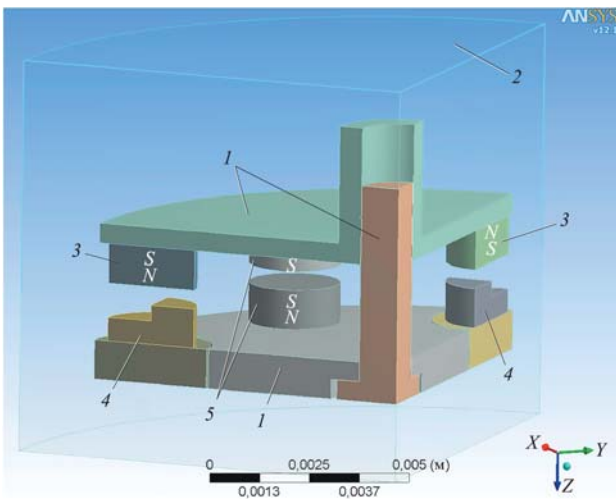


Рис. 9. Расчетная схема регулировочной головки с профилированными ступеньками:
 4 – регулировочные головки со ступеньками (остальные обозначения см. рис. 6)

в зоне размещения обмотки возникает аксиальная магнитоэлектрическая сила F_2 , используемая для коррекции нулевого сигнала гироскопа.

На рис. 9 показана расчетная схема для случая магнитопровода со ступенькой высотой 0,4 мм в торцевой области. Аксиальные и радиальные распределения индукции для этого случая соответствуют кривым 3 на рис. 6 и 7. Отметим, что при незначительном падении аксиальной составляющей магнитного поля и, следовательно, силы F_1 асимметрия B_2 (кривая 3, см. рис. 7) существенно увеличивается,

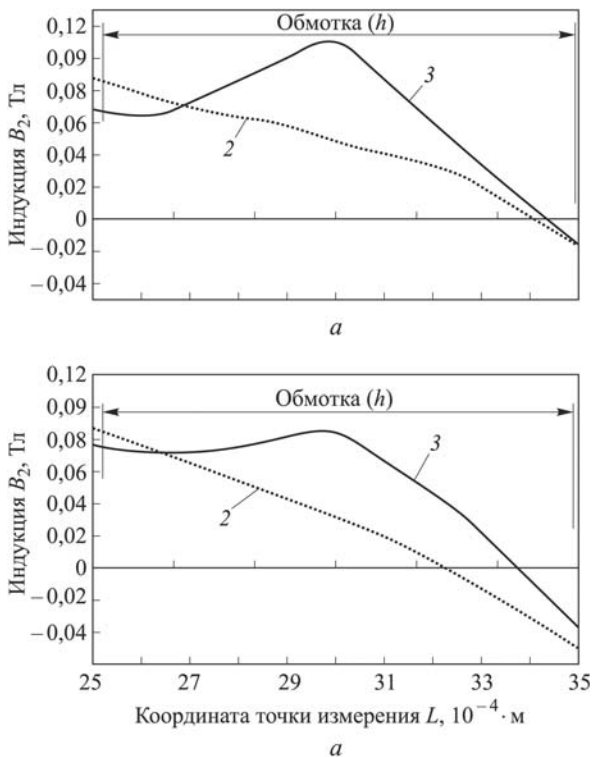


Рис. 10. Увеличенные графики для определения компенсационных сил F_2

по сравнению со случаем скошенных торцов. Для расчетов сил F_2 удобно пользоваться графиками, приведенными на рис. 10. Видно, что уровень разности индукции при использовании ступенчатой головки вдвое больше, чем для случая регулировочной головки со скошенным торцом.

Оценим значение нулевого сигнала гироскопа, которое можно скомпенсировать путем разворота регулировочных головок со ступеньками, при следующих параметрах МЭМС-гироскопа: диаметр маятника 18 мм, толщина маятника 0,38 мм, диаметр магнитов системы возбуждения 2,2 мм, число витков обмотки возбуждения — 20, амплитуда и частота резонансных колебаний маятника вокруг оси Z 1' и 1000 Гц соответственно, амплитуда момента кориолисовых сил при измерении угловой скорости $100^\circ/\text{с}$ составляет $1,8 \cdot 10^{-2}$ сН·см. Газовое демпфирование колебаний маятника вокруг оси Z при зазоре 50 мкм позволяет получить указанную амплитуду колебаний 1° при токе 2 мА в обмотке возбуждения. Для данного тока при распределении индукции, приведенном на рис. 10, амплитуда компенсационного момента будет равна $\sim 70 \cdot 10^{-5}$ сН·см, что соответствует нулевому сигналу гироскопа, равному $\sim 4^\circ/\text{с}$.

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что для гироскопа с рассматриваемыми параметрами искажение формы попереч-

ного сечения упругих балок подвеса на 1 мкм дает уровень нулевого сигнала 400 %с, т.е. превышает на 2 порядка возможности рассматриваемого способа компенсации. Таким образом, в МЭМС-гироскопах рассматриваемый метод компенсации рекомендуется использовать либо в случаях качественного изготовления маятников, либо на конечных этапах настройки гироскопа, сочетая данный метод с другими, основанными на дополнительном профилировании балок упругого подвеса, выполняемом на этапе изготовления маятника методами фотолитографии и травления [1].

Результаты исследований получены в процессе выполнения НИР “Разработка интегрированного микроэлектромеханического датчика угловых скоростей для гироскопа высокоскоростного транспорта” по ГК № 16.513.11.3055 в рамках мероприятия 1.3 федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Двухкоординатный микромеханический ДУС с магнитоэлектрическими датчиками обратной связи по каналам возбуждения и измерения / С.Ф. Коновалов, В.П. Подчерзцев, Д.В. Майоров и др. // Гироскопия и навигация. 2010. № 3 (70). С. 61–71.*
2. *Коновалов С.Ф., Пономарев Ю.А., Майоров Д.В., Подчерзцев В.П., Сидоров А.Г. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры // Наука и образование. 2011. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/219257.html>*
3. *Положительное решение по заявке на изобретение: Микромеханический вибрационный гироскоп: № 2010120200/28(028737) РФ / С.Ф. Коновалов и др., заявл. 21.05.2010.*
4. *Saukoski M., Aaltonen L., Halonen K.A.I. Zero-rate output and quadrature compensation in vibratory MEMS gyroscopes // Sensors Journal, IEEE. 2007. № 12. P. 1639–1651.*
5. *Method of cancelling quadrature error in an angular rate sensor: Pat. 6370937 USA, Int. Cl. G01P 9/04 / Y.W. Hsu; Microsensors, Inc. Appl. No. 09/812147. 2002.*
6. *Bias and quadrature reduction in class II Coriolis vibratory gyros: Pat. 7565839 USA, Int. Cl. G01P 9/04 / R.E. Stewart, S.F. Wyse; Northrop Grumman Guidance and Electronics Company, Inc. Appl. No. 11/499957. 2009.*
7. *Quadrature reduction in MEMS gyro devices using quad steering voltages: Pat. 7213458 USA, Int. Cl. G01P 9/04 / M.W. Weber, R.B. Smith; Honeywell International, Inc. Appl. No. 10/907131. 2007.*
8. *Yeh B.Y., Liang Y.C. Modelling and compensation of quadrature error for silicon MEMS microgyroscope // IEEE Power Electronics and Drive Systems: Proceedings. 2001. Vol. 2. P. 871–876.*
9. *Method and apparatus for electronic cancellation of quadrature error: Pat. 7290435 USA / J. Seeger, A. Astegar, M.T. Tormey. 2007.*

REFERENCES

- [1] *Konovalev S.F., Podchertzsev V.P., Mayorov D.V., Ponomarev Yu.A., Sidorov A.G., Park H.W., Kwon N.Y., Li G.S., Seo J.B. Two-coordinate micromechanical rate sensor with magnetoelectric torques of a feedback on channels of excitation and measurement. *Гироскопия и Navig.* [Gyroscope and Navig.], 2010, no. 3, pp. 61–71 (in Russ).*

- [2] Konovalov S.F., Ponomarev Yu.A., Maiorov D.V., PodchezerceV V.P., Sidorov A.G. Hybrid microelectromechanical gyroscopes and acceleration gages. *Nauka Obraz. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. Zh.* [Sci. Educ. Bauman Moscow State Tech. Univ. Electron. J.], 2011, no. 10 (in Russ.). URL: <http://technomag.edu.ru/doc/219257.html>
- [3] Konovalov S.F., e.a. Mikromekhanicheskiy vibratsionnyy giroskop [A vibrating micromechanical gyroscope]. Patent RF, no. 2010120200/28(028737), 2010.
- [4] Saukoski M., Aaltonen L., Halonen K.A.I. Zero-rate output and quadrature compensation in vibratory MEMS gyroscopes. *IEEE Sens. J.*, 2007, no. 12, pp. 1639–1651.
- [5] Hsu Y.W. Method of cancelling quadrature error in an angular rate sensor: Patent US, no. 6370937, 2002.
- [6] Stewart R.E., Wyse S.F. Bias and quadrature reduction in class II coriolis vibratory gyros. Patent US, no. 7565839, 2009.
- [7] Weber M.W., Smith R.B. Quadrature reduction in MEMS gyro devices using quad steering voltages: Patent US, no. 7213458, 2007.
- [8] Yeh B.Y., Liang Y.C. Modelling and compensation of quadrature error for silicon MEMS microgyroscope. *IEEE Trans. Power Electr. Drive Syst.*, 2001, vol. 2, pp. 871–876.
- [9] Seeger J., Astegar A., Tormey M.T. Method and apparatus for electronic cancellation of quadrature error. Patent US, no. 7290435, 2007.

Статья поступила в редакцию 20.02.2013

Сергей Феодосьевич Коновалов — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 110 научных работ, 80 патентов и четырех книг по вопросам гироскопов, акселерометров, МЭМС-технологии.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.F. Konovalov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 110 publications, 80 patents and four books in the field of gyro-instruments, accelerometers, MEMS technology.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Денис Владимирович Майоров — канд. техн. наук. Автор ряда научных работ в области микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

D.V. Maiorov — Cand. Sci. (Eng.). Author of a number of publications in the field of microelectromechanical gyros and accelerometers.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Юрий Анатольевич Пономарев — ассистент кафедры “Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yu.A. Ponomarev — assistant lecturer of “Instruments and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a number of publications in the field of microelectromechanical gyros and accelerometers.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.