

**Рындин Евгений Адальбертович** – Южный федеральный университет; email: earyndin@sfnedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634311584; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

**Ryndin Evgeniy Adalbertovich** – Southern Federal University; email: earyndin@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311584; the department of electronic apparatuses design; professor.

УДК 621.3.049.77

**И.Е. Лысенко, Ф.М. Бондарев, О.А. Ежова, Р.И. Тарасов**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ДВУМЯ ОСЯМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ\***

*Компоненты микросистемной техники, такие как сенсоры угловых скоростей, находят широкое применение в различных областях: космическое приборостроение, медицинская техника, бытовые приборы, игры нового поколения, автомобилестроение и т.д. Для измерения необходимых параметров движения объекта в пространстве данные сенсорные элементы располагают по взаимно ортогональным осям, что, в свою очередь, приводит к увеличению габаритных размеров и массы микросистем, снижению надежности измерительного блока, увеличению уровня внутренних шумов. Решить данную проблему (улучшить массогабаритные характеристики данных микросистем и обеспечить возможность регистрации параметров по нескольким осям) можно применением интегральных гироскопов с двумя осями чувствительности. Таким образом, актуальной задачей является разработка конструкции микромеханических сенсоров угловых скоростей – микромеханических гироскопов с двумя осями чувствительности. Основными целями при разработке данных микромеханических сенсоров является улучшение основных рабочих характеристик (диапазона угловых скоростей, точности, погрешности, уход нуля и т.п.), уменьшение массогабаритных параметров (массы и объема), площади, занимаемой устройством на подложке, а также снижение стоимости проектируемого изделия. В данной работе освещены основные этапы разработки конструкции и создания математической модели микромеханического гироскопа (ММГ) с двумя осями чувствительности. В соответствии с предложенной методикой моделирования были выполнены расчеты собственных форм и собственных частот колебаний чувствительного элемента интегрального микромеханического гироскопа. Разработано параметризуемое описание конструкции на высокоуровневом языке проектирования аналого-цифровых устройств VHDL-AMS. Проведен анализ конструкции в САЕ-системе ANSYS. Результаты, полученные в ходе математического моделирования, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современным микромеханическим гироскопам, что очень важно, учитывая постоянный рост качества характеристик и снижение цен на иностранную продукцию в сегменте рынка. Полученные данные могут быть использованы в дальнейших разработках конструкций интегральных микромеханических гироскопов с учетом возможностей перебора параметров моделей.*

*Микросистемная техника; микроэлектромеханическая система; элементная база; микромеханический компонент; сенсор угловых скоростей; гироскоп; конструкция; модель; моделирование.*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (проект №213.01–11/2014–12 в рамках базовой части государственного задания).

I.E. Lysenko, F.M. Bondarev, O.A. Ezhova, R.I. Tarasov

## SIMULATION OF A MICROMECHANICAL GYROSCOPE WITH TWO SENSITIVE AXES

*Microsystem technology components, such as the angular velocity sensors, are widely used in various fields: space industry, medical equipment, home appliances, games of a new generation, automotive, etc. To measure necessary parameters of an object in space, information on the sensor elements have mutually orthogonal axes, which in turn leads to an increase in overall size and weight of microsystems, decrease in reliability of the measuring unit, increasing the level of internal noise. To solve this problem - to improve the weight and size characteristics of these microsystems and to allow registration of parameters for multiple axes can be integrated using the gyroscope with two axes of sensitivity. Thus, an urgent task is to develop a design angular velocity sensors – two-axis gyroscopes. The main objectives of the development of these sensors is to improve the basic performance characteristics, reducing the weight and size parameters and the area occupied on the substrate, as well as reducing the cost of the designed product. Covered the main stages of design and creating a mathematical model of a micromechanical gyroscope with two axes of sensitivity. According with the proposed method of simulation calculations were performed their own shapes and frequencies of oscillation gyro sensor. Developed description of the construction on the high-level parameterized language VHDL-AMS. We have been analysing of the structure in the CAE system ANSYS. The technique works with arrays of data in accounting in the design of the sensor technological errors. The results obtained in the course of mathematical modeling, satisfy the requirements of the modern micromechanical gyroscope, which is important, given the steady increase in the quality of performance and lower prices for foreign products in the segment. Obtained data can be used in further development of structures taking into account possibilities busting model parameters.*

*Microsystems technologies; microelectromechanical systems; elements base; micromachined component; rate sensor; gyroscope; design; model; modeling.*

**Введение.** Во многих сегментах рынков сбыта коммерческих технологий МЭМС доминируют датчики инерции и давления. Отчасти это объясняется существующей областью задач. Датчики инерции – акселерометры, гироскопы, мульти-сенсорные модули и системы на их основе широко применяются в навигации, для компенсации работы других приборов (акселерометры, инклинометры) или стабилизации (гироскопы). Блоки инерциальных измерений (БИИ, Inertial Measurement Units, IMU) – одно из ключевых применений датчиков инерции, сегодня в МЭМС-исполнении [1–10].

Хотя к навигационным и многим измерительным приборам, использующим гироскопы, предъявляются высокие требования в отношении точности и надежности, зачастую эти устройства эксплуатируются в сравнительно мягких (например, внутрикабинных) условиях. В этом случае отличие High-End-исполнения от коммерческого будет состоять в применении более сложных компенсационных, калибровочных и избыточных схем с алгоритмами слияния данных от различных типов датчиков, но МЭМС-часть и вся система не потребуют особого, отличного от стандартного, корпусирования [1–10].

В данной работе описывается микромеханический гироскоп LL-типа [11–20].

**Принцип работы.** Для расчета амплитуд и частот колебаний чувствительных элементов под действием электростатических сил и сил инерции Кориолиса, была разработана математическая модель, состоящая из расчетов собственных форм и собственных частот колебаний чувствительных элементов, расчетов амплитуд колебаний чувствительных элементов под действием электростатических сил и сил инерции Кориолиса.

Особенностью разработанного сенсора угловых скоростей и линейных ускорений является тот факт, что упругий подвес, инерционные массы, подвижные и неподвижные гребенчатые электроды электростатических приводов, неподвижные электроды емкостных преобразователей перемещений изготавливаются в одном структурном слое. Использование двух опор позволяет исключить взаимное влияние первичных и вторичных колебаний чувствительных элементов ММГ друг на друга.

**Выполнение анализа конструкции программными методами.** Получение выборок небольших размеров упрощается благодаря возможности создания параметризуемых объемных моделей устройства с возможностью вариации определенных параметров. Обработывая результаты расчетов, можно наблюдать и делать выводы о наличии некоторых зависимостей между задаваемыми параметрами устройства и выходными данными. Так, на рис. 1 показан упругий подвес ротора по оси движения, в котором значение параметров длины  $L$ ,  $l_1$  и  $l_2$  при желании можно изменить, тем самым изменяя жесткость подвеса, что, безусловно, влияет на поведение чувствительного элемента в целом [16, 17].

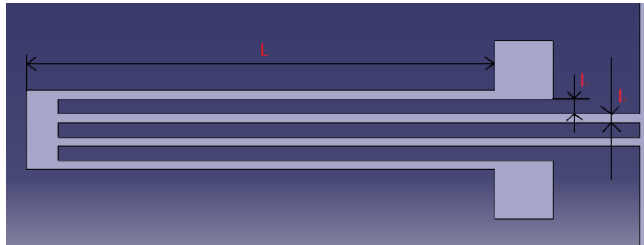


Рис. 1. Упругий подвес ротора

На рис. 2 изображена часть встречно-штыревого преобразователя (ВШП) конденсатора, изменение емкости которого пропорционально угловым скоростям.

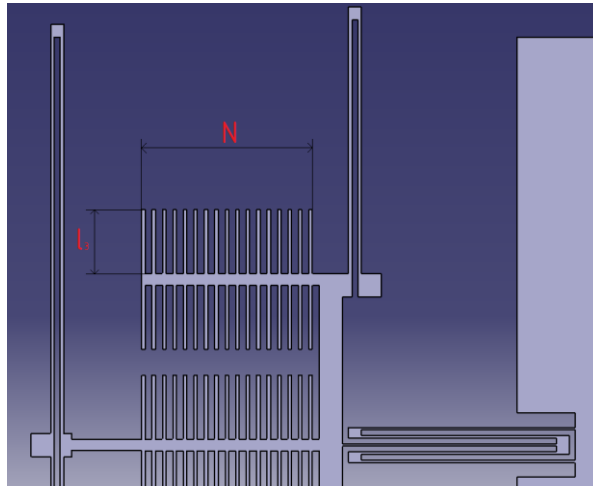


Рис. 2. Ротор ВШП конденсатора на оси чувствительности

Изменяя количество пальцев  $N$  или длину пальцев  $l_3$ , можно варьировать емкость конденсатора, расположенного на оси чувствительности ММГ.

Как выше уже было сказано, разработано VHDL-AMS-описание конструкции с моделированием работы ММГ под действием угловых скоростей в программе hAMSter. При возникновении угловых скоростей  $\Omega_x$ ,  $\Omega_z$  чувствительный элемент совершает колебания вдоль осей чувствительности. Амплитуда перемещений пропорциональна величине действующего воздействия. Направление действия угловых скоростей будет определять фазу перемещений инерционных масс.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования работы микромеханического гироскопа под действием угловых скоростей.

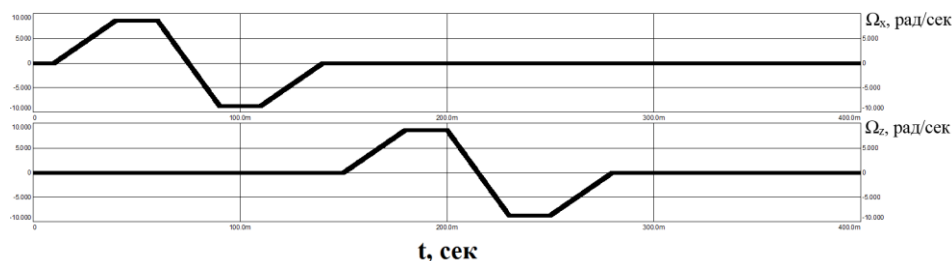


Рис. 3. Изменения угловых скоростей в полном динамическом диапазоне

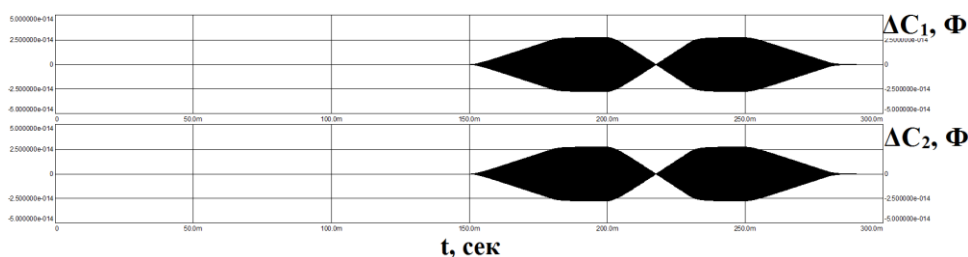


Рис. 4. Изменения емкостей преобразователей перемещений гироскопа

Как показали результаты моделирования, начальная емкость преобразователей перемещений по осям X составляет десятки фФ и по оси Z – единицы пФ. При действии угловой скорости изменение дифференциальной емкости по оси чувствительности X составляет 25 фФ, по оси чувствительности Z – 0,6 пФ.

Основой для проведения вероятностного анализа влияния технологических погрешностей на выходные параметры устройства в соответствии с методикой является параметрическая модель микромеханического гироскопа. Основные элементы, определяющие статические и динамические характеристики микромеханического гироскопа, это – инерционная масса и упругие подвесы.

Технологические погрешности основной вклад будут вносить в элементы, имеющие минимальные размеры, а именно в ширину упругих подвесов. Поэтому анализ был проведен для ширины балок четырех упругих подвесов. Выходными параметрами являются максимальные перемещения инерционной массы при внешнем воздействии для направлений Y и Z.

Численный эксперимент был проведен по составленной матрице планирования эксперимента. По результатам проведенного эксперимента получены средние значения выходных параметров и рассчитаны стандартные отклонения. Построены гистограммы распределения выходных параметров и функции распределения.

**Выводы.** Разработанная математическая модель микромеханического гироскопа получена на основе уравнения Лагранжа второго рода и позволяет учитывать перекрестную чувствительность. Также в математической модели присутствует расчет собственных форм и частот колебаний чувствительных элементов, расчет амплитуд их колебаний под действием внешних сил.

Разработаны параметризуемый макрос построения геометрических и конечно-элементных моделей для моделирования в пакете программ ANSYS и параметризуемое VHDL-AMS описание.

В результате можно констатировать, что начальная емкость преобразователей перемещений по осям  $X$  составляет десятки фФ, и по оси  $Z$  – единицы пФ. При действии угловой скорости изменение дифференциальной емкости по оси чувствительности  $X$  составляет 25 фФ, по оси чувствительности  $Z$  – 0,6 пФ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы: учебное пособие. – Тула: Тульский государственный университет, 2007. – 400 с.
2. *Тимошенко С.П., Кульчицкий А.П.* Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 6. – С. 51-56.
3. *Аравин В.В., Вернер В.Д., Сауров А.Н., Мальцев П.П.* МЭМС высокого уровня – возможный путь развития МЭМС в России // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 6. – С. 28-31.
4. *Прокофьев И.В., Тихонов Р.Д.* Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств // Нано- и микросистемная техника. 2011. – № 12. – С. 48-50.
5. *Сысоева С.* Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы – от Low-End до High-End // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5.
6. *Анчурин С.А., Максимов В.Н., Морозов Е.С., Головань А.С., Шилов В.Ф.* Блок инерциальных датчиков // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 1. – С. 50-53.
7. *Elwenspoek M., Wiegerink R.* Silicon micro accelerometers // Mechanical microsensors. – 2005. – P. 230-236.
8. *Лысенко И.Е.* Интегральные микромеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 180 с.
9. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Лысенко И.Е.* Элементная база наноэлектроники, микро- и наносистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 91 с.
10. *Механцев Е.Б., Лысенко И.Е.* Физические основы микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 54 с.
11. *Лысенко И.Е.* Метод проектирования микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений LL-типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 117-123.
12. *Lysenko I.E.* Modeling of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer // Proceeding of the International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2012” (ICMNE-2012). – Moscow-Zvenigorod, Russia, 2012. – P. 03-31.
13. *Лысенко И.Е.* Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный).
14. *Лысенко И.Е., Лысенко А.В.* Интегральные сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа на основе углеродных нанотрубок // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный).
15. *Лысенко И.Е., Ежова О.А.* Критерии равенства собственных частот колебаний чувствительных элементов микромеханических гироскопов-акселерометров // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (доступ свободный).

16. Лысенко И.Е., Синютин С.А., Воронков О.Ю. Поведенческая модель микромеханического сенсора угловых скоростей для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. <http://ivdon.ru/magazine/archive/N4y2014/2674/> (доступ свободный).
17. Лысенко И.Е., Синютин С.А., Воронков О.Ю. Разработка поведенческой модели сенсора линейного ускорения с двумя осями чувствительности для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2672/> (доступ свободный).
18. Лысенко И.Е., Ежова О.А., Куликова И.В., Приступчик Н.К. Методика проектирования микромеханических компонентов на основе библиотеки микрофрагментов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 201-205.
19. Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Лысенко И.Е., Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю., Быков, А.В., Бондарев Ф.М., Бесполудин В.В. Конструкция и технологический маршрут изготовления микромеханического гироскопа с двумя осями чувствительности // Материалы Международной научно-технической конференции «Электроника-2015». – М.: МИЭТ, 2015. – С. 63-64.
20. Лысенко И.Е., Ткаченко А.В. Модель микромеханического акселерометра с тремя осями чувствительности // Материалы Международной научно-технической конференции «Электроника-2015». – М.: МИЭТ, 2015. – С. 65-66.

## REFERENCES

1. Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory: uchebnoe posobie [Micromechanical devices: a training manual]. Tula: Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2007, 400 p.
2. Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P. Primenenie MEMS-senzorov v sistemakh navigatsii i orientatsii podvizhnykh ob"ektov [The use of MEMS sensors in navigation systems and orientation of moving objects], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2012, No. 6, pp. 51-56.
3. MEMS vysokogo urovnya – vozmozhnyy put' razvitiya MEMS v Rossii [MEMS high-level – possible way of development of MEMS in Russia], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 6, pp. 28-31.
4. Prokofev I.V., Tikhonov R.D. Nano- i mikrosistemy dlya monitoringa parametrov dvizheniya transportnykh sredstv [Nano- and Microsystems for monitoring of parameters of movement of vehicles], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 12, pp. 48-50.
5. Sysoeva S. Klyuchevye segmenty rynka MEMS-komponentov. Inertsial'nye sistemy – ot Low-End do High-End [Key market segments for the MEMS components. Inertial system – from Low-End to High-End], *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2010, No. 5.
6. Anchurin S.A., Maksimov V.N., Morozov E.S., Golovan' A.S., Shilov V.F. Blok inertsial'nykh datchikov [Unit inertial sensors], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 1, pp. 50-53.
7. Elwenspoek M., Wiegerink R. Silicon micro accelerometers, *Mechanical microsensors*, 2005, pp. 230-236.
8. Lysenko I.E. Integral'nye mikromekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Integrated micromechanical sensors of angular velocities and linear accelerations]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 180 p.
9. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Lysenko I.E. Elementnaya baza nanoelektroniki, mikro- i nanosistemnoy tekhniki [Element base of nanoelectronics, micro - and nanosystem technology]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 91 p.
10. Mekhantsev E.B., Lysenko I.E. Fizicheskie osnovy mikrosistemnoy tekhniki [The physical basis of Microsystems technology]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, 54 p.
11. Lysenko I.E. Metod proektirovaniya mikromekhanicheskikh sensorov uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy LL-tipa [Izvestiya YuFU. *Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 117-123.
12. Lysenko I.E. Modeling of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer, *Proceeding of the International Conference "Micro- and nanoelectronics – 2012" (ICMNE-2012)*. Moscow-Zvenigorod, Russia, 2012, pp. 03-31.

13. *Lysenko I.E.* Integral'nyy sensor uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Integrated sensor of angular velocities and linear accelerations], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2010, No. 3. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/> (the access is free).
14. *Lysenko I.E., Lysenko A.V.* Integral'nye sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy LR-tipa na osnove uglerodnykh nanotrubok [Integrated sensors of angular velocities and linear unit roots LR-type based on carbon nanotubes], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, No. 4. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/> (the access is free).
15. *Lysenko I.E., Ezhova O.A.* Kriterii ravenstva sobstvennykh chastot kolebaniy chuvstvitel'nykh elementov mikromekhanicheskikh giroskopov-akselerometrov [The criteria of equality of the natural frequencies of oscillations of a sensitive element of micromechanical gyroscopes-accelerometers], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (the access is free).
16. *Lysenko I.E., Sinyutin S.A., Voronkov O.Yu.* Povedencheskaya model' mikromekhanicheskogo sensora uglovykh skorostey dlya modelirovaniya v srede Simulink programmnoy paketa MatLab [Behavioral model of a micromechanical sensor of angular velocity for the simulation in Simulink software PA-chum MatLab], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 4. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/N4y2014/2674/> (the access is free).
17. *Lysenko I.E., Sinyutin S.A., Voronkov O.Yu.* Razrabotka povedencheskoy modeli sensora lineynogo uskoreniya s dvumya osyami chuvstvitel'nosti dlya modelirovaniya v srede Simulink programmnoy paketa MatLab [Development of behavioral models of linear acceleration sensor with two axes of sensitivity for the simulation in Simulink software package of MatLab], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 4. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2672/> (the access is free).
18. *Lysenko I.E., Ezhova O.A., Kulikova I.V., Pristupchik N.K.* Metodika proektirovaniya mikromekhanicheskikh komponentov na osnove biblioteki mikrofragmentov [Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 201-205.
19. *Konoplev B.G., Ageev O.A., Lysenko I.E., Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Bykov, A.V., Bondarev F.M., Bespoludin V.V.* Konstruktsiya i tekhnologicheskoy marshrut izgotovleniya mikromekhanicheskogo giroskopa s dvumya osyami chuvstvitel'nosti [The design and the manufacturing of the micromechanical gyroscope with two axes of sensitivity], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektronika-2015»* [Materials of International scientific-technical conference "Electronics-2015"]. Moscow: MIET, 2015, pp. 63-64.
20. *Lysenko I.E., Tkachenko A.V.* Model' mikromekhanicheskogo akselerometra s tremya osyami chuvstvitel'nosti [Model of a micromechanical accelerometer with three axes of sensitivity], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektronika-2015»* [Materials of International scientific-technical conference "Electronics-2015"]. Moscow: MIET, 2015, pp. 65-66.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Лысенко Игорь Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [ielysenko@sfedu.ru](mailto:ielysenko@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; зав. кафедрой.

**Бондарев Филипп Михайлович** – e-mail: [dogrtr@mail.ru](mailto:dogrtr@mail.ru); кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

**Ежова Ольга Александровна** – e-mail: [ezhova.08.05@gmail.com](mailto:ezhova.08.05@gmail.com); кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

**Тарасов Роман Игоревич** – e-mail: [tarasov1056@mail.ru](mailto:tarasov1056@mail.ru); кафедра конструирования электронных средств; студент.

**Lysenko Igor Eugenjevich** – Southern Federal University; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; head of the department.

**Bondarev Philipp Mikhaylovich** – e-mail: dogrtt@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; postgraduate student.

**Ezhova Olga Alexandrovna** – e-mail: ezhova.08.05@gmail.com; the department of electronic apparatuses design; postgraduate student.

**Tarasov Roman Igorevich** – e-mail: msqk@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; student.