

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634271636; кафедра высшей математики; зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Кудринская Татьяна Владимировна – e-mail: tvkudrinskaya@sfedu.ru; тел.: 88634371663; кафедра физики; ассистент; к.ф.-м.н.

Редин Александр Александрович – e-mail: redinaa@sfedu.ru; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.ф.-м.н.; доцент.

Андриевская Виктория Юрьевна – Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского; e-mail: vika75_07@mail.ru; 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13; тел.: 88122371021, к.ф.-м.н.; старший научный сотрудник 162 лаборатории.

Adzhiev Anatoli Khabasovich – High-mountain Geophysical Institute; e-mail: adessa1@yandex.ru; 2, Lenin's avenue, Nalchik, 360030, KBR; phone: +78662401916; dr. of phys.-math. sc.; professor; the head of natural phenomena department.

Yurchenko Natalia Vladimirovna – junior researcher at the department of natural phenomena.

Куповых Геннадий Владимирович – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634271636; the department of higher mathematics; head of department; dr. of phys.-math. sc.; professor.

Kudrinskaya Tatiana Vladimirovna – e-mail: tvkudrinskaya@sfedu.ru; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of phys.-math. sc.

Redin Alexander Alexandrovich – e-mail: redinaa@sfedu.ru; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of phys.-math. sc.; associate professor.

Andrievska Victoria Yur'evna – Military Space Academy named after AF Mozhaikogo; e-mail: vika75_07@mail.ru; 13, Zhdanov street, St. Petersburg, 197198, Russia; phone: +78122371021; cand. of phys.-math. sc.; senior researcher 162 laboratory.

УДК 621.3.049.77

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-223-232

И.Е. Лысенко, О.А. Ежова

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО СЕНСОРА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ*

Микросистемная техника – быстро развивающееся научно-техническое направление, целью которого является создание систем на основе микрооптикоэлектромеханических устройств с уникальным набором свойств, недоступных при их реализации в виде обычных макросистем. Устройства микросистемной техники (сенсоры линейных ускорений, сенсоры угловых скоростей, актюаторы и т.д.) широко применяются в космической промышленности, медицинской технике, играх нового поколения, автомобилестроении и во многих других областях. Известные на сегодняшний день микромеханические сенсоры позволяют измерять линейные ускорения и угловые скорости по одной или двум осям. Производятся данные устройства в виде гибридных или интегральных микросистем. Изготовление двухосных и одноосных сенсоров на одной подложке, расположенных по трем взаимно ортогональным осям чувствительности, приводит к увеличению занимаемой ими площади подложки. Решить данную проблему – улучшить массогабаритные и энергетические характеристики микросистем, обеспечить возможность регистрации параметров движения подвижного объекта по трем осям чувствительности одним сенсорным элементом можно применением интегральных многоосевых сенсоров. Таким образом разработка конст-

* Работа выполнена при поддержке “Программы развития Южного федерального университета до 2021 года” проект ВнГр -07/2017-10.

рукции сенсоров линейных ускорений актуальна на сегодняшний день. Основными целями при разработке микромеханических сенсоров является улучшение основных рабочих характеристик, уменьшение массогабаритных параметров сенсора и площади, занимаемой на подложке, и в результате чего происходит снижение стоимости проектируемого изделия. В данной работе разработана и исследована конструкция сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности, модальный анализ разработанной конструкции по трем осям чувствительности был проведен, рассчитаны частоты колебаний разработанной конструкции, проведено моделирование работы разработанного микромеханического многоосевого сенсора под действием линейных ускорений, разработано описание исследуемой конструкции на языке высокого уровня VHDL-AMS. Из результатов проведенных исследований видно, что конструкция упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического акселерометра обеспечивает равенство частот по двум осям чувствительности. С целью получения равенства собственных частот по трем осям чувствительности необходимо увеличить или уменьшить длину балок в подвесах соответствующего типа.

Микромеханическая система; сенсор линейных ускорений; акселерометр; конструкция; модель; модальный анализ.

I.E. Lysenko, O.A. Ezhova

DESIGN AND ANALYSIS OF A LINEAR ACCELERATION SENSOR

Microsystem technology is a fast growing research and development field, the purpose of which is the creation of systems based on microoptoelectromechanical devices with a unique set of properties not available for their implementation in the form of conventional macro-systems. Microsystems devices (sensors of linear acceleration, angular velocity sensors, actuators, etc.) are widely used in the aerospace industry, medical technology, next-generation games, automotive and many other areas. Today microsystems develop extensively. Microsystem devices such as sensors of linear acceleration and angle velocity, actuators and other devices are widely used in various areas: space industry, medical technology, consumer devices, game consoles of new generation, automotive industry and etc. So there is a relevant objective to develop design of linear acceleration sensor. Main aims of micromechanical sensors developing are improvement basic performance characteristic, reducing weight and dimensional characteristics and space occupied by designed sensor on a wafer, as result reduction of value of the sensor. In this work design of linear acceleration sensor with three sensitive axes is created and analysed, modal analyses of the created sensor along three sensitive axes, natural mode and vibration frequency of the sensor design are calculated, simulation of performance of the created design under the influence of linear accelerations is realized, description of the sensor design is developed on high-level language VHDL-AMS. From the results of the conducted research it is evident that the design of the elastic suspension of sensitive element of micromechanical accelerometer ensures the equality of frequencies along two axes of sensitivity. With the aim of obtaining equality of the natural frequencies along the three axes of sensitivity it is necessary to increase or decrease the length of the beams in the suspensions of the appropriate type.

Micromechanical system; linear acceleration sensor; accelerometer; design; model; modal analyses.

Введение. Микросистемная техника – быстро развивающееся научно-техническое направление, целью которого является создание систем на основе микрооптоэлектромеханических устройств с уникальным набором свойств, недоступных при их реализации в виде обычных макросистем [1–7]. Микросистемная техника и микросенсоры основаны на применении материалов и технологий, совмещающих в себе информационные и энергопреобразующие компоненты, в том числе созданные на базе использования технологии микроэлектроники, оптоэлектроники, волоконно-оптической техники и микромеханики, а также современных методов и технических средств автоматизированного проектирования [5–10].

Технологии микросистемной техники применяются для создания измерительных и контрольных средств в космической технике, автомобильной промышленности, машиностроении, пищевой промышленности, медицине, генной инженерии, городском хозяйстве, астрономии, охране окружающей среды, в целях информатизации экономики и совершенствования практики управления [9–15].

Мировой рынок микроэлектромеханических систем (МЭМС) непрерывно растет. Одним из основных направлений развития микросистемной техники является разработка и исследование микромеханических сенсоров угловых скоростей (ММГ) и микромеханических сенсоров линейных ускорений (ММА) [14–17].

Известные на сегодняшний день микромеханические сенсоры позволяют измерять линейные ускорения и угловые скорости по одной или двум осям. Производятся данные устройства в виде гибридных или интегральных микросистем. Изготовление двухосных и одноосных сенсоров на одной подложке, расположенных по трем взаимно ортогональным осям чувствительности, приводит к увеличению занимаемой ими площади подложки. Решить данную проблему – улучшить массогабаритные и энергетические характеристики микросистем, обеспечить возможность регистрации параметров движения подвижного объекта по трем осям чувствительности одним сенсорным элементом можно применением интегральных многоосевых сенсоров [12–21].

В данной работе исследуется конструкция сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности, представленная на рис. 2.

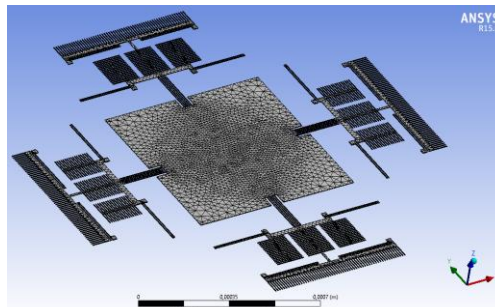


Рис. 1. Параметризуемая конечно-элементная модель интегрального микромеханического сенсора линейных ускорений

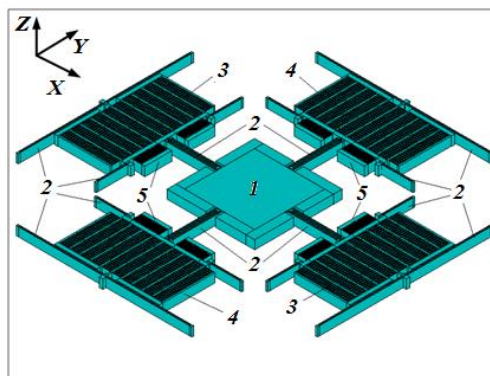


Рис. 2. Микромеханический сенсор линейных ускорений с тремя осями чувствительности

Разработанный микромеханический сенсор содержит инерционную массу (1), подвес чувствительного элемента (2), емкостные преобразователи перемещений (3, 4), электростатические приводы (5).

Достоинство рассматриваемой конструкции микромеханического сенсора заключается в возможности его работы как акселерометра прямого преобразования, так и компенсационного.

Для проведения исследований была изготовлена серия экспериментальных образцов. В качестве подложки использовали пластины кремния КЭФ (100) n-типа диаметром 100 мм. На рис. 3 представлена топология и фрагмент экспериментального образца микромеханического акселерометра.

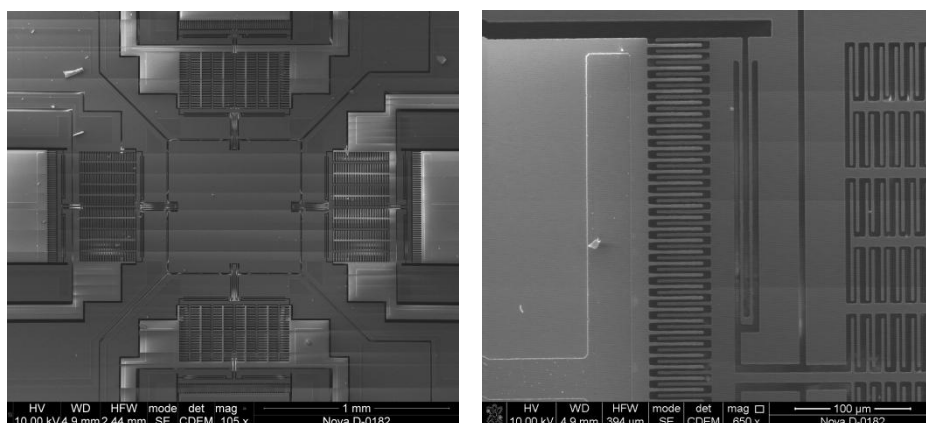


Рис. 3. Топология и фрагмент экспериментального образца

Целью исследований является провести статический анализ разработанной конструкции, степень влияния каждого элемента подвеса предлагаемой конструкции на изменение собственной частоты, амплитуду перемещений инерционной массы, время переходных процессов.

Результаты исследования разработанной конструкции. В предложенной конструкции сенсора линейных ускорений имеется шестнадцать последовательно-параллельных соединений упругих балок, т.е. подвесов. Данные подвесы можно условно разделить на три типа, в зависимости от конфигурации балок. На рис. 4 представлены два условных типа подвесов.

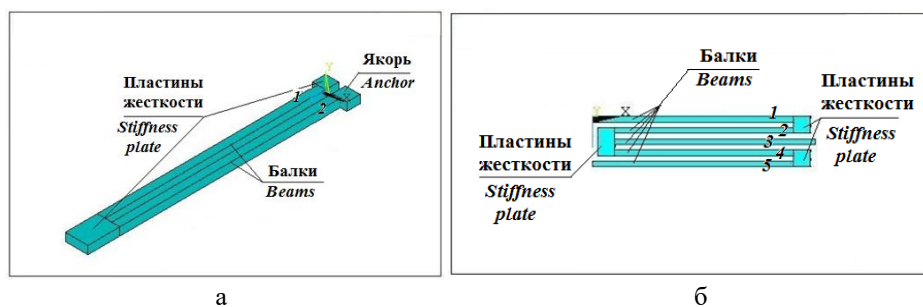


Рис. 4. Типы подвесов: а – подвес II-го типа; б – подвес III-го типа

Собственная частота зависит от массы и коэффициента жесткости конструкции, зависящего от многих параметров, в том числе и от длины, ширины, толщины упругих балок в подвесах. При исследовании рассматривается изменение коэффициента жесткости конструкции при изменении длины упругих балок в подвесах.

Уравнение для нахождения коэффициента жесткости общего упругого подвеса сенсора по осям X и Y, при условии, что длины следующих балок равны в подвесе I-го типа: $l_I = l_1 = l_2 = l_3 = l_4$, в подвесе II-го типа: $l_{II} = l_1 = l_2$, в подвесе III-го типа: $l_{III} = l_1 = l_5$, $l_{2III} = l_2 = l_4$, $l_{3III} = l_3$:

$$k_{\text{общ}} = \frac{Ehw}{3} * \left(\frac{2}{l_I^3} + \frac{4}{l_{II}^3} + \frac{2}{(l_{III}^3 + l_{2III}^3)} + \frac{1}{l_{3III}^3} \right), \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; h – толщина балки, w – ширина балки, l_I – длина балки подвеса I-го типа; l_{II} – длина балки в подвесе II-го типа; l_{III} , l_{2III} , l_{3III} – длины балок 1,2,3 в подвесе III-го типа.

Уравнение для нахождения коэффициента жесткости общего упругого подвеса сенсора по осям X и Y, при условии, что длина всех балок в подвесах различна:

$$K_{\text{общ}} = \frac{4Ehw}{9} \left(\frac{1}{l_{1I}^3} + \frac{1}{l_{2I}^3} + \frac{1}{l_{1II}^3} + \frac{1}{l_{2II}^3} + \frac{2}{(l_{1III}^3 + l_{2III}^3)} + \frac{1}{l_{3III}^3} \right). \quad (2)$$

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента жесткости всей конструкции $K_{\text{общ}}$ от длины балок в подвесах каждого типа. График, изображенный пуктиром, показывает зависимость $K_{\text{общ}}$ от длины балок при изменении длины балок в диапазоне 20–300 мкм одновременно для каждого подвеса. График подвеса I-го типа демонстрирует изменение $K_{\text{общ}}$ при изменении длины балок отдельно в данном подвесе, при этом длина балок в остальных подвесах остается неизменной ($l = 100$ мкм), графики подвесов II-го и III-го типа также показывают зависимость $K_{\text{общ}}$ от длины балок в каждом типе подвесов соответственно. При расчетах остальные параметры имели следующие значения: модуль Юнга $E=169$ ГПа и одинаковые для всех балок толщина $h=1.5$ мкм и ширина $w=4$ мкм.

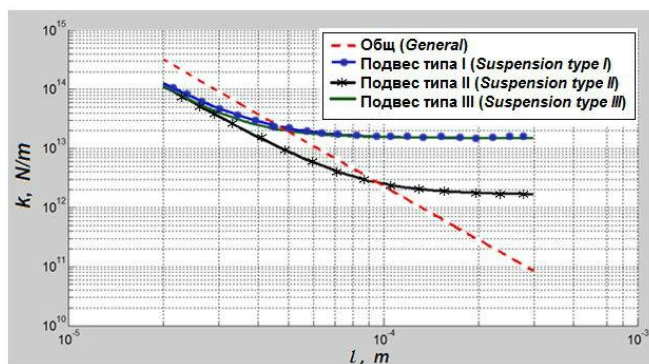


Рис. 5. Зависимость коэффициента жесткости конструкции от изменения длины балок в подвесах каждого типа

При исследовании конструкции было разработано параметризуемое описание для анализа статического поведения конструкции в программной системе ANSYS (<http://www.ansys.com/>). На рис. 6–10 представлены результаты статического анализа микромеханического устройства под действием линейных ускорений по осям чувствительности в программе ANSYS.

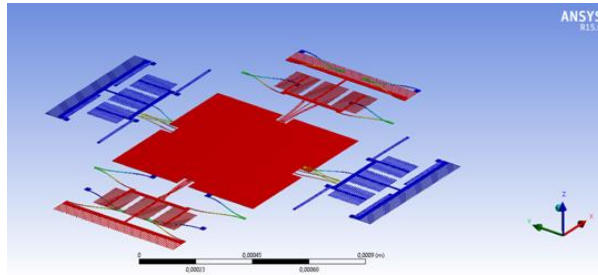


Рис. 6. Перемещение чувствительного элемента акселерометра под действием линейного ускорения 1 g вдоль оси X

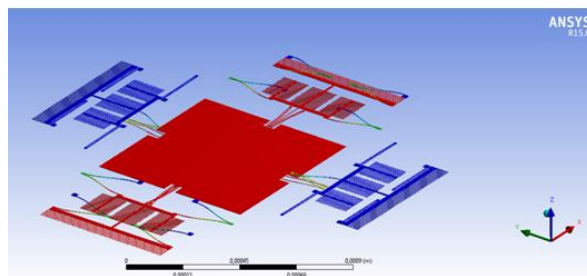


Рис. 7. Перемещение чувствительного элемента акселерометра под действием линейного ускорения 10 g вдоль оси X

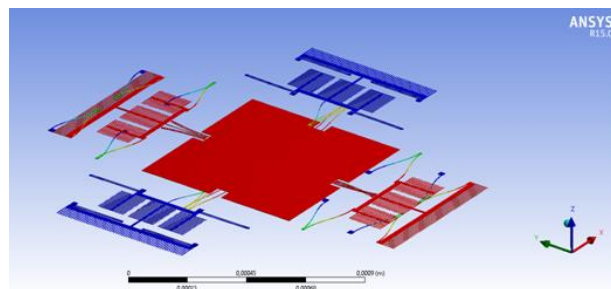


Рис. 8. Перемещение чувствительного элемента акселерометра под действием линейного ускорения 1 g вдоль оси Y

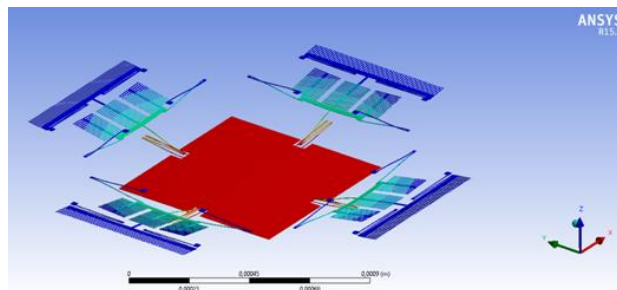


Рис. 9. Перемещение чувствительного элемента акселерометра под действием линейного ускорения 1 g вдоль оси Z

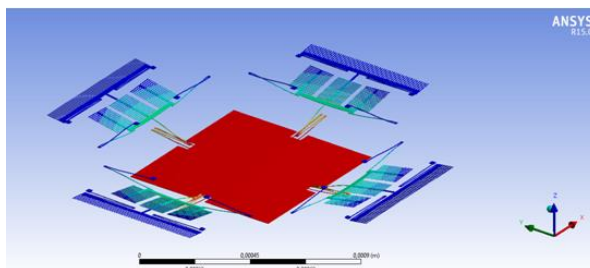


Рис. 10. Перемещение чувствительного элемента акселерометра под действием линейного ускорения 10 g вдоль оси Z

На рис. 11, 12 представлены результаты моделирования работы микромеханического акселерометра под действием линейных ускорений. Моделирование проведено на основе разработанного параметризуемого описания на языке высокого уровня VHDL-AMS.

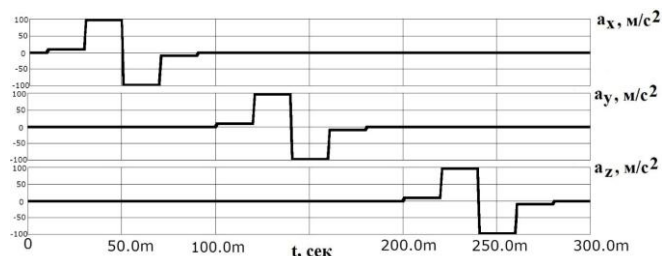


Рис. 11. Изменения линейных ускорений в полном динамическом диапазоне

Как следует из результатов моделирования (рис. 10), для выполнения моделирования были заданы: длительность воздействия линейных ускорений – 40 мс, длительности переднего и заднего фронтов – 1 мс.

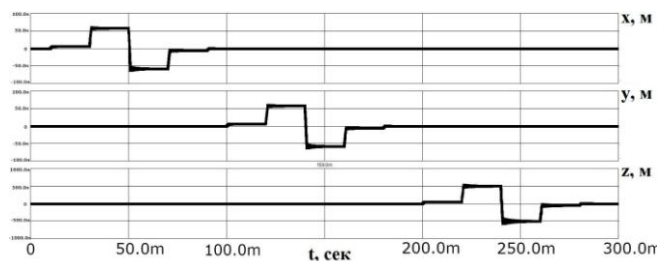


Рис. 12. Перемещения чувствительного элемента акселерометра по осям X, Y, Z под действием линейного ускорения

Как следует из результатов моделирования на рис. 12, при действии линейных ускорений a_x , a_y , a_z чувствительный элемент совершает синхронные перемещения вдоль осей действия внешнего воздействия. Амплитуда перемещений пропорциональна величине действующего воздействия и составляет при 1 g: 6 нм по осям X, Y и 50 нм по оси Z; и при 10g: 60 нм по осям X, Y и 501 нм по оси Z. Направление действия линейных ускорений будет определять фазу перемещений инерционных масс. Длительность перехода по осям чувствительности X, Y – 9 мс, а оси Z – 11 мс.

Таким образом, при исследовании конструкции было выявлено, что для изменения коэффициента жесткости исследуемой конструкции микромеханического акселерометра на 20 % необходимо изменить длину балок в подвесе II-го типа на 10 %, так как параметры балок в этом подвесе оказывают наибольшее влияние на жесткость конструкции. При изменении длины балок 1 и 5 в подвесе III-го типа на 10 % коэффициент жесткости исследуемой конструкции изменится на 5 %, так как данные балки влияют на жесткость конструкции в наименьшей степени.

Вывод. Из результатов проведенных исследований видно, что конструкция упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического акселерометра обеспечивает равенство частот по двум осям чувствительности. С целью получения равенства собственных частот по трем осям чувствительности необходимо увеличить на 20 % длину балок в подвесе II-го типа, и уменьшить длину балок в подвесе III-го типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Резнев А.А., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Современные тенденции развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 2-6.
2. Лучинин В.В., Мальцев П.П. О термине «Микросистемная техника» в русском и английском языках // Нано- и микросистемная техника. – 2006. – № 2. – С. 39-41.
3. 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.
4. Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В. и др. Изделия микросистемной техники – основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 12. – С. 2-5.
5. Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В. и др. Изделия микросистемной техники – термины и определения, классификация и обозначения типов // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 1. – С. 2-5.
6. Мальцев П.П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – № 1. – С. 9-10.
7. Гольцова М.М., Юдинцев В.А. МЭМС: большие рынки малых устройств // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 4. – С. 9-13.
8. Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: учеб. пособие: В 2 ч. Ч. 1.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 416 с.
9. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
10. Васенко А., Епифанов В., Юдинцев В. Микроэлектромеханические системы. Настало время выходить в свет // Электроника: наука, технология, бизнес. – 1998. – № 5–6. – С. 55-59.
11. 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.
12. Прокофьев И.В., Тихонов Р.Д. Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12. – С. 48-50.
13. 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.
14. Elwenspoek M., Wiegierink R. Silicon micro accelerometers // Mechanical microsensors. – 2005. – P. 230-236.
15. Lysenko I.E. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis // World Applied Sciences Journal. – 2013. – No. 27 (6). – P. 759-762.
16. Лысенко И.Е. Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус.

17. 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). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
18. Лысенко И.Е., Ежова О.А. Критерии равенства собственных частот колебаний чувствительных элементов микромеханических гироскопов-акселерометров // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (доступ свободный). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
19. Лысенко И.Е. Функционально интегрированные микро- и наномеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 167 с.
20. Лысенко И.Е., Куликова И.В., Полищук Е.В., Хайрулина В.А. Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 42 с.
21. Абрамов И.И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. Ч. II. Модели полуклассического подхода // Нано- и микросистемная техника. – 2006. – № 9. – С. 26-36.

REFERENCES

1. Verner V.D., Mal'tsev P.P., Reznev A.A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Sovremennye tendentsii razvitiya mikrosistemnoy tekhniki [Modern trends in the development of microsystem technology], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2008, No. 8, pp. 2-6.
2. Luchinin V.V., Mal'tsev P.P. O termine «Mikrosistemnaya tekhnika» v russkom i angliyskom yazykakh [The term "Microsystem technology" in the Russian and English], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2006, No. 2, pp. 39-41.
3. Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P. Primenenie MEMS-senzorov v sistemakh navigatsii i orientatsii podviznykh ob"ektov [The use of MEMS sensors in navigation and orientation of mobile objects], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2012, No. 6, pp. 51-56.
4. Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V. i dr. Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – osnovnye ponyatiya i terminy [Products of Microsystems engineering – basic concepts and terms], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2007, No. 12, pp. 2-5.
5. Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V. i dr. Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – terminy i opredeleniya, klassifikatsiya i oboznacheniya tipov [Products of Microsystems engineering – terms and definitions, classification and designation of types], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2008, No. 1, pp. 2-5.
6. Mal'tsev P.P. O klassifikatsii v oblasti mikrosistemnoy tekhniki [On the classification in the field of Microsystem technology], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2005, No. 1, pp. 9-10.
7. Gol'tsova M.M., Yudin'tsev V.A. MEMS: bol'shie rynki mal'nykh ustroystv [MEMS: large markets small devices], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2008, No. 4, pp. 9-13.
8. Gridchin V.A., Dragunov V.P. Fizika mikrosistem: ucheb. posobie [Physics of Microsystems: a tutorial]: In 2 part. Part 1. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004, 416 p.
9. Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 400 p.
10. Vasenko A., Epifanov V., Yudin'tsev V. Mikroelektromekhanicheskie sistemy. Nastalo vremya vykhodit' v svet [Microelectromechanical systems. It is time to go out], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 1998, No. 5–6, pp. 55-59.
11. Aravin V.V., Verner V.D., Saurov A.N., Mal'tsev P.P. MEMS vysokogo urovnya – vozmozhnyy put' razvitiya MEMS v Rossii [MEMS high – level way of development of MEMS in Russia], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2011, No. 6, pp. 28-31.
12. Prokofev I.V., Tikhonov R.D. Nano- i mikrosistemy dlya monitoringa parametrov dvizheniya transportnykh sredstv [Nano- and Microsystems for monitoring parameters of vehicle movement], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2011, No. 12, pp. 48-50.

13. Anchurin S.A., Maksimov V.N., Morozov E.S., Golovan' A.S., Shilov V.F. Blok inertsi-al'nykh datchikov [Unit inertial sensors], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2011, No. 1, pp. 50-53.
14. Elwenspoek M., Wiegerink R. Silicon micro accelerometers, *Mechanical microsensors*, 2005, pp. 230-236.
15. Lysenko I.E. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 27 (6), pp. 759-762.
16. 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/> (free access).
17. Lysenko I.E., Lysenko A.V. Integral'nye sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy LR-tipa na osnove uglerodnykh nanotrubok // *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, No. 4. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/> (free access).
18. 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 oscillation of the sensitive elements of micromechanical gyroscopes-accelerometers], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2475> (free access).
19. Lysenko I.E. Funktsional'no integrirovannyye mikro- i nanomekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Functionally integrated micro - and nanomechanical sensors of angular velocities and linear accelerations]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 167 p.
20. Lysenko I.E., Kulikova I.V., Polishchuk E.V., Khayrulina V.A. Modelirovanie elementov mikrosistemnoy tekhniki v programme ANSYS [Modeling elements of Microsystems technology in the ANSYS program]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, 42 p.
21. Abramov I.I. Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. Ch. II. Modeli poluklassicheskogo podkhoda [Problems and principles of physics and modeling of device structures of micro- and nanoelectronics. Part II. Model semiclassical approach], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2006, No. 9, pp. 26-36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

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

Ежова Ольга Александровна – e-mail: ezhova.08.05@gmail.com; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

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

Ezhova Olga Aleksandrovna – email: ielysenko@sfedu.ru; the department of electronic apparatuses design; postgraduate student.

УДК 519.711

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-232-245

С.В. Фролов, Т.А. Фролова

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬЮ

В большинстве практических случаев для неопределённых параметров технологических процессов нахождение характеристик законов распределения и функций принадлежности является затруднительным. Обычно для неопределённых параметров известны только интервалы их значений. Целью исследования является разработка теоретических