

Быков Александр Викторович – ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»; e-mail: admin@niifp.ru; 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 6; тел.: +74997311306; директор по производству.

Bykov Alexander Victorovich – F.V. Lukin State Research Institute of Physical Problems; e-mail: admin@niifp.ru; Building 6, Passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia; phone: +74997311306; unit manager.

УДК 621.3.049.77

И.Е. Лысенко, О.А. Ежова, Ф.М. Бондарев, А.В. Ткаченко

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
СЕНСОРА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ С ТРЕМЯ ОСЯМИ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ***

Устройства микросистемной техники, такие как сенсоры линейных ускорений, сенсоры угловых скоростей, актюаторы широко применяются в различных областях: космическая промышленность, бытовые приборы, игры нового поколения, автомобилестроение и т.д. Устройства микросистемной техники широко применяются и в медицинской технике. Например, микромеханические сенсоры линейных ускорений используются в работе дефибрилляторов. Таким образом актуальной задачей на сегодняшний день является разработка конструкции сенсоров линейных ускорений. Основными целями при разработке микромеханических сенсоров является улучшение основных рабочих характеристик, уменьшение массогабаритных параметров сенсора и площади, занимаемой на подложке, а также снижение стоимости проектируемого изделия. В данной работе разработана и исследована конструкция сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности, проведен модальный анализ разработанной конструкции по трем осям чувствительности, рассчитаны собственные формы и частоты колебаний разработанной конструкции, разработано описание исследуемой конструкции на языке высокого уровня VHDL-AMS, на основе которого проведено моделирование работы разработанного микромеханического многоосевого сенсора под действием линейных ускорений в программе hAMSter. В результате моделирования определена длительность воздействия линейных ускорений, определена амплитуда перемещений, пропорциональная величине действующего воздействия, определено время действия переходных процессов по осям чувствительности, определена начальная емкость преобразователей перемещений по осям чувствительности, определены изменения дифференциальных емкостей по осям чувствительности при действии линейного ускорения. Из результатов проведенных исследований видно, что конструкция упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического акселерометра обеспечивает равенство частот по двум осям чувствительности.

Микросистемная техника; микроэлектромеханические системы; элементная база; микромеханический компонент; сенсор линейных ускорений; акселерометр; конструкция; модель; моделирование.

I.E. Lysenko, O.A. Ezhova, F.M. Bondarev, A.V. Tkachenko

**ANALYSIS OF A DESIGN OF LINEAR ACCELERATION SENSOR
WITH THREE SENSITIVE AXIS**

Today microsystem technique develops extensively. Devices of microsystem technique such as sensors of linear acceleration, sensors of 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. Various devices of microsystem technology have become in-

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

creasingly visible in the healthcare market, because the microsystem technology serve as solutions adapted to the requirements of various applications. For example, MEMS sensors of linear acceleration are used in defibrillators and pacemakers. 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 was realized, description of the sensor design was developed on high-level language VHDL-AMS. The results of the research show, that the elastic suspension design of the linear acceleration sensor sensing element provides equality of frequency along two axes.

Microsystems technologies; microelectromechanical systems; elements base; micromachined component; linear acceleration sensor; accelerometer; design; model; modeling.

Введение. Микросистемная техника является одним из наиболее динамично развивающихся научно-технических направлений. Базовым классом компонентов микросистемной техники являются микроэлектромеханические системы (МЭМС) – устройства с интегрированными в объеме и на поверхности твердого тела электронными и микромеханическими структурами. Одним из направлений развития микросистемной техники является разработка, исследование и применение микромеханических сенсоров [1–7].

Микромеханические сенсоры линейных ускорений находят широкое применение в современных технических средствах различного назначения: от специализированных изделий аэрокосмической техники и оборонных систем до бытовых приборов, таких как сотовых телефонов и игровых платформ. Так, например, микромеханические сенсоры в составе навигационной системы ГЛОНАСС и GPS приемником позволяют сохранить точность и непрерывность навигации при потере приема сигнала со спутника. В отрасли автомобилестроения данные компоненты позволяют повысить уровень комфорта автомобилей (динамическое управление движением, антиблокировочные системы торможения) [5–10].

В данной работе исследуется разработанная конструкция сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности. На рис. 1 представлена геометрическая модель предложенного микромеханического сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности [11–20].

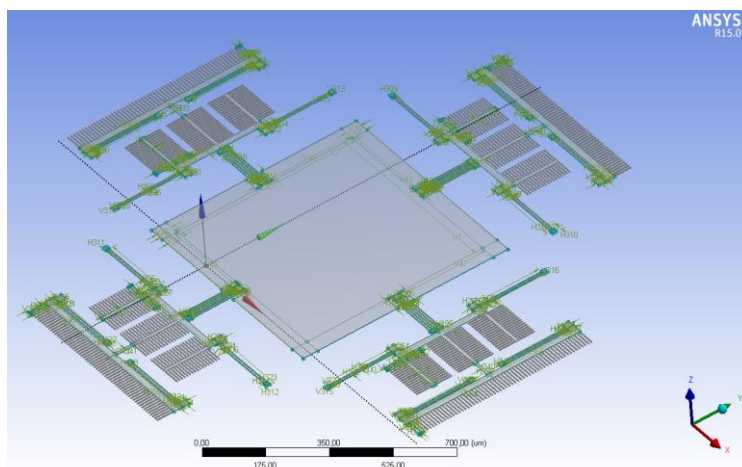


Рис. 1. Параметризуемая геометрическая модель микромеханического сенсора линейных ускорений

Результаты исследования разработанной конструкции. В ходе исследования разработанной конструкции были выполнены расчеты собственных форм и частот колебаний многоосевого микромеханического сенсора линейных ускорений.

На рис. 2–4 представлены результаты модального анализа предложенного микромеханического акселерометра по осям чувствительности в программе ANSYS.

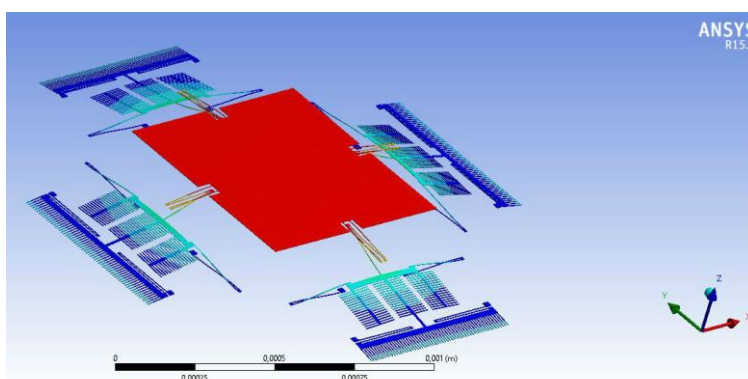


Рис. 2. Первая собственная частота колебаний (2,22 кГц)

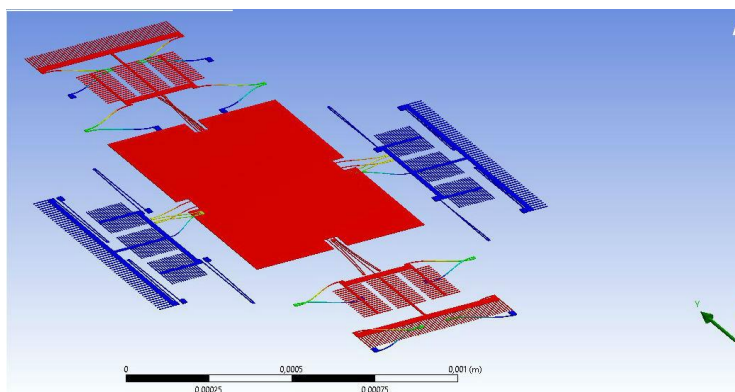


Рис. 3. Вторая собственная частота колебаний (6,52 кГц)

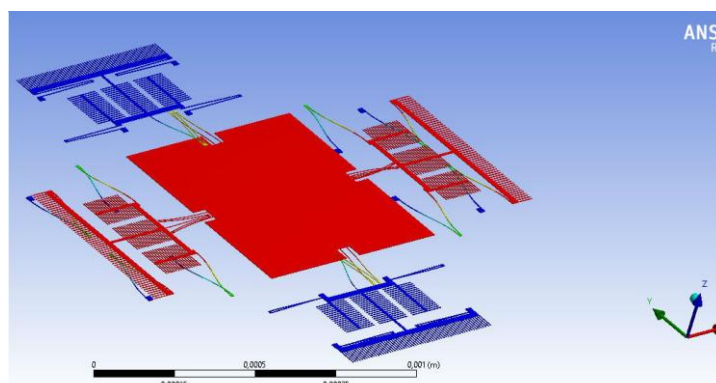


Рис. 4. Третья собственная частота колебаний (6,52 кГц)

На рис. 5–7 представлены результаты моделирования работы микромеханического акселерометра под действием линейных ускорений в программе hAMSter на основе разработанного параметризуемого высокоуровневого языка описания VHDL-AMS.

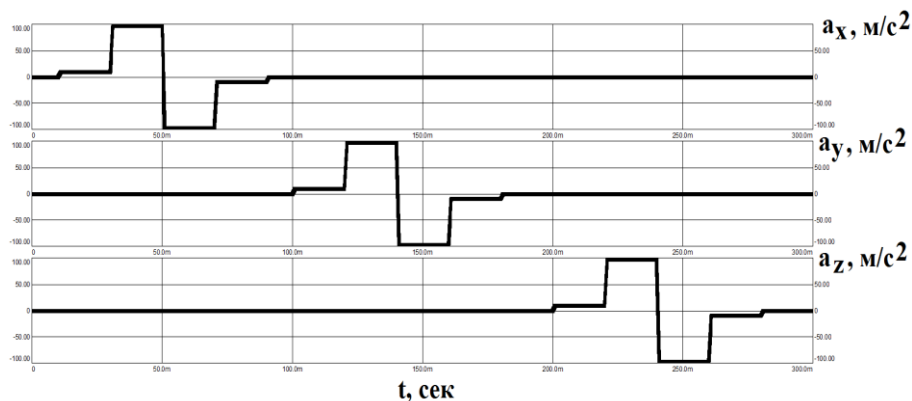


Рис. 5. Изменения линейных ускорений в полном динамическом диапазоне

Как видно на рис. 5, длительность воздействия линейных ускорений составляет по 40 мс, длительности переднего и заднего фронтов – по 1 мс.

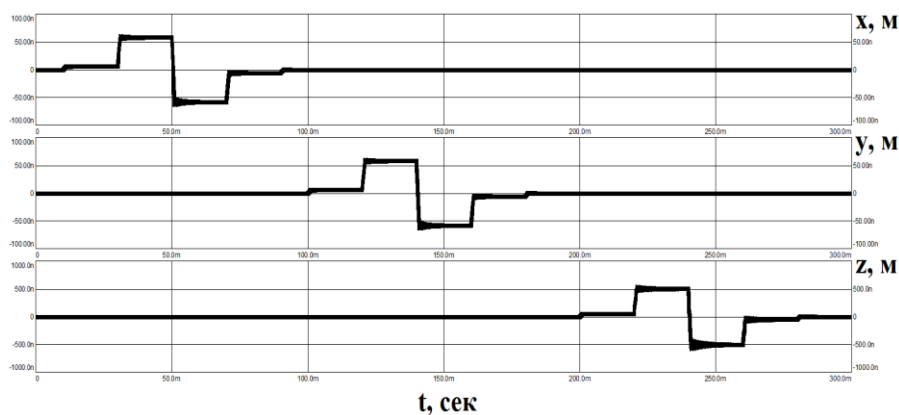


Рис. 6. Перемещения чувствительного элемента акселерометра по осям X, Y, Z под действием линейного ускорения

Как видно на рис. 6, 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. Время действия переходных процессов по осям чувствительности X, Y – 9 мс, а оси Z – 11 мс.

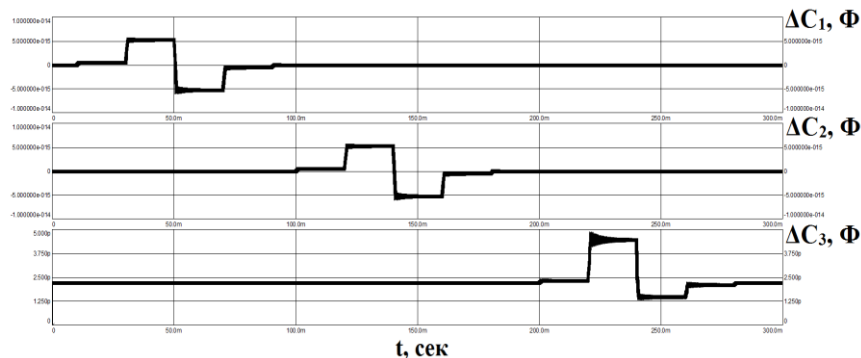


Рис. 7. Изменения емкостей преобразователей перемещений акселерометра

Вывод. Из результатов проведенных исследований видно, что конструкция упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического акселерометра обеспечивает равенство частот по двум осям чувствительности.

Как показали результаты моделирования, начальная емкость преобразователей перемещений по осям X и Y составляет 90 фФ, и по оси Z – 2,2 пФ. При действии линейного ускорения изменения дифференциальных емкостей по осям X и Y составляет 0,51 фФ при g и 5,1 фФ при 10g, по оси Z – 0,1 пФ при g и 1,8 пФ при 10g.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы: учебное пособие. – Тула: Тульский государственный университет, 2007. – 400 с.
2. *Ramadoss R.* MEMS devices for biomedical applications // *Solid State Technology*. – 2013. – Vol. 10. – P. 10-13.
3. *Sung W.T., Kang T. and Lee J.G.* Controller Design of a MEMS Gyro-Accelerometer with a Single Proof Mass // *International Journal of Control, Automation, and Systems*. – 2008. – Issue 6. – P. 873-883.
4. *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.
5. *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.
6. *Прокофьев И.В., Тихонов Р.Д.* Нано- и микросистемы для мониторинга параметров движения транспортных средств // *Нано- и микросистемная техника*. – 2011. – № 12. – С. 48-50.
7. *Сысоева С.* Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы – от Low-End до High-End // *Компоненты и технологии*. – 2010. – № 5.
8. *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.
9. *Elwenspoek M., Wiegierink R.* Silicon micro accelerometers // *Mechanical microsensors*. – 2005. – P. 230-236.
10. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Лысенко И.Е.* Элементная база наноэлектроники, микро- и наносистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 91 с.
11. *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.
12. *Лысенко И.Е.* Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений // *Инженерный вестник Дона*. – 2010. – № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный).

13. 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).
14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. Лысенко И.Е. Интегральные микромеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 180 с.
18. Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Лысенко И.Е. Элементная база нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 91 с.
19. Лысенко И.Е. Метод проектирования микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений LL-типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 117-123.
20. 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.

REFERENCES

1. Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory: uchebnoe posobie [Micromechanical devices: a training manual]. Tula: Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2007, 400 p.
2. Ramadoss R. MEMS devices for biomedical applications, *Solid State Technology*, 2013, Vol. 10, pp. 10-13.
3. Sung W.T., Kang T. and Lee J.G. Controller Design of a MEMS Gyro-Accelerometer with a Single Proof Mass, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2008, Issue 6, pp. 873-883.
4. Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P. Primenenie MEMS-sensirov 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.
5. 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 – possible way of development of MEMS in Russia], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 6, pp. 28-31.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Elwenspoek M., Wiegerink R. Silicon micro accelerometers, *Mechanical microsensors*, 2005, pp. 230-236.
10. 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.

11. *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.
12. *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).
13. *Lysenko I.E., Lysenko A.V.* Integral'nye sensory uglovykh skorostey i lineynykh us-koreniy LR-tipa na osnove uglерodnykh nanotrubokurs [Integrated sensors of angular velocities and linear unit roots LR-type on the basis of carbon nanotubok], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2012, No. 4. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/> (the access is free).
14. *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).
15. *Lysenko I.E., Sinyutin S.A., Voronkov O.Yu.* Povedencheskaya model' mikromekhanicheskogo sensora uglovykh skorostey dlya modelirovaniya v srede Simulink programmnogo paketa MatLab [Behavioral model of a micromechanical sensor of angular velocity 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/N4y2014/2674/> (the access is free).
16. *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 programmnogo 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).
17. *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.
18. *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.
19. *Lysenko I.E.* Metod proektirovaniya mikromekhanicheskikh sensorov uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy LL-tipa [Design method of micromachined gyroscope-accelerometer LL-type], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 117-123.
20. *Lysenko I.E., Ezhova O.A., Kulikova I.V., Pristupchik N.K.* Metodika proektirovaniya mikromekhanicheskikh komponentov na osnove biblioteki mikrofragmentov [Design method of micromechanical components based on the macros library], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 201-205.

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

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.

Бондарев Филипп Михайлович – e-mail: dogrtt@mail.ru; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

Ткаченко Алексей Вячеславович – e-mail: msqk@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.

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

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

Tkachenko Aleksey Vyacheslavovich – e-mail: msqk@mail.ru; the department of electronic apparatuses design; student.

УДК 621.3.049.77

Е.А. Рындин

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ*

Рассмотрен метод построения устройств обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханических гироскопов и акселерометров, предполагающий выполнение преобразования «емкость – частота» посредством выделения разностной частоты колебаний двух генераторов, в частотозадающие цепи которых включены емкости микромеханических преобразователей гироскопов или акселерометров. Рассмотрена схема преобразователя «емкость – частота», обеспечивающая высокую чувствительность, стабильность при изменениях температуры и напряжения питания и устойчивость к шумам благодаря разностному принципу формирования выходного сигнала. Выходные гармонические сигналы генераторов подаются на смеситель, на выходе которого формируется сигнал биений. Частота биений является разностной частотой измерительных генераторов и определяется разностью емкостей микромеханического преобразователя. Сигнал биений с выхода смесителя поступает на детектор, выделяющий огибающую данного сигнала, которая усиливается линейным усилителем и подается на формирователь выходных прямоугольных импульсов соответствующей частоты для последующей цифровой обработки. Частотный выход данной схемы позволяет оптимизировать устройство последующей цифровой обработки информации о регистрируемых значениях угловой скорости или линейного ускорения. Разностный принцип формирования выходного сигнала обеспечивает высокую чувствительность устройства без использования зарядовых усилителей, что позволяет повысить устойчивость схемы к шумам. Использование для формирования выходных импульсов двух идентичных генераторов обеспечивает частичную компенсацию температурных изменений выходной частоты, расширяя диапазон рабочих температур устройства. Для оценки эффективности предложенного метода построения устройств обработки сигналов емкостных преобразователей микромеханических гироскопов и акселерометров разработаны, изготовлены и исследованы макеты аналогового и цифрового вариантов устройств обработки сигналов емкостных микромеханических преобразователей.

Микромеханический гироскоп; акселерометр; обработка сигналов.

* Работа при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты № 14.575.21.0045, № 213.01–11/2014–12).