

Разработка поведенческой модели сенсора линейного ускорения с двумя осями чувствительности для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab

И.Е. Лысенко, С.А. Синютин, О.Ю. Воронков

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Работа посвящена синтезу поведенческой модели сенсора линейного ускорения с двумя осями чувствительности в среде Simulink программного пакета MatLab на основе математической модели этого устройства в форме дифференциальных уравнений. Приводятся результаты моделирования динамики синтезированной поведенческой модели сенсора в виде переходных процессов и спектрального анализа при реакции системы на внешние воздействия.

Ключевые слова: микросистемная техника, микроэлектромеханическая система, элементная база, акселерометр, сенсор, конструкция, модель, моделирование, переходной процесс, спектральный анализ

Введение

Одним из динамично развивающихся научно-технических направлений является микросистемная техника. В рамках данного направления создается большое количество различных по функциональному признаку микроэлектромеханических систем (далее МЭМС). Микромеханические сенсоры линейных ускорений (акселерометры) представляют собой один из классов МЭМС, получивших широкое распространение и изготавливаемых по групповым методам изготовления компонентов микроэлектроники и микросистемной техники. Микромеханические акселерометры находят применение в системах контроля и безопасности транспортных средств, инерциальных навигационных системах, интерактивных игровых приставках, медицинском оборудовании и т.д. [1 – 7].

В данной статье рассматривается поведенческая модель емкостного сенсора линейного ускорения с двумя осями чувствительности с целью проверки работоспособности синтезируемой МЭМС.

Конструкция сенсора

На рисунке 1 представлена конструкция микромеханического сенсора линейных ускорений с двумя осями чувствительности.

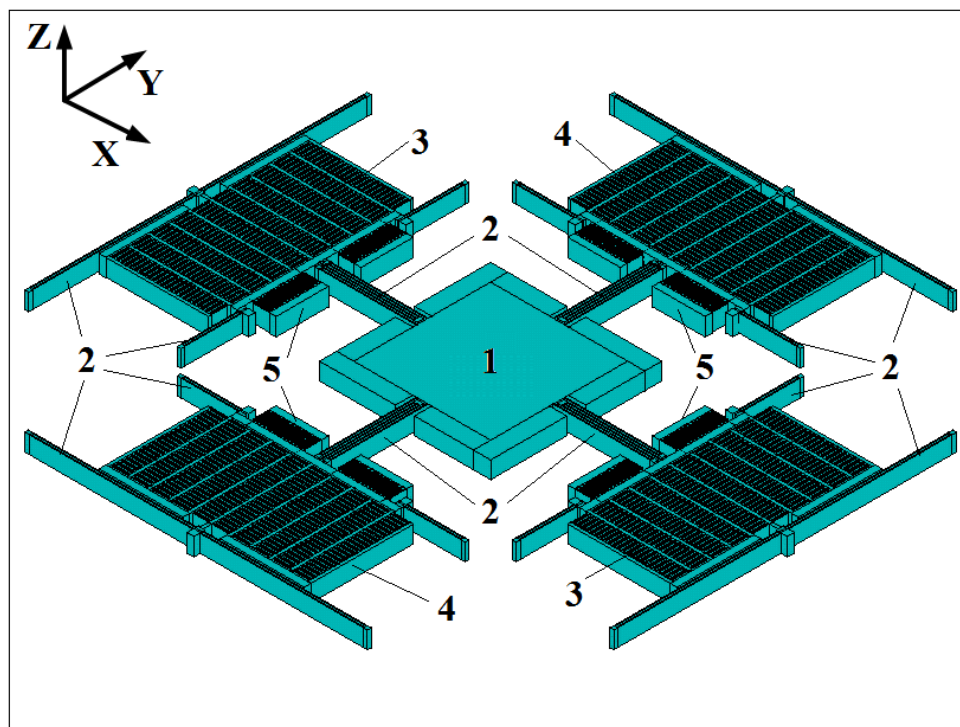


Рис. 1. – Микромеханический сенсор линейных ускорений с двумя осями чувствительности

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

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

Математическая модель

Математическая модель движения чувствительного элемента акселерометра в форме уравнений в переменных состояния может быть получена на основе уравнения Лагранжа 2-го рода и выглядит следующим

образом [1, 8]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -2 \cdot \delta \cdot \dot{x} - \omega_1^2 \cdot x + (F_x + F_{el1}) \cdot m^{-1} + \Omega(\dot{y} + \Omega \cdot x), \\ \ddot{y} = -2 \cdot \delta \cdot \dot{y} - \omega_2^2 \cdot y + (F_y + F_{el2}) \cdot m^{-1} - \Omega(\dot{x} - \Omega \cdot y), \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – перемещения чувствительного элемента по осям X и Y ; m – масса чувствительного элемента; β – коэффициент демпфирования; ω_{01}, ω_{02} – собственные частоты колебаний чувствительного элемента по осям X и Y ; F_x, F_y – силы инерции; F_{el1}, F_{el2} – электростатические силы; Ω – угловая скорость.

Силы, действующие на чувствительный элемент, выражаются равенствами [1]:

$$\begin{cases} F_x = m \cdot a_x, \\ F_y = m \cdot a_y, \\ F_{el1} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1} \cdot U_{DC} U_{AC1}, \\ F_{el2} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1} \cdot U_{DC} U_{AC2}, \end{cases} \quad (2)$$

где a_x, a_y – линейные ускорения по осям X и Y ; N_1 – число пальцев подвижного гребенчатого электрода электростатического привода; ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ε_0 – электрическая постоянная; h – толщина структурного слоя; d_1 – зазор между пальцами гребенок подвижного и неподвижного электродов электростатического привода; U_{DC} – постоянное напряжение; U_{AC1}, U_{AC2} – переменные напряжения.

Изменение емкостей преобразователей перемещений считается по формулам [1, 9 – 11]:

$$\begin{cases} dC_x = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot l \cdot h}{d_2^2} \cdot x, \\ dC_y = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot l \cdot h}{d_2^2} \cdot y, \end{cases} \quad (3)$$

где N_2, N_3 – число пальцев и гребенок подвижных электродов емкостных преобразователей перемещений; l – длина перекрытия пальцев гребенок подвижных электродов емкостных преобразователей перемещений; d_2 – зазор между пальцами гребенок подвижного и неподвижного электродов емкостных преобразователей перемещений.

Коэффициент жесткости подвеса чувствительного элемента определяется исключительно свойствами структурного слоя и конфигурацией упругих балок. Однако, как видно из конструкции предложенного устройства и принципа его функционирования емкостные преобразователи перемещений будут оказывать влияние на динамические свойства чувствительного элемента через коэффициент электростатической упругости [1, 8].

Таким образом, собственные частоты чувствительного элемента акселерометра будут определяться выражениями:

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{k - k_{el1}}{m}} = \sqrt{\omega_{01}^2 - \frac{k_{el1}}{m}}, \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{k - k_{el2}}{m}} = \sqrt{\omega_{02}^2 - \frac{k_{el2}}{m}}, \end{cases} \quad (4)$$

где k – жесткость подвеса чувствительного элемента; k_{el1}, k_{el2} – коэффициенты электростатической упругости, вычисляемые из уравнений:

$$\begin{cases} k_{el1} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1 \cdot x} \cdot U_{DC} U_{AC1}, \\ k_{el2} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1 \cdot y} \cdot U_{DC} U_{AC1}. \end{cases} \quad (5)$$

Поведенческая модель

На основе математической модели (1) с учетом выражений (2 – 5) была разработана поведенческая модель сенсора линейных ускорений с двумя осями чувствительности.

На рисунке 2 представлена поведенческая модель акселерометра, разработанная для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab.

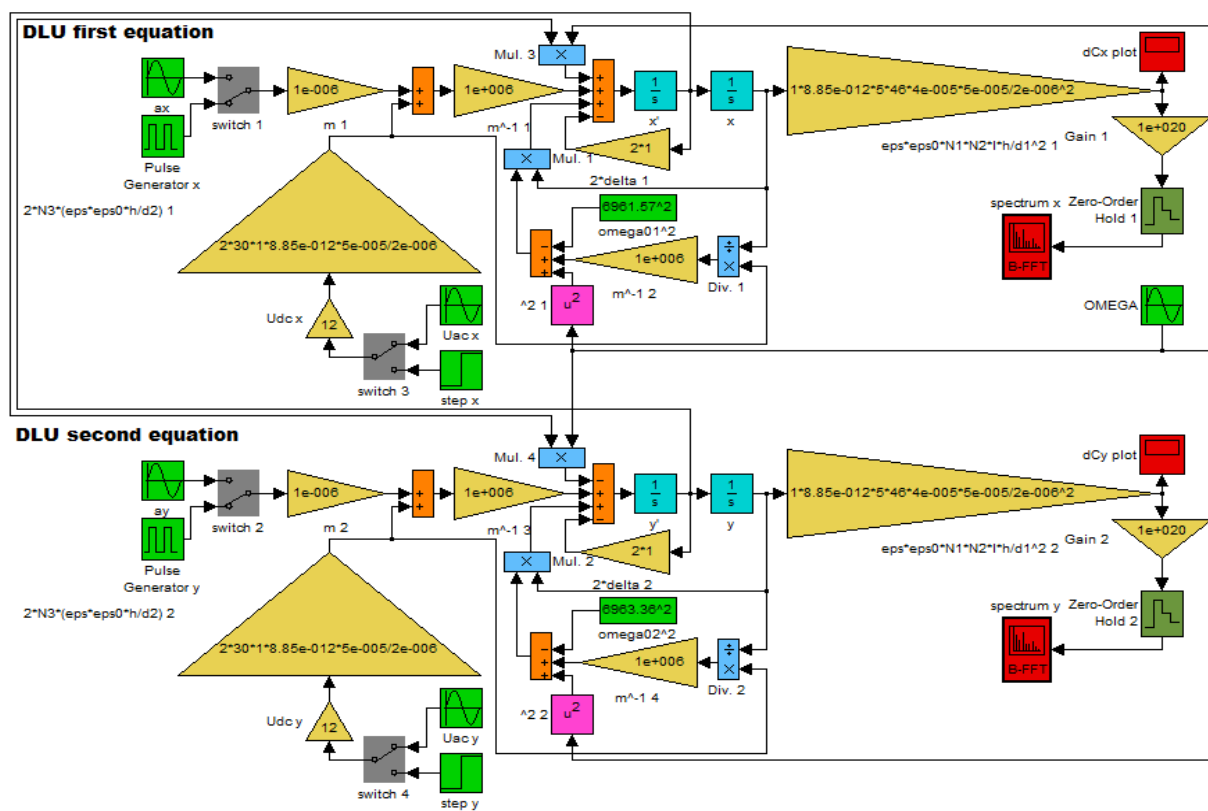


Рис. 2. – Поведенческая модель сенсора линейных ускорений с двумя осями чувствительности

С применением прямых и обратных связей на главные сумматоры подаются одночлены из уравнений: сигналы со входов системы, собственно переменные состояния и их первые производные с требуемыми знаками (плюс или минус в зависимости от знака в уравнении) и коэффициентами. На входах системы оказываются переменные, не относящиеся к переменным

состояния, т.е. исходные данные, не являющиеся константами. Именно они играют роль задающих воздействий, характер которых определяется целями управления. Прохождение сигналов по блок-схеме реализуется посредством прямых и обратных связей, усилительных коэффициентов, сумматоров и умножителей в соответствии с уравнениями в переменных состояния.

Результаты моделирования

Результаты моделирования динамики синтезированной системы представлены графически на рисунках 3 – 6 в виде переходных процессов и спектрального анализа, имеющих целью исследование параметров демпфирования и частотных свойств объекта. Переходные процессы являются реакцией системы на прямоугольные импульсы (именно по этим законам в рамках поставленного эксперимента изменяются во времени линейные ускорения a_x, a_y). Спектральным анализом отражены собственные резонансы системы на частотах ω_{01} и ω_{02} .

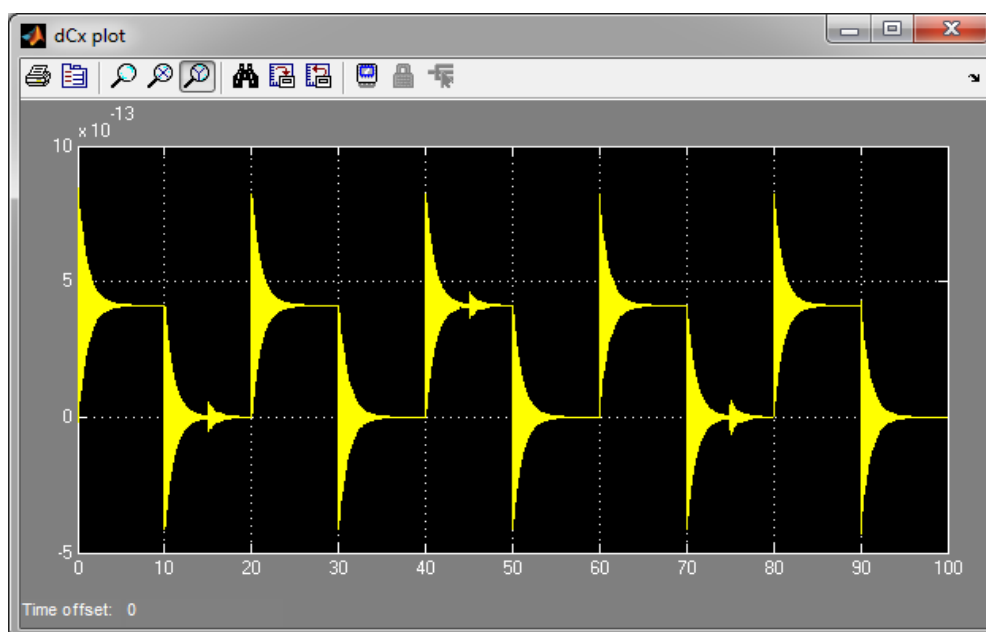


Рис. 3. – Переходной процесс относительно переменной x
(измерение линейного ускорения по оси x)

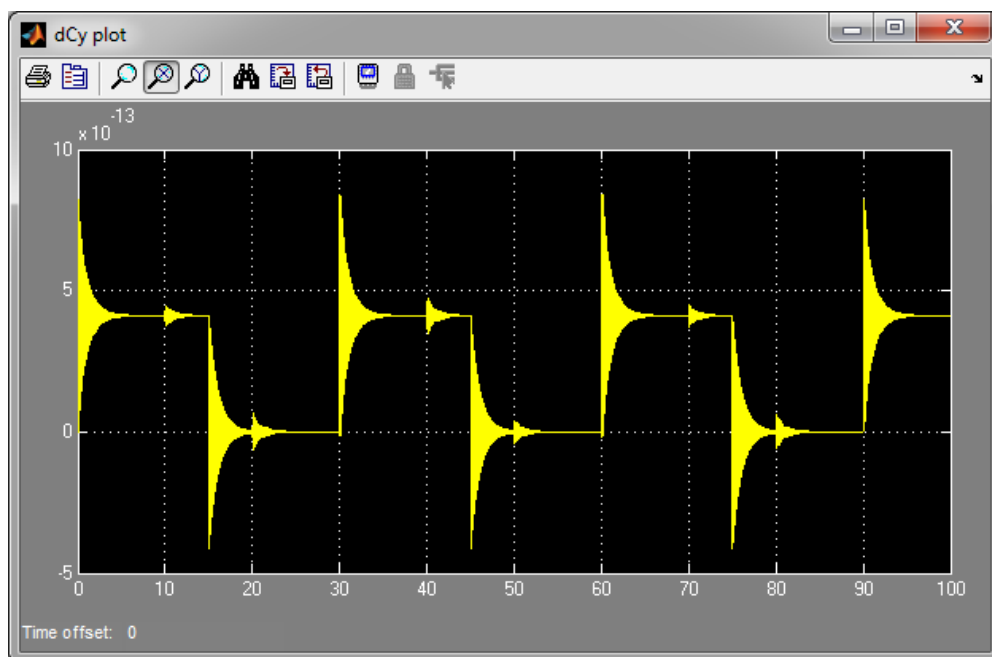


Рис. 4. – Переходной процесс относительно переменной y
(измерение линейного ускорения по оси y)

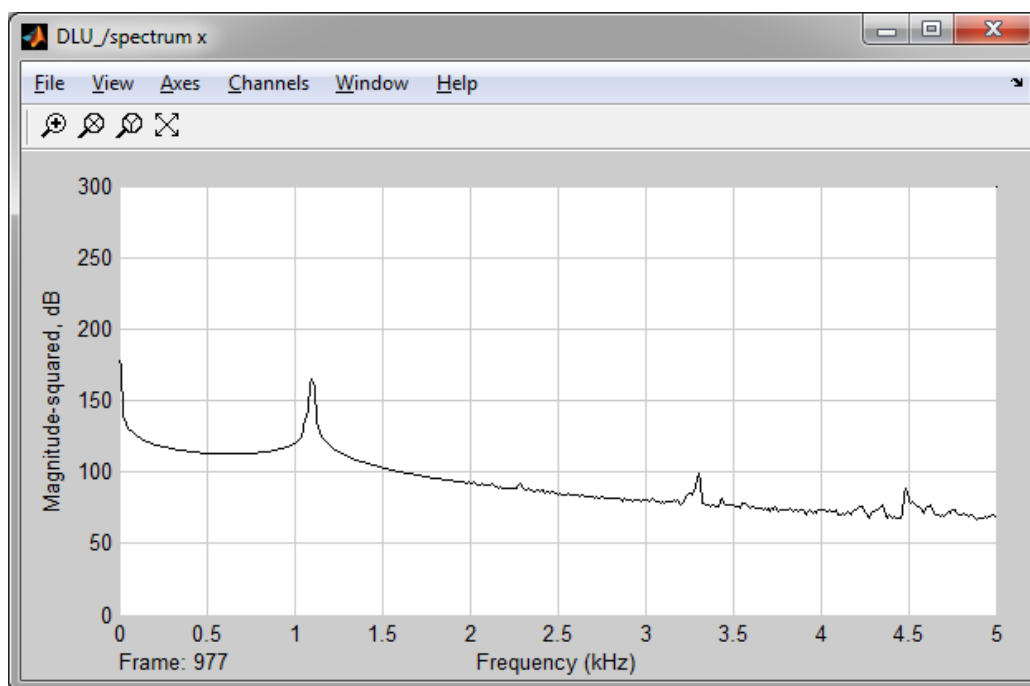


Рис. 5. – Спектральная мощность переменной x

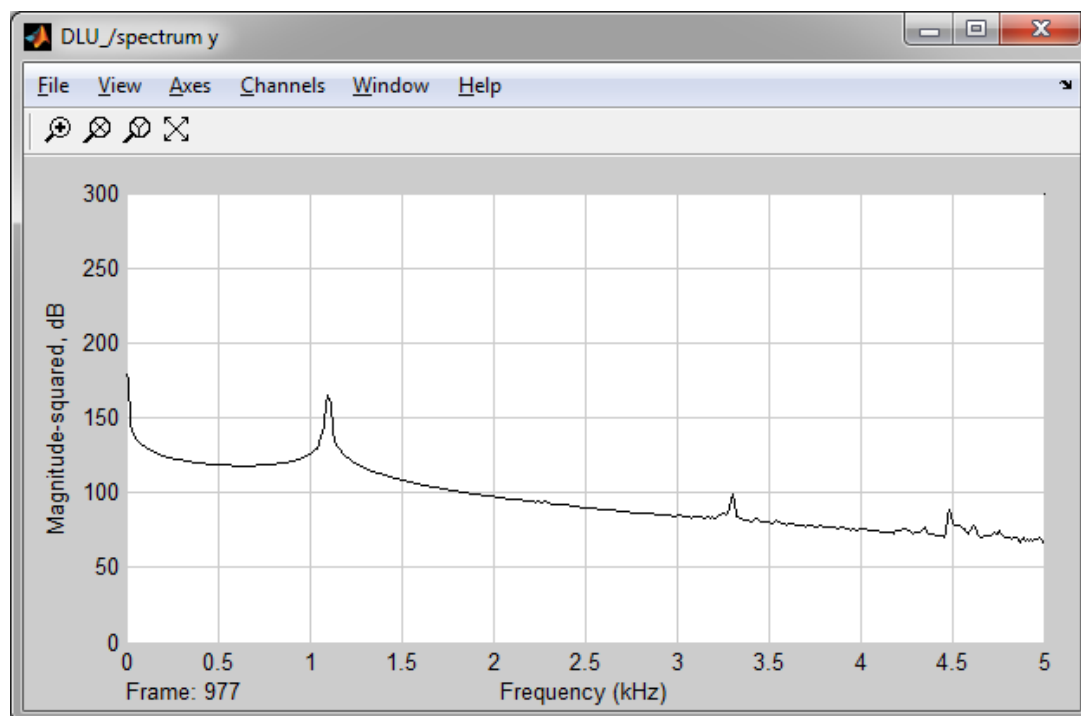


Рис. 6. – Спектральная мощность переменной y

В ходе моделирования акселерометра периоды импульсов имеют следующие значения: на входе переменной a_x – 20 с, на входе переменной a_y – 30 с.

Заключение

Моделированием подтверждена корректная работа сенсора линейных ускорений с двумя осями чувствительности. В ходе эксперимента была выявлена высокая добротность колебательной системы, обусловленная малым демпфированием и отраженная медленным затуханием переходных процессов, а также ярко выраженными резонансами.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей

лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в Южном федеральном университете (г. Ростов-на-Дону).

Литература

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. 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. 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.
6. Elwenspoek, M. and R. Wiegerink, 2005. Silicon micro accelerometers. Mechanical microsensors, pp: 230 – 236.
7. Alper, S.E., K. Azgin and T. Akin, 2007. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. Sensors and Actuators A, 135: 34 – 42.
8. Lysenko, I.E., 2013. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis. World Applied Sciences Journal, 27 (6): 759 – 762.



9. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е., Шерова Е.В. Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений // Инженерный вестник Дона, 2010, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/240.

10. Лысенко И.Е., Ежова О.А. Критерии равенства собственных частот колебаний чувствительных элементов микромеханических гироскопов-акселерометров // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475.

11. Лысенко И.Е. Моделирование двухосевого микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.

References

1. Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. Tula: Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2007. 400 p.

2. Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2012. №6. pp. 51 – 56.

3. Aravin V.V., Verner V.D., Saurov A.N., Mal'tsev P.P. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. №6. pp. 28 – 31.

4. Prokof'ev I.V., Tikhonov R.D. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. №12. pp. 48 – 50.

5. Anchurin S.A., Maksimov V.N., Morozov E.S., Golovan' A.S., Shilov V.F. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. №1. pp. 50 – 53.

6. Elwenspoek, M. and R. Wiegerink, 2005. Silicon micro accelerometers. Mechanical microsensors, pp: 230 – 236.

7. Alper, S.E., K. Azgin and T. Akin, 2007. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. Sensors and Actuators A, 135: 34 – 42.



8. Lysenko, I.E., 2013. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis. World Applied Sciences Journal, 27 (6): 759 – 762.

9. Konoplev B.G., Lysenko I.E., Sherova E.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/240.

10. Lysenko I.E., Ezhova O.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475.

11. Lysenko I.E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.