

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail:w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 621.396

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-143-152

И.Е. Лысенко, Д.В. Науменко

**РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ГИРОСКОПА С С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Микромеханические вибрационные гироскопы являются одним из устройств микроэлектромеханических систем (МЭМС) и предназначены для измерения угловой скорости. В данной работе исследуется модель одномассового микромеханического гироскопа LL-типа, изготавливаемого по объемной кремниевой технологии с толщиной приборного слоя 50 мкм. Целью работы является изучение измерительных свойств прибора с определенной частотной настройкой. Описаны проведенные для этого исследования его динамических характеристик, частотного отклика при воздействии гармонических нагрузок эквивалентных тем, что будут воздействовать при реальной работе микрогироскопа на изготовленный чувствительный элемент. АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) МЭМС гироскопа существенно зависит от конструкции и топологии чувствительного элемента. При выборе конструкции закладываются качественные характеристики и алгоритм его функционирования, при разработке топологии получают количественные характеристики существенно влияющие на измерительные свойства прибора. Получение амплитудно-частотных характеристик на этапе проектирования позволит оценить предельные точностные характеристики, определить его чувствительность, провести оптимизацию конструкции гироскопа для улучшения его конечных характеристик. В статье описана последовательность произведенных расчетов для получения АЧХ и определения чувствительности к угловой скорости методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench. В результате исследований определены собственные частоты ММГ по двум осям, по полученным АЧХ графическим способом определена полоса пропускания, определена зависимость изменения емкости от угловой скорости. По полученным результатам анализа проведена оценка измерительных свойств прибора и рекомендации по его дальнейшей частотной настройке и оптимизации.

МЭМС; микрогироскоп; конечно-элементный анализ; модальный анализ; гармонический анализ; резонанс.

I.E. Lysenko, D.V. Naumenko

**FINITE-ELEMENT MODELING OF AMPLITUDE-FREQUENCY
CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENT
OF A MICROMECHANICAL GYROSCOPE**

Micromechanical vibration gyroscopes are one of the devices of microelectromechanical systems (MEMS) and are designed to measure angular velocity. In this work, we study a model of a single-mass micromechanical linear gyro, manufactured by bulk silicon technology with an in-

strument layer thickness of $50 \mu\text{m}$. The aim of the work is to study the measuring property of the device with a specific frequency setting. The studies of its dynamic characteristics, frequency response under the influence of harmonic loads equivalent to those that will affect the actual operation of the micro-gyroscope on the manufactured sensing element are described. The frequency response (amplitude-frequency characteristic) of the MEMS gyroscope significantly depends on the design and topology of the sensitive element. When choosing a design, the qualitative characteristics and the algorithm of its functioning are laid down; when developing a topology, quantitative characteristics are obtained that significantly affect the measuring properties of the device. Obtaining the amplitude-frequency characteristics at the design stage will allow us to estimate the limiting accuracy characteristics, determine its sensitivity, and optimize the design of the gyroscope to improve its final characteristics. The article describes the sequence of calculations made to obtain the frequency response and determine the sensitivity to angular velocity by the finite element method in the ANSYS Workbench software package. As a result of the research, the MEMS gyro natural frequencies were determined along two axes, the bandwidth was determined graphically by the frequency response, and the dependence of capacitance on angular velocity was determined. According to the obtained results of the analysis, the measuring property of the device and recommendations for its further frequency tuning and optimization were evaluated.

MEMS; microgyroscope; finite element analysis; modal analysis; harmonic analysis; resonance curve.

Введение. Перспективы современного приборостроения связаны с разработкой приборов, обладающих малыми массами, габаритами, низкими себестоимостью и энергопотреблением, а также высокой надёжностью [1].

Наиболее динамично развивающимися микроэлектромеханическими устройствами (МЭМС) в настоящее время являются акселерометры и гироскопы. Современные чувствительные элементы микромеханических гироскопов представляют собой, как правило, резонансные механические структуры, выполненные в объеме кремния [2].

МЭМС датчики применяются как в промышленности, так и на транспортных средствах различного базирования (наземного, водного и воздушного). Расширяется круг задач, решаемых такими системами, возрастают требования к ним по расширению диапазона измерения, точности определения параметров, минимизации габаритов и энергопотребления [3, 4].

Конструкция микромеханического гироскопа. Топология МЭМС гироскопа показана на рисунке 2, это одномассовый резонансный микрогироскоп LL-типа с электростатическим возбуждением и емкостным съемом сигнала [5] и состоит из подвижной инерционной массы (1), упругих подвесов (2), электростатического вибропривода (3), емкостной преобразователя перемещений (4).

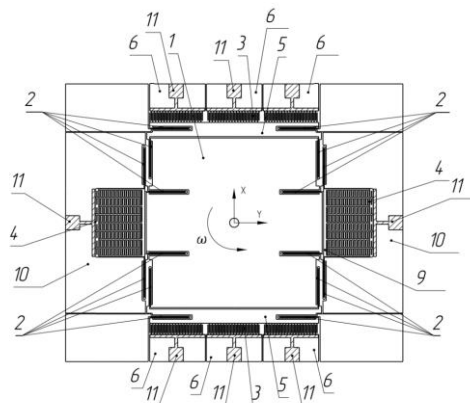


Рис. 2. Топология МЭМС гироскопа

Данное устройство работает следующим образом: упругие подвесы специальной модификации [6–9] позволяют инерционной массе совершать колебательные движения только в двух плоскостях. Движение по оси X обеспечено гребенчатым электростатическим приводом, ротор (5) которого изготовлен на промежуточном элементе подвеса, статор выполнен на приборном слое и состоит из трех элементов (6), один из которых используется для фазового детектирования движения. Каждый элемент статора изолирован друг от друга вытравленным каналом и имеет металлические контактные площадки (7). При движении вдоль оси Y изменяется емкость дифференциального датчика перемещения (8), подвижный электрод (9) изготовлен на промежуточном элементе упругого подвеса, неподвижный электрод (10) выполнен в объеме приборного слоя и имеет металлическую контактную площадку (11).

Рассматриваемый микромеханический гироскоп изготовлен по объемной технологии [10–13] (рис. 1) и состоит из диэлектрического основания (1) и приборного слоя (2) на котором изготовлена структура, соединенного с основанием через слой оксида кремния (3). В подложке вытравлены ниши (4) для обеспечения подвижности инерционной массы, а также нанесен слой металлизации (5) для обеспечения омического контакта.

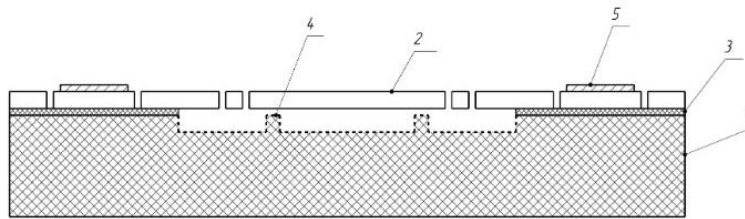


Рис. 1. Структура МЭМС гироскопа, изготовленного по объемной технологии

Важной задачей при разработке микромеханических гироскопов является его предварительная частотная настройка. Когда резонансные частоты совпадают, механический коэффициент усиления микрогироскопа высок, но полоса частот входного сигнала небольшая и существует фазовый сдвиг на выходе. Если частота возбуждаемых колебаний намного меньше частоты колебания режима чувствительности, гироскоп имеет большую полосу пропускания частот, маленький фазовый сдвиг и незначительный коэффициент механического усиления [14]. Этот параметр влияет как на точностные характеристики прибора, так и на принцип съема информационного сигнала [15].

Выполнение анализа конструкции программными методами. Математическая модель чувствительного элемента МЭМС гироскопа представляет собой систему дифференциальных уравнений (1) [16]

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_1^2 x = (F_{el2} - F_{el1})m^{-1} + F_x m^{-1} + \Omega(\dot{y} + \Omega x) \\ \ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_2^2 y = F_k m^{-1} + (F_{el4} - F_{el3})m^{-1} + F_y m^{-1} + \Omega(\dot{x} + \Omega y) \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – перемещения чувствительного элемента по осям X и Y; m – масса чувствительного элемента; δ – коэффициент демпфирования; ω_1, ω_2 – собственные частоты колебаний чувствительного элемента по осям X и Y; F_{el1}, F_{el2} – электростатическая сила; F_k – сила инерции Кориолиса; F_x, F_y – силы инерции; Ω – угловая скорость.

Исходные параметры МЭМС гироскопа приведены в табл. 1:

Таблица 1

Расчетные параметры МЭМС гироскопа

Параметр	Величина
Инерционная масса	$1,63 \times 10^{-7}$ кг
Собственная частота в режиме движения	4953 Гц
Коэффициент жесткости k_x	1.420×10^3 Н/м
Собственная частота в режиме чувствительности	4761 Гц
Коэффициент жесткости k_y	1.380×10^3 Н/м
Динамический диапазон	$\pm 300^\circ/\text{с}$
Начальная суммарная емкость	2.126 пФ
Емкость одной обкладки	1.063 пФ
Модуль Юнга	142 ГПа
Ширина упругих подвесов	5 мкм
Толщина приборного слоя	50 мкм
Аспектное отношение	1:25

Был проведен следующий порядок исследования:

– Выполнен модальный анализ, в результате чего получены собственные частоты и экспандированы нужные моды колебаний по осям движения и чувствительности [17, 18]. Форма колебаний и собственные частоты колебаний показаны на рис. 3. Анализ проводился при температуре 20 °С, исследование зависимости резонансной частоты от температуры исследовано в других работах [19].

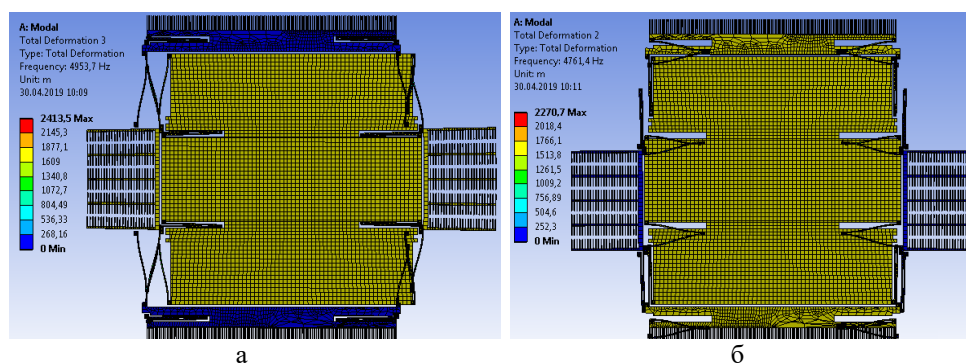


Рис. 3. Формы колебаний микромеханического гироскопа: а – колебания вдоль оси X; б – колебания вдоль оси Y

– Аналитически найдена латеральная сила электростатического привода [15], которая является граничным условием для дальнейшего гармонического анализа. Зависимость латеральной силы от напряжения на обкладках показана на рис. 4.

– Проведен первый гармонический анализ методом суперпозиции мод в качестве гармонической нагрузки использовалась латеральная сила электростатического привода при напряжении 5В равная 1.9×10^{-8} Н.

В результате гармонического анализа получена зависимость амплитуды от частоты гармонического воздействия. На представленной на рис. 4 АЧХ виден резонансный пик частота которого совпадает с собственной частотой колебаний. По данному графику можно определить максимальную амплитуду, добротность и полосу пропускания.

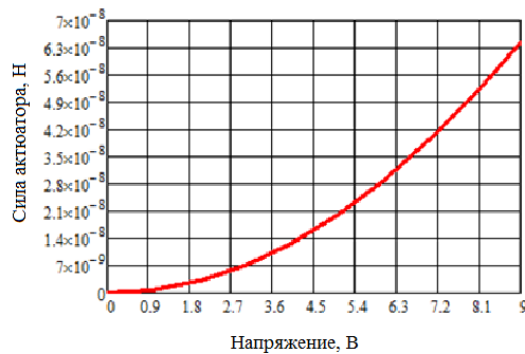


Рис. 3. Зависимость силы электростатического актюатора от приложенного напряжения

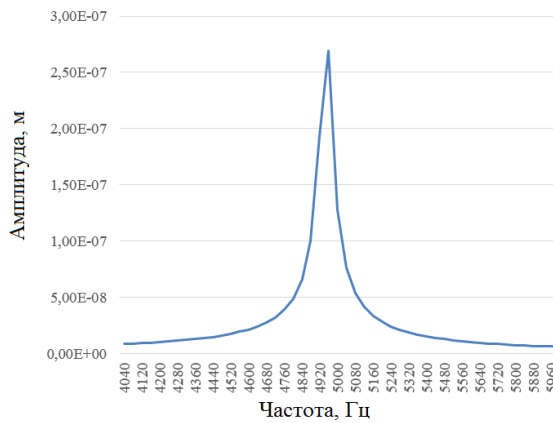


Рис. 4. АЧХ МЭМС гироскопа вдоль оси X

Полученное значение частоты и амплитуды используется для определения силы Кориолиса, вычисленной по формуле 2: []

$$\vec{F}_K = -2m[\vec{\omega} \times \vec{v}_r], \quad (2)$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения основания гироскопа, \vec{v}_r – линейная скорость движения инерционной массы, m – величина инерционной массы.

Линейную скорость движения инерционной массы получим из формулы 3

$$v_r = f * a, \quad (3)$$

где f – частота, полученная по результатам гармонического анализа a – амплитуда движения полученная по результатам гармонического анализа.

– Проведен второй гармонический анализ методом суперпозиции мод в качестве гармонической нагрузки использовалась сила Кориолиса вдоль оси Y при максимальной угловой скорости вращения в 300°/с.

АЧХ МЭМС гироскопа вдоль оси Y совместно с АЧХ вдоль оси X представлена на рис. 5. По данному графику можно оценить частотную настройку и прогнозировать точностные характеристики и чувствительность микрогироскопа.

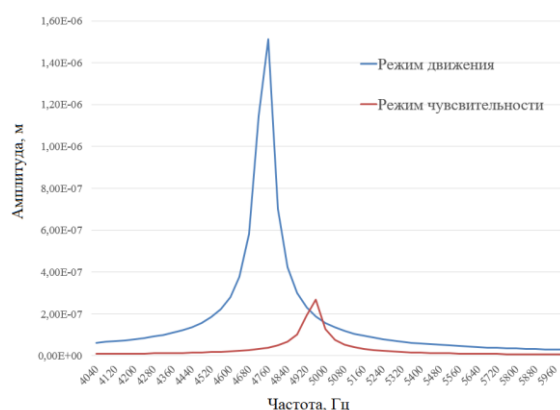


Рис. 5. АЧХ МЭМС гироскопа вдоль двух осей

Полоса пропускания в режиме движения находится в диапазоне от 4720 до 4780 Гц и составляет 60 Гц. Полоса пропускания в режиме чувствительности находится в диапазоне от 4900 до 4990 Гц и составляет 90 Гц. Это обусловлено формой емкостных преобразователей и большим вязким демпфированием в режиме чувствительности.

При дифференциальной схеме одна из емкостей конденсатора уменьшается, а другая увеличивается тем самым возрастает разница емкостей. Зависимость изменения емкости от отклонения по оси Y показана на рисунке 7, где ΔC – изменение емкости дифференциального конденсатора, d – отклонение ИМ от начального положения.

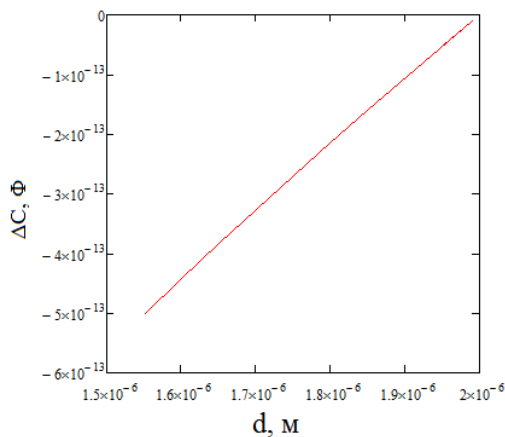


Рис. 6. Изменение емкости от отклонения

Для оценки чувствительности необходимо знать зависимость изменения емкости дифференциального конденсатора от угловой скорости для этого проведен гармонический анализ при угловых скоростях 300, 150 и 50 град/с, результат показан на рис. 7.

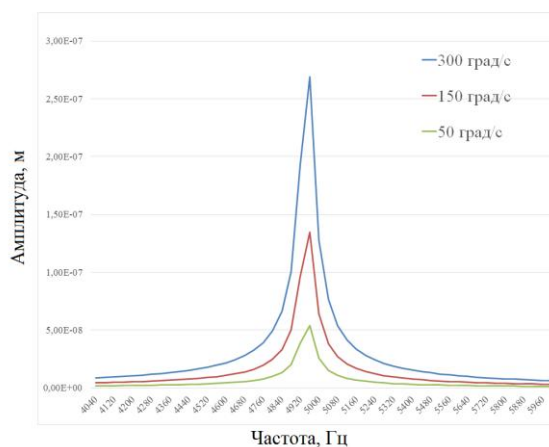


Рис. 6. АЧХ МЭМС гироскопа вдоль оси U при различных угловых скоростях

По графику на рис. 7 можно определить зависимость отклонения от угловой скорости. Средняя величина равняется $0,9 \cdot 10^{-7}$ м/°/с. По графику 6 величина равная отклонению в 0,09 мкм соответствует $9,6 \cdot 10^{-14}$ Ф, таким образом чувствительность будет равна $9,6 \cdot 10^{-14}$ Ф/°/с.

Таблица 2

Полученные параметры по результатам анализа АЧХ

Параметр	Величина
Полоса пропускания в режиме движения	60 Гц
Полоса пропускания в режиме чувствительности	90 Гц
Амплитуда инерционной массы режиме движения	1,52 мкм
Амплитуда инерционной массы в режиме чувствительности	0,24 мкм
Чувствительность	$9,6 \cdot 10^{-14}$ Ф/°/с

По результатам анализа резонансных кривых можно сказать, что резонансные пики смещены и микрогироскоп не будет иметь максимальную чувствительность. Для улучшения стабильности работы нужно уменьшить добротность первичных колебаний. Для улучшения точностных характеристик требуется использовать эффект отрицательной электростатической жесткости [13] в режиме чувствительности для того чтобы сблизить резонансные кривые, и обеспечить большую чувствительность согласно критерию равенства собственных частот [20].

Заключение. В работе представлен расчет АЧХ одноосевого одномассового МЭМС гироскопа методом конечных элементов. Построены графики АЧХ и определены основные динамические параметры, такие собственные частоты в режиме движения и в режиме чувствительности, отклонение инерционной массы при гармоническом воздействии, определена полоса пропускания и чувствительность МЭМС гироскопа к изменению угловой скорости.

Данная методика может быть использована при проектировании вибрационных МЭМС-гироскопов линейного типа различной конструкции с одной либо несколькими инерционными массами, с синхронизирующими элементами, так как основные принципы функционирования не меняются, но усложняется топология с целью достижения оптимальных измерительных характеристик изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барбин Е.С., Баранов П.Ф., Коледа А.Н., Нестеренко Т.Г., Пересветов М.В. Моделирование конструкционных и динамических характеристик двухкомпонентного микромеханического гироскопа // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 1 (7). – С. 96-105.
2. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Расчёт латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 1. – С. 229-233.
3. Тимошенков 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. 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.
5. Евстифеев М.И. Классификационные признаки конструкций микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2004. – Т. 46, № 3. – С. 30-37.
6. Cenk Acar and Andrei M. Shkel. Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement // J. Micromech. Microeng. – 2005. – Vol. 15. – P. 1092-1101. – Doi: 10.1088/0960-1317/15/5/028.
7. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 103 с.
8. Лысенко И.Е. Ежова О.А. Исследование влияния параметров элементов подвесов на собственную частоту конструкции микромеханического сенсора линейных ускорений // Нано - и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 6. – С. 386-390.
9. Alper S.E., Azgin K. and Akin T. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure // Sensors and Actuators A. – 2007. – Vol. 135. – P. 34-42.
10. Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined inertial sensors // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86 (8). – P. 1640-1659.
11. Kovacs G.T.A., Maluf N.L., Petersen K.E. Bulk micromachining of silicon // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86 (8). – P. 1536-1551.
12. Ishihara K., Yung C.F., Ayon A.A., Schmidt M.A. An inertial sensor technology using DRIE and wafer Bonding with interconnecting capability // Journal of Microelectromechanical Systems. – 1999. – No. 8 (4). – P. 403-408. – DOI: 10.1109/84.809054.
13. Apostolyuk V. Theory and design of micromechanical vibratory gyroscopes. In MEMS/NEMS Handbook. – Springer, 2006. – P. 173-195.
14. Распонов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тула: Гриф и К, 2004. – 476 с.
15. Acar C. and Shkel A. MEMS vibratory gyroscopes—Structural approaches to improve robustness // In MEMS Reference Shelf Series. – New York: Springer, 2009. – ISBN: 978-0-387-09535-6.
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.
17. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в Ansys Workbench: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.
18. Леонтьев Н.В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа. – Нижний Новгород, 2006. – 101 с.
19. Куликова И.В., Лысенко И.Е., Приступчик Н.К., Науменко Д.В. Методика расчета влияния термоупругих напряжений на динамические характеристики МЭМС // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3.
20. 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.

REFERENCES

1. *Barbin E.S., Baranov P.F., Koleda A.N., Nesterenko T.G., Peresvetov M.V.* Modelirovanie konstruksionnykh i dinamicheskikh kharakteristik dvukhkomponentnogo mikromekhanicheskogo giroskopa [Modeling of structural and dynamic characteristics of two-component micromechanical gyroscope], *Vestnik nauki Sibiri* [Journal of science of Siberia], 2013, No. 1 (7), pp. 96-105.
2. *Dragunov V.P., Ostertak D.I.* Raschet lateral'noy sostavlyayushchey elektrosticheskoj sily v MEMS [Calculation of the lateral component of electrostatic force in MEMS], *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of Novosibirsk state technical University], 2009, No. 1, pp. 229-233.
3. *Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P.* Primenenie MEMS-senzorov v sistemakh navigatsii i orientatsii podvizhnykh ob"ektov [Application of MEMS sensors in navigation systems and orientation of moving objects], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2012, No. 6, pp. 51-56.
4. *Aravin V.V., Verner V.D., Saurov A.N., Mal'tsev P.P.* MEMS vysokogo urovnya – vozmozhnyy put' razvitiya MEMS v Rossii [High-level MEMS – a possible way of MEMS development in Russia], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2011, No. 6, pp. 28-31.
5. *Evstifeev M.I.* Klassifikatsionnye priznaki konstruksiy mikromekhanicheskikh giroskopov [Classification criteria of the structures of micromechanical gyroscopes], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2004, Vol. 46, No. 3, pp. 30-37.
6. *Cenk Acar and Andrei M. Shkel.* Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement, *J. Micromech. Microeng.*, 2005, Vol. 15, pp. 1092-1101. Doi: 10.1088/0960-1317/15/5/028.
7. *Lysenko I.E.* Proektirovanie senzornykh i aktyuatornykh elementov mikrosistemnoy tekhniki [Design of sensor and actuator elements of Microsystem technology]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2005, 103 p.
8. *Lysenko I.E., Ezhova O.A.* Issledovanie vliyaniya parametrov elementov podvesov na sobstvennuyu chastotu konstruksii mikromekhanicheskogo sensora lineynykh uskoreniy [Investigation of the effect of the parameters of suspension elements on the eigenfrequency of the design of the micromechanical sensor of linear accelerations], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2016, Vol. 18, No. 6, pp. 386-390.
9. *Alper S.E., Azgin K. and Akin T.* A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure, *Sensors and Actuators A*, 2007, Vol. 135, pp. 34-42.
10. *Yazdi N, Ayazi F, Najafi K.* Micromachined inertial sensors, *Proceedings of the IEEE*, 1998, Vol. 86 (8), pp. 1640-1659.
11. *Kovacs G.T.A., Maluf N.I., Petersen K.E.* Bulk micromachining of silicon, *Proceedings of the IEEE*, 1998, Vol. 86 (8), pp. 1536-1551.
12. *Ishihara K., Yung C.F., Ayon A.A., Schmidt M.A.* An inertial sensor technology using DRIE and wafer Bonding with interconnecting capability, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, No. 8 (4), pp. 403-408. DOI: 10.1109/84.809054.
13. *Apostolyuk V.* Theory and design of micromechanical vibratory gyroscopes. In MEMS/NEMS Handbook. Springer, 2006, pp. 173-195.
14. *Raspopov V.Ya.* Mikromekhanicheskie pribory: ucheb. posobie [Micromechanical devices: a training manual]. 2nd ed. Tula: Grif i K, 2004, 476 p.
15. *Acar C. and Shkel A.* MEMS vibratory gyroscopes—Structural approaches to improve robustness, *In MEMS Reference Shelf Series*. New York: Springer, 2009. ISBN: 978-0-387-09535-6.
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 programmnoho paketa MatLab [Development of behavioral model of linear acceleration sensor with two axes of sensitivity for Simulink simulation software package MatLab], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2014, No. 4.
17. *Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V.* Inzhenernyy analiz v Ansys Workbench: ucheb. posobie [Engineering analysis in Ansys Workbench: tutorial]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2013, 149 p.

18. *Leont'ev N.V.* Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach modal'nogo i garmonicheskogo analiza [Application of ANSYS to solving problems of modal and harmonic analysis]. Nizhniy Novgorod, 2006, 101 p.
19. *Kulikova I.V., Lysenko I.E., Pristupchik N.K., Naumenko D.V.* Metodika rascheta vliyaniya termouprugikh napryazheniy na dinamicheskie kharakteristiki MEMS [Method of calculating the effect of thermoelastic stresses on the dynamic characteristics of MEMS], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2015, No. 3.
20. *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: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Е.А. Рындин.

Лысенко Игорь Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: ielysenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371603; кафедра конструирования электронных средств; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

Науменко Данил Валерьевич – e-mail: danil.naumenko@gmail.com; тел.: +79508536853; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

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

Naumenko Danil Valerievich – e-mail: danil.naumenko@gmail.com; тел.: +79508536853; the department of electronic apparatuses design; graduate student.

УДК 534. 222. 2

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-152-160

В.В. Гривцов

ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СФЕРИЧЕСКИ РАСХОДЯЩИХСЯ ВОЛНАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Представлены экспериментальные исследования пространственного распределения амплитуды и фазы звукового давления волн разностной частоты нелинейных акустических излучателей. Рассмотрено влияние слабовыпуклой формы акустических излучателей, используемых в качестве преобразователей накачки параметрических антенн, на формирование структуры акустического поля волны разностной частоты (ВРЧ). На основе решения нелинейного уравнения Хохлова - Заболотской - Кузнецова, которое позволяет наиболее полно описать реальный процесс нелинейного взаимодействия акустических волн, приводится аналитическое выражение для расчета фазы звукового давления разностного сигнала на оси параметрической антенны с криволинейным преобразователем накачки. Полученное соотношение справедливо для слабозатухающих волн накачки в ближней зоне преобразователя с гауссовым законом распределения амплитуды исходных волн на его поверхности. В основу акустических измерений фазовой картины звукового поля положен метод, основанный на использовании двух идентичных приемников ультразвука. Размеры этих приемников значительно меньше исследуемой длины волны. В работе в качестве опорного сигнала использовалась огибающая исходного процесса, представляющая собой биение двух частот накачки. Такой подход в значительной мере упрощает процесс фазовых измерений. Приведены результаты измерений осевого и поперечного амплитудного и фазового распределений звукового давления разностного сигнала. Они показывают однородную структуру сформированного поля волны разностной частоты, генерируемого преобразователем накачки с расходящимся волновым фронтом. Формирование сферического волнового фронта слабовыпуклого преобразователя накачки происходит на малом расстоянии в пределах зоны дифракции. Исследования основных закономерностей формирования фазовой