

Методика расчета влияния термоупругих напряжений на динамические характеристики МЭМС

И.В. Куликова¹, И.Е. Лысенко¹, Н.К. Приступчик¹, Д.В. Науменко²

¹Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, г. Таганрог

²Южный федеральный университет, НТЦ «Техноцентр», г. Таганрог

Аннотация: В работе представлены методика расчета влияния термоупругих напряжений на динамические характеристики инерциальных микромеханических систем (МЭМС). Апробация методики была проведена на вибрационном гироскопе LL типа с электростатическим приводом в диапазоне температур от -40 до 80 °С. Показано, что термоупругие напряжения приводят к сдвигу собственных частот колебаний и изменению амплитудно-частотной характеристики системы. Методика расчета основана на последовательном решении дифференциальных уравнений теплопроводности и обобщенного закона Гука с учетом термонапряжений. Модальный анализ МЭМС и построение амплитудно-частотной характеристики выполняется с учетом преднапряжений, рассчитанных на предыдущем этапе.

Ключевые слова: микроэлектромеханическая система, микромеханический гироскоп, термоупругие напряжения, температурные погрешности, численные методы, амплитудно-частотная характеристика.

Введение

В настоящее время рынок инерциальных микроэлектромеханических систем (МЭМС) набирает все большие обороты. Инерциальные МЭМС датчики имеют не только бытовое применение, но и широко используются в промышленности и на транспорте. Интегральные технологии, применяемые при создании инерциальных систем на основе МЭМС датчиков, позволяют минимизировать размеры, энергопотребление и себестоимость. К инерциальным датчикам относятся такие устройства, как акселерометры (датчики линейных ускорений) и гироскопы (датчики угловых скоростей) [1-3]. Основной проблемой при использовании инерциальных МЭМС датчиков для целей высокоточного позиционирования является нестабильность нуля, т.е. погрешность в инфранизкочастотной области значений ускорения и угловой скорости. Большинство микромеханических гироскопов являются

гироскопами вибрационного типа, точность которых также определяется постоянством амплитуды и частоты колебаний инерциальной массы [1,3-5].

Типичный температурный диапазон работы данных сенсоров в составе систем высокоточного позиционирования лежит в пределах от -40°C до 80°C . Перегрев конструкции обуславливает сдвиг собственных частот колебаний, что приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики системы.

Для обеспечения точности работы датчиков используются средства температурной компенсации, которые в большинстве случаев включают датчик температуры и систему обработки сигнала, учитывающую и компенсирующую температурные погрешности [1, 3].

Для разработки алгоритмов температурной компенсации и оптимизации конструкции необходимо разработать методику исследования влияния температуры на динамические характеристики чувствительных элементов инерциальных МЭМС.

Методика расчета

Температурные погрешности в МЭМС, прежде всего, обусловлены термонапряжениями и деформацией конструкций под действием изменений температуры или градиента температуры. В большинстве случаев при повышении температуры элементы конструкций сенсоров будут расширяться. Если элемент конструкции может расширяться свободно, то он будет деформироваться. Однако в большинстве случаев микромеханические сенсоры представляют собой сложные конструкции из элементов, связанных между собой, изготовленных из различных материалов [6, 7]. И даже равномерный нагрев конструкции может вызвать появление термонапряжений за счет разницы коэффициентов линейного расширения различных материалов, а значит, и деформацию конструкции, что может

существенно повлиять на статические и динамические характеристики сенсора и, следовательно, на выходные параметры датчика в целом.

В настоящее время в инженерной практике широко применяется математическое моделирование, в частности, численные методы, которые позволяют проводить вычислительные эксперименты и определять оптимальные параметры конструкций [8, 9].

Задачу расчета влияния термоупругих напряжений на динамические характеристики МЭМС сенсоров можно разделить на три независимые [8, 9]:

- нахождение распределения температуры (если есть источники тепла в конструкции);

- нахождение механических напряжений и смещений под воздействием температурного поля;

- проведение динамического анализа конструкции с учетом термонапряжений и деформаций.

Для расчета температурного поля в твердых телах используется нестационарное уравнение теплопроводности, которое в операторном виде записывается следующим образом [9]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla[\mathbf{k}]\nabla T = q, \quad (1)$$

где c – удельная теплопроводность; ρ – плотность; T – температура; t – время; q – плотность мощности источника тепла;

$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} - \text{матрица коэффициентов теплопроводности.}$$

Для расчета механических напряжений и деформаций используется обобщенный закон Гука, который с учетом термонапряжений в матричном виде для декартовой системы координат будет иметь следующий вид [10];

$$\{\varepsilon\} = [\mathbf{D}]^{-1} \{\sigma\} + \{\alpha\} \Delta T, \quad (2)$$

где $\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}]^T$ – вектор деформаций; $\{\sigma\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}]^T$ – вектор напряжений; $\Delta T = T - T_0$ – изменение температуры относительно эталонной температуры T_0 ; $\{\alpha\} = [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, \alpha_{xy}, \alpha_{yz}, \alpha_{xz}]^T$ – вектор коэффициентов теплового расширения;

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad \text{– матрица податливости}$$

для анизотропного материала; E_x, E_y, E_z – модули Юнга по соответствующим осям координат; $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}, \nu_{zx}, \nu_{yz}, \nu_{zy}$ – коэффициенты Пуассона; G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} – модули сдвига.

Коэффициенты Пуассона для анизотропного материала отличаются в каждом из направлений (x, y, z). Тем не менее, симметрия тензоров напряжений и деформаций накладывает ограничения, и не все шесть коэффициентов Пуассона в уравнении являются независимыми. Есть только девять независимых свойств материала; три модуля Юнга, три модуля сдвига, и три коэффициента Пуассона. Остальные три коэффициента Пуассона могут быть получены из соотношений [10]:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_y} = \frac{\nu_{yx}}{E_x}, \quad \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x}, \quad \frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y}.$$

Уравнения теплопроводности (1) и обобщенный закон Гука (2) не могут быть решены аналитически для сложных трехмерных объектов. Метод конечных элементов позволяет решить данные задачи для геометрии любой сложности с учетом различных граничных условий [8, 9, 11]. В настоящее время разработано большое количество систем конечно-элементного анализа, которые решают данные уравнения для различных геометрических объектов

и материалов. Для решения поставленной задачи была использована система инженерного анализа ANSYS Workbench [12].

В качестве тестовой структуры был выбран вибрационный гироскоп LL-типа с электростатическим приводом и емкостным сенсором, изготовленным по технологии КНИ с толщиной рабочего слоя 50 мкм [3], конструкция которого представлена на рис. 1 [6]. На рис. 2 приведены зависимости амплитудно-частотных характеристик сенсора от температуры.

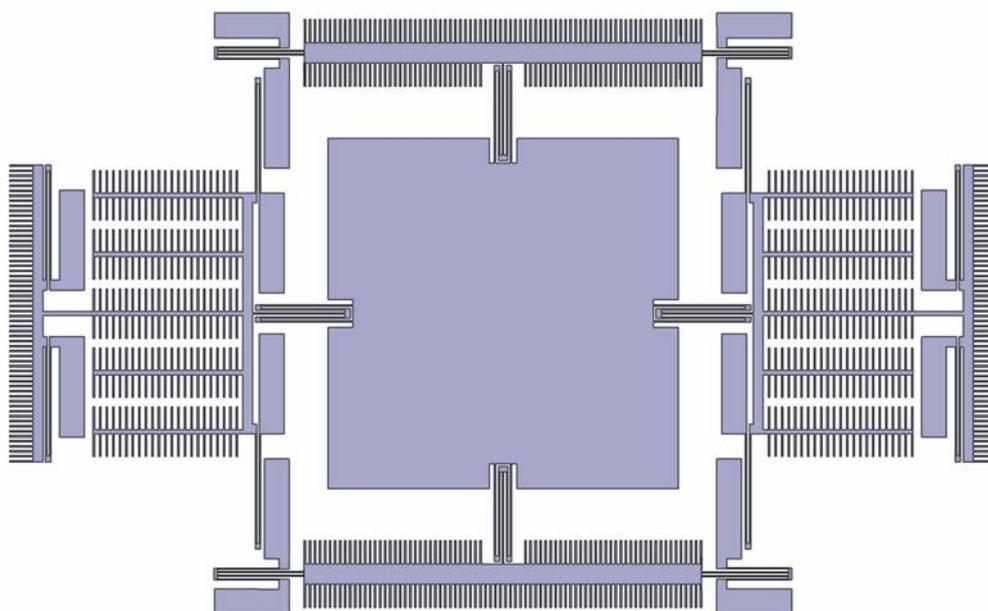


Рис. 1. – Подвижная часть чувствительного элемента гироскопа

На рис. 3 приведены зависимости изменения собственной частоты колебаний первой и второй мод тестовой структуры от изменения температуры. На рис. 4 представлена зависимость разницы собственной частоты в режиме движения и в режиме чувствительности от температуры, которую так же называют полосой пропускания микрогироскопа.

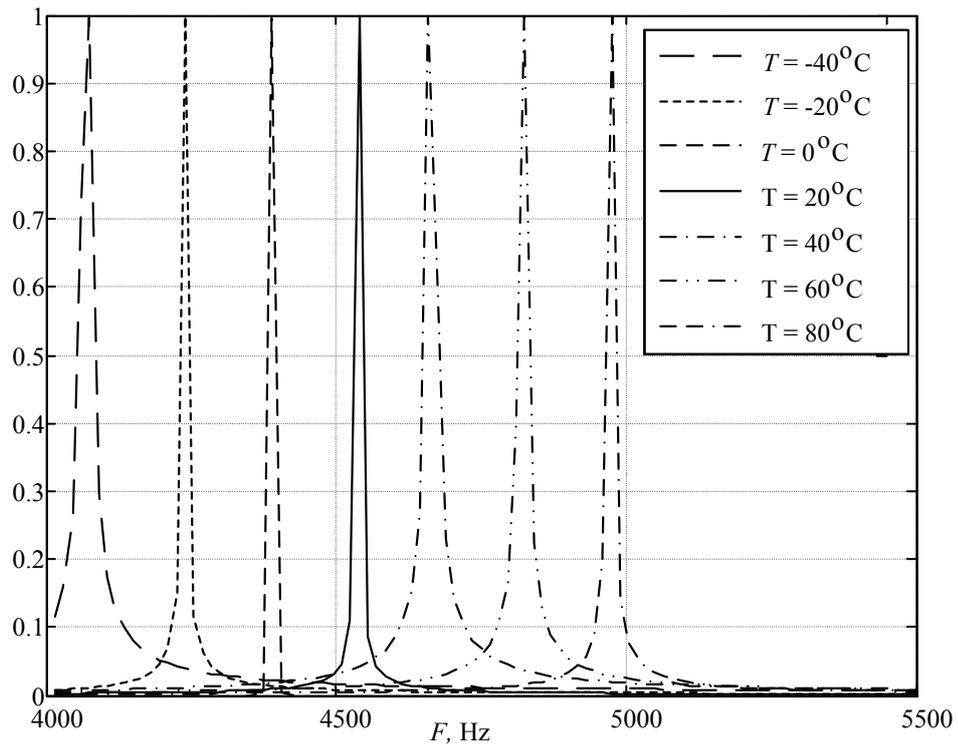


Рис. 2. – Амплитудно-частотные характеристики гироскопа при различной температуре

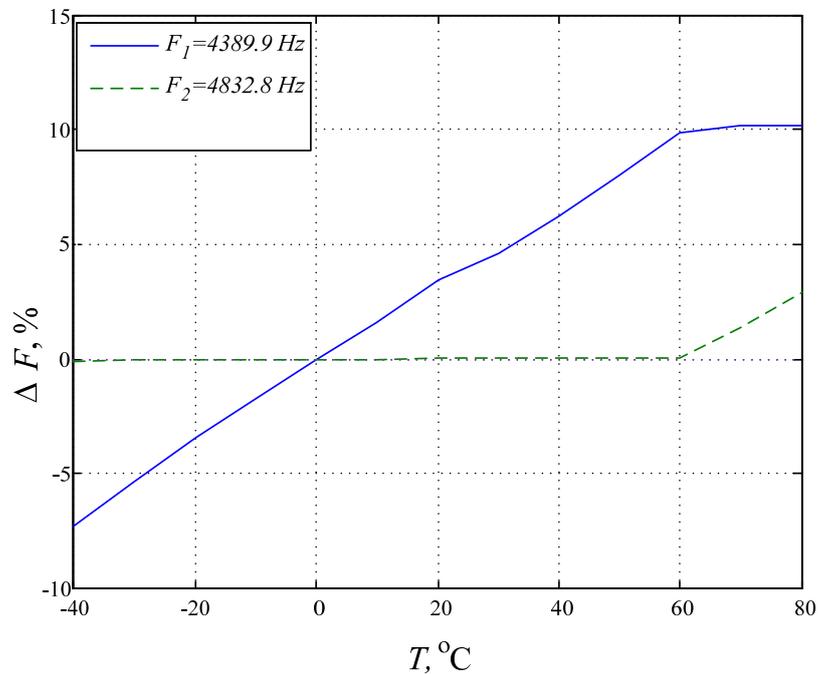


Рис. 3. – Зависимость изменения собственных частот колебаний чувствительного элемента от температуры

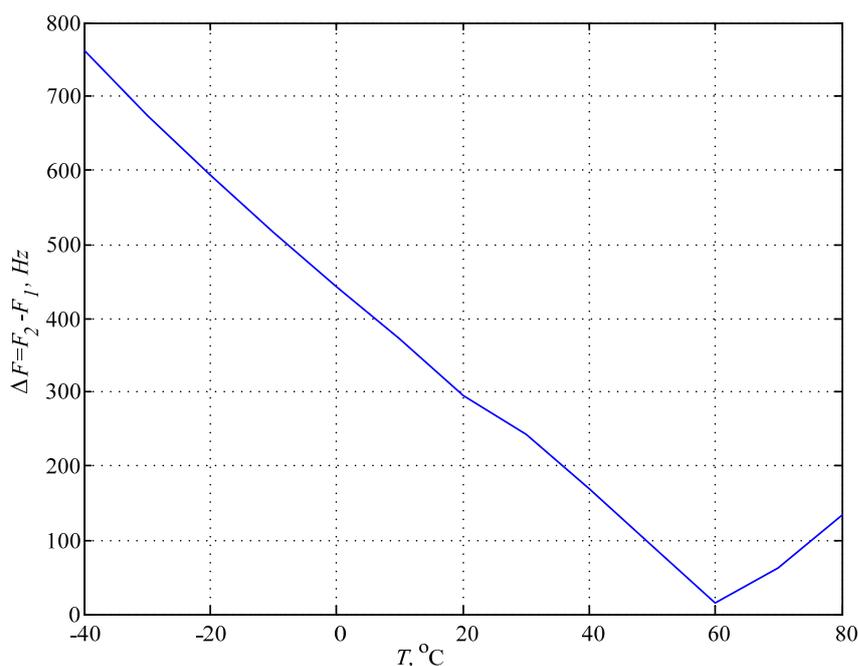


Рис. 4. – Зависимость полосы пропускания гироскопа от температуры

Заключение

В работе были проведены исследования влияния термоупругих напряжений, возникающих в функциональных элементах МЭМС вследствие перегрева, на собственные формы и частоты колебаний по разработанной методике. Показано, что термоупругие напряжения могут изменять динамические характеристики. Перегрев конструкции, с одной стороны, обуславливает сдвиг собственных частот колебаний, что приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики системы, а с другой – может стать причиной изменения собственных форм колебаний.

Предложенная методика заключается в том, что на первом этапе рассчитывается распределение температуры в конструкции, обусловленное наличием источников тепла; на втором этапе выполняется расчет механических напряжений и деформации конструктивных элементов под действием температурного поля; на третьем этапе выполняется модальный анализ преднапряженной конструкции МЭМС и построение амплитудно-частотной характеристики. Данная методика может быть использована в ходе

разработки инерциальных МЭМС для систем высокоточного позиционирования, функциональные элементы которых испытывают малые деформации в процессе эксплуатации, а также для разработки алгоритмов температурной компенсации. В дальнейшем предполагается провести исследование влияния термоупругих напряжений, вызванных неравномерностью температурного поля, на динамические характеристики МЭМС, а также влияние температуры на вязкое и конструкционное демпфирование.

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 ФГАОУ ВПО ЮФУ.

Литература

1. Stephen D. Senturia. *Microsystem design*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 689 p.
2. Cenk Acar and Andrei M. Shkel. Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement // *J. Micromech. Microeng.*, 15(2005), pp. 1092–1101, doi:10.1088/0960-1317/15/5/028
3. Распопов В.Я. *Микромеханические приборы*. М.: Машиностроение. 2007. – 400 с.
4. Said Emre Alper, Kivanc Azgin, Tayfun Akin. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure // *Sensors and Actuators A*, 135 (2007), pp. 34–42.

5. Dunzhu Xia, Cheng Yu and Lun Kong. The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology // *Sensors*, 2014, 14, pp. 1394-1473, doi:10.3390/s140101394.

6. 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.

7. Лысенко И.Е. Моделирование интегрированного внутреннего упругого подвеса микромеханического устройства // *Инженерный вестник Дона*, 2010, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/223.

8. Рындин Е.А., Рыжук Р.В., Исаева А.С. Математическая модель механических напряжений, инициированных лазерным импульсом // *Фундаментальные исследования*, 2012, №.11. С.609 – 614.

9. Малюков С.П., Куликова И.В., Калашников Г.В., Приступчик Н.К. Исследование влияния режимов работы Nd:YAG лазера на напряженно-деформированные состояния в обрабатываемой полупроводниковой структуре // *Инженерный вестник Дона*, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2000.

10. Ван Цза-Де. Прикладная теория упругости. М: Изд-во Физ.-мат. лит., 1959. – 406 с.

11. Ryndin E.A., Isaeva A.S. Numerical modeling of thermomechanical stresses generated in a thin film under laser-pulse action // *Journal of Russian Laser Research*, 2014. Vol. 35, No 4. P. 325 – 331.

12. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в Ansys Workbench: учеб. пособ. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

References

1. Stephen D. Senturia. *Microsystem design*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 689 p.

2. Cenk Acar and Andrei M. Shkel. Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement. *J. Micromech. Microeng.*, 15(2005), pp. 1092–1101, doi:10.1088/0960-1317/15/5/028
 3. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]*. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 400 p.
 4. Said Emre Alper, Kivanc Azgin, Tayfun Akin. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. *Sensors and Actuators A*, 135 (2007), pp. 34–42.
 5. Dunzhu Xia, Cheng Yu and Lun Kong. The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology. *Sensors*, 2014, 14, pp. 1394-1473, doi:10.3390/s140101394.
 6. Konoplev B.G., Lysenko I.E., Sherova E.V. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2010, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/240.
 7. Lysenko I.E. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2010, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/223.
 8. Ryndin E.A., Ryzhuk R.V., Isaeva A.S. *Fundamentalnie issledovania (Fundamental research)*, 2012, №.11, pp. 609 – 614.
 9. Malyukov S.P., Kulikova I.V., Kalashnikov G.V., Pristupchik N.K. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2000.
 10. Van Tszs-De. *Prikladnaya teoriya uprugosti [Applied theory of elasticity]*. Moscow, Fiz.-mat. lit., 1959. 406 p.
 11. Ryndin E.A., Isaeva A.S. Numerical modeling of thermomechanical stresses generated in a thin film under laser-pulse action. *Journal of Russian Laser Research*, 2014. Vol. 35, No 4. P. 325 – 331.
 12. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. *Inzhenernyy analiz v Ansys Workbench: ucheb. posob [Engineering analysis in Ansys Workbench: tutorial]*. Samara: SamSTU, 2013. 149 p.
-