УДК 531.383 – 11:531.714

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Нестеренко Т.Г.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, e-mail: ntg@tpu.ru

Проведён анализ влияния температуры на микроэлектромеханические системы. Микроакселерометры, микрогироскопы и микрорезонаторы могут быть представлены обобщённой схемой осциллятора с электростатическими и упругими силами. При изменении температуры изменяются линейные размеры конструкции, изменяется модуль упругости кремния, в конструкции возникают внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма. Это приводит к изменению частотных свойств чувствительного элемента. Методом конечных элементов проведён модальный и температурный анализ нескольких конструкций осцилляторов, для которых определены формы колебаний, имеющие наименьшую и наибольшую чувствительность к изменению температуры. Осцилляторы с наибольшей температурной чувствительностью могут использоваться в качестве встроенных в микросистему датчиков температуры. Для микрогироскопов, микроакселерометров и микрорезонаторов выбраны формы колебаний, имеющие наименьшую температурную чувствительность.

Ключевые слова: микрогироскоп, микроакселерометр, микрорезонатор, осциллятор, модальный и температурный анализы, формы колебаний

THERMAL SENSITIVITY OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Nesterenko T.G.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: ntg@tpu.ru

The analysis of the effect of changing temperature on microelectromechanical systems is carried out. The generalized scheme of the oscillator with electrostatic and flexible forces is introduced. This scheme can represent microaccelerometers, microgyroscopes and microcavities. Changing of the linear dimensions of the construction is due to changes in temperature. Changing the temperature can be a reason of varying of the modulus of silicon elasticity, origination of the internal mechanical stresses in the construction and violation of the geometrical shape. All of these lead to changes of frequency characteristics of the sensor. Using the finite element method and computer methods of calculation the thermal and modal analysis were carried out for several oscillators constructions. The wave modes which have the lowest and the highest sensitivity to changes in temperature were determined for these constructions. The oscillators which have the greatest temperature sensitivity can be used as built-in temperature sensors for microsystem. For the microgyroscopes, microaccelerometers and microcavities the wave modes which have the lowest temperature sensitivity were chosen.

Keywords: microgyroscope, microaccelerometer, microcavity, oscillator, modal and thermal analysis, wave modes

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – одно из наиболее перспективных направлений в современной электронике. Технология МЭМС позволяет методами, близкими к технологии производства микросхем, получать в интегральном процессе системы с электрическими, электронными, механическими, оптическими и электрохимическими свойствами и размерами, сравнимыми с обычными интегральными схемами. МЭМС-устройства находят широчайшее применение в потребительской и специальной электронике, системах безопасности автомобилей, навигации, медицине, средствах мониторинга и неразрушающего контроля и многих других областях.

Проникновение датчиков во все сферы жизни во многом произошло благодаря технологии МЭМС, которая наконец стала массовой и недорогой. Применение решений с одновременной обработкой показаний датчиков различного типа позволяет улучшать устройства потребительской электроники.

Бурное развитие МЭМС-датчиков обусловлено их существенными достоинствами [1, 2], такими как малый разброс параметров в пределах изделия; высокая технологичность и повторяемость; микроминиатюрность; высокая функциональность; высокая надежность и стойкость к внешним воздействиям из-за их малых габаритов; низкая стоимость.

Наиболее распространёнными микроэлектромеханическими системами являются микроакселерометры, микрогироскопы и микрорезонаторы. Для производства микроакселерометров и микрогироскопов используют идентичные кремниевые структуры, разница заключается в управлении. Микрорезонаторы могут применяться в качестве задающего элемента в генераторах схемотехники для формирования колебаний со стабильной частотой.

Температурный анализ

Микроэлектромеханические датчики должны работать в широком температурном диапазоне. Под влиянием температуры возникают изменения линейных размеров конструкции, изменяется модуль упругости кремния, в конструкции возникают внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма. Всё это повлечет за собой изменение частотных свойств МЭМС.

Микроакселерометры, микрогироскопы и микрорезонаторы представляют собой колебательные системы (осцилляторы) [4] с электростатическими силами, эквивалентная обобщённая схема которых изображена на рис. 1.

сила вычисляется как производная от функции ёмкости

$$f_i^{э} = \frac{1}{2}\sum_r \frac{\partial C_{k\ell}}{\partial q_i}\left(V_k - V_\ell\right)^2,$$

где V_k, V_ℓ – соответственно электрические потенциалы на обкладках k и ℓ; $r = n(n-1)/2$ – число емкостей n-электродной системы.

При использовании осциллятора в качестве датчика температуры его характеристики должны максимально изменяться при изменении температуры. При использовании же осциллятора в качестве сенсора гироскопа, акселерометра, задающего элемента генератора его характеристики должны минимально реагировать на изменение температуры [4, 5, 6].

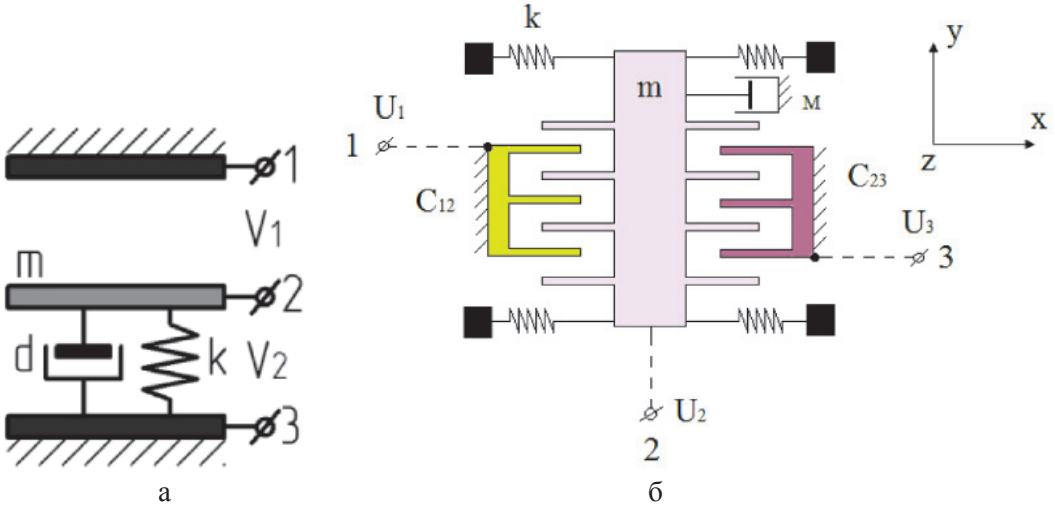


Рис. 1. Эквивалентные схемы сенсоров микросистемы:
а – осциллятор с планарными электродами; б – осциллятор с гребенчатыми электродами

Динамическое уравнение, описывающее осциллятор, возбуждаемый электростатическими силами, в модальных координатах для i-й моды, имеет вид

$$m_i\ddot{q}_i + d_i\dot{q}_i + f_i^{у} = f_i^{э}, \qquad (1)$$

где m_i – модальная масса; d_i – модальный коэффициент демпфирования; q_i – модальные амплитуды (смещение i-моды).

При приложении между электродами электрического напряжения возникают электростатическая сила притяжения $f_i^{э}$ и компенсирующая её сила упругости $f_i^{у}$. Сила упругости определяется как

$$f_i^{у} = \frac{\partial \Pi_i}{\partial q_i},$$

где Π_i – энергия деформации упругого элемента системы. Электростатическая

Поэтому температурный анализ является важным типом анализа с целью выявления собственных частот, на которые оказывает наибольшее влияние данный тип нагрузки.

Разработка и исследование осцилляторов связаны с решением задач математической физики, к которым относятся задачи теплопроводности, задачи о деформациях твердых тел и взаимосвязанные задачи. Нахождение точного аналитического решения возможно лишь для весьма ограниченного круга одномерных задач и при использовании целого ряда допущений.

С большей точностью анализ систем с распределёнными параметрами, к которым относятся микромеханические конструкции, осуществляется методами конечных элементов с применением компьютерных методов расчёта.

На первом этапе для оценки динамического поведения осциллятора применяется модальный анализ. Рассмотрим МЭМС-осцилляторы различных форм, которые могут быть использованы для моделирования сенсоров датчиков (микрогироскопов, микроакселерометров, микрорезонаторов, датчиков температуры).

Разработка конструкций и модальный анализ микроосцилляторов производились в Ansys/Multiphysics. Геометрические размеры микроосцилляторов подбирались таким образом, чтобы частоты первых форм их колебаний были близки друг к другу. В таблице 1 представлены различные типы микроосцилляторов, каждый из которых состоит из подвижной массы 2, закрепленной в неподвижном основании 1. Возбуждение колебаний подвижной массы производится за счет электростатического привода 3, который может быть гребенчатым (резонаторы 2, 3, 4 и 5 типа) или планарным (первый тип осциллятора).

Построение сетки конечных элементов производится на основе 2D профиля, затем вытягивается в объеме на нужную высоту 50 мкм методом протягивания (sweep), материал осцилляторов – монокристаллический кремний. Решение производилось для первых десяти собственных частот колебаний. В табл. 2–7 представлены результаты расчетов для шести типов микроосцилляторов.

Таблица 1

Типы конструкций микроосцилляторов

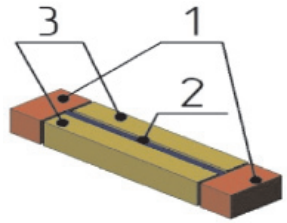
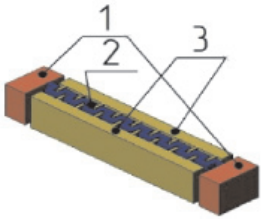
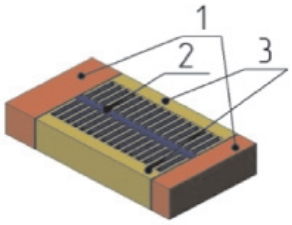
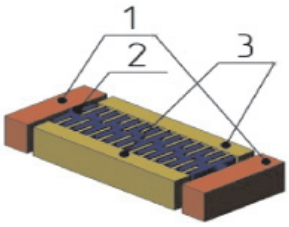
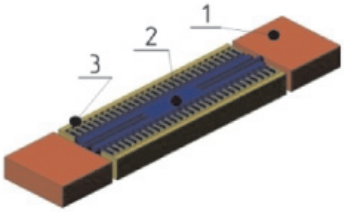
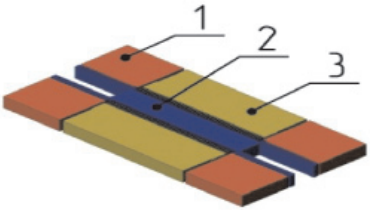
 Первый тип	 Второй тип	 Третий тип
 Четвертый тип	 Пятый тип	 Шестой тип

Таблица 2

Формы колебаний первого осциллятора

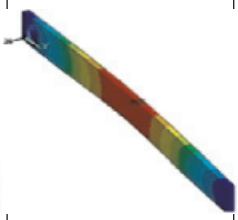
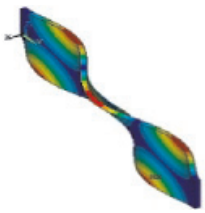
f1 = 506028 Гц	f2 = 1392648 Гц	f3 = 1904770 Гц	f4 = 2724254 Гц	f5 = 3890124 Гц
f6 = 4490976 Гц	 f7 = 5313460 Гц	 f8 = 6029301 Гц	f9 = 6686511 Гц	f10 = 8382847 Гц

Таблица 3

Формы колебаний второго осциллятора

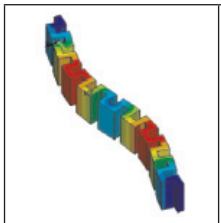
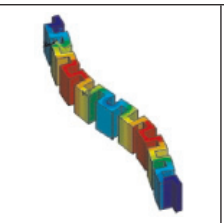
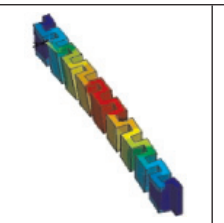
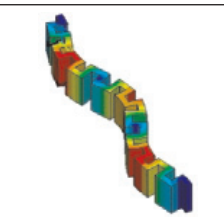
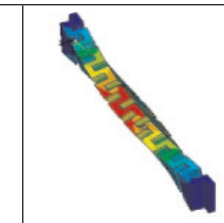
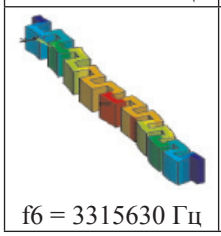
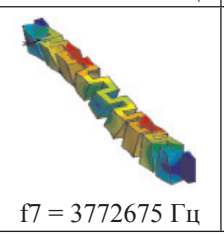
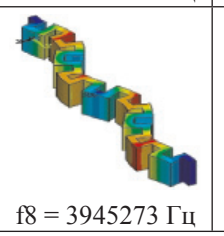
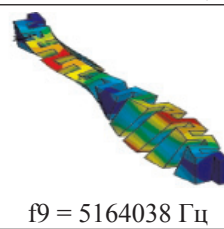
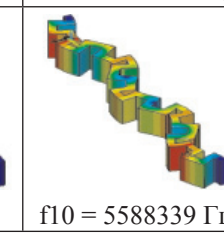
 f1 = 463038 Гц	 f2 = 1259206 Гц	 f3 = 1527312 Гц	 f4 = 2425469 Гц	 f5 = 2584409 Гц
 f6 = 3315630 Гц	 f7 = 3772675 Гц	 f8 = 3945273 Гц	 f9 = 5164038 Гц	 f10 = 5588339 Гц

Таблица 4

Формы колебаний третьего осциллятора

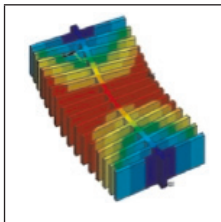
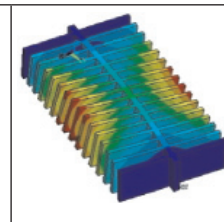
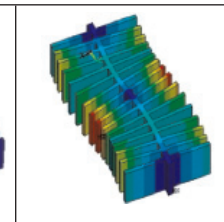
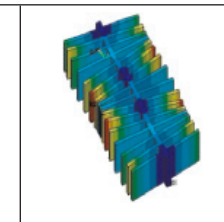
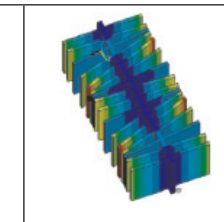
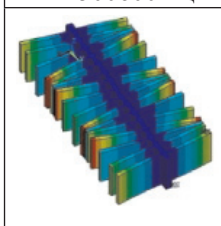
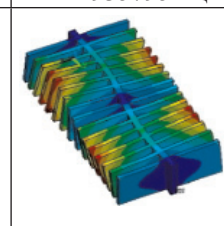
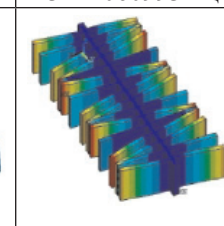
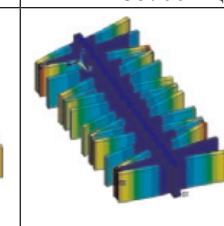
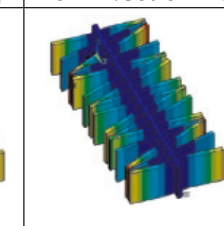
 f1=500600 Гц	 f2 = 935795 Гц	 f3 = 1060993 Гц	 f4 = 1486700 Гц	 f5 = 1735982 Гц
 f6 = 1887942 Гц	 f7 = 1895139 Гц	 f8 = 1983724 Гц	 f9 = 2048977 Гц	 f10 = 2093961 Гц

Таблица 5

Формы колебаний четвертого осциллятора

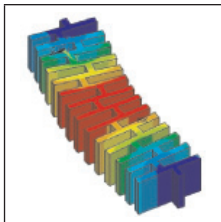
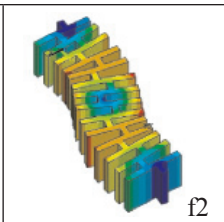
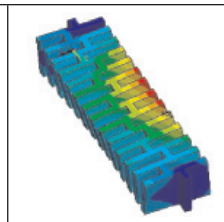
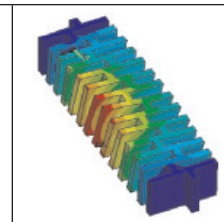
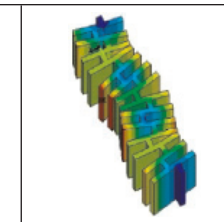
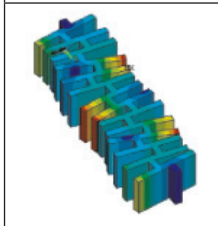
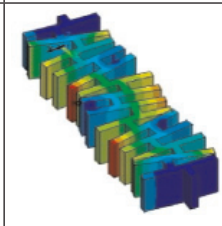
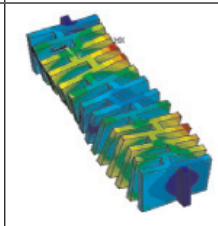
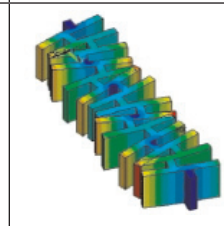
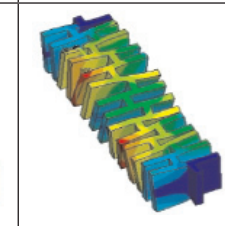
 f1 = 487168 Гц	 f2 =1222133 Гц	 f3 = 1848182 Гц	 f4 = 2061949 Гц	 f5 = 2136705 Гц
 f6 = 2938209 Гц	 f7 = 3267291 Гц	 f8 = 3788366 Гц	 f9 = 3976099 Гц	 f10 = 4554783 Гц

Таблица 6

Формы колебаний пятого осциллятора

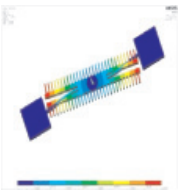
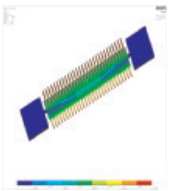
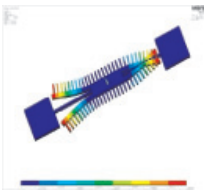
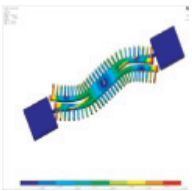
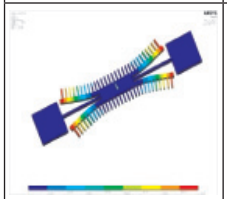
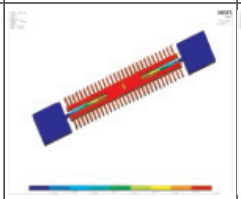
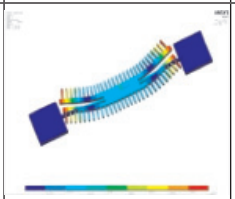
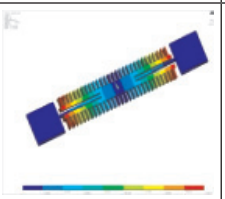
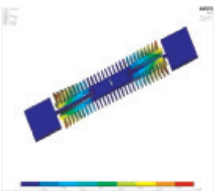
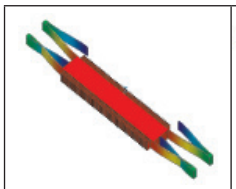
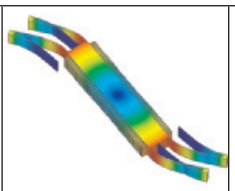
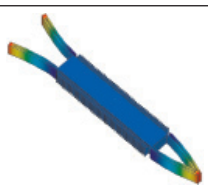
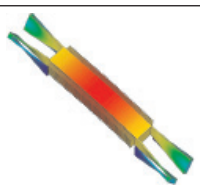
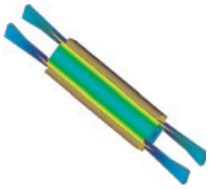
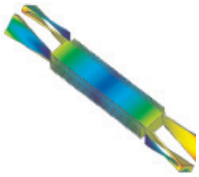
				
f1=100146 Гц	f2 = 128119 Гц	f3 = 227283 Гц	f4 = 565733 Гц	f9=1,28E+07 Гц
				
f5 = 566228 Гц	f6 = 674790 Гц	f7 = 692992 Гц	f8 = 866070 Гц	F10=1,84E+07 Гц

Таблица 7

Формы колебаний шестого осциллятора

				
f1=39327,3 Гц	f2=141253 Гц	f3=152637 Гц	f4=229625 Гц	f5=263173 Гц
				
f6=264618 Гц	f7=267568 Гц	f8=369156 Гц	f9=559801 Гц	f10=581361 Гц

В осцилляторе микроакселерометра и микрогироскопа рабочей является первая форма колебаний [3], частоты всех остальных форм должны быть больше, что и было выполнено при создании их геометрии. Результаты температурного анализа передаются в частотный анализ и определяются частоты десяти форм колебаний осцилляторов при заданных температурах окружающей среды.

На рис. 2–7 представлены результаты температурного анализа осцилляторов – относительные изменения частоты для каждой моды колебаний.

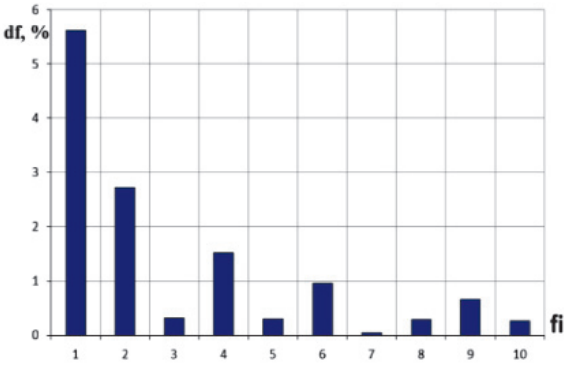


Рис. 2. Относительные изменения частот первого осциллятора

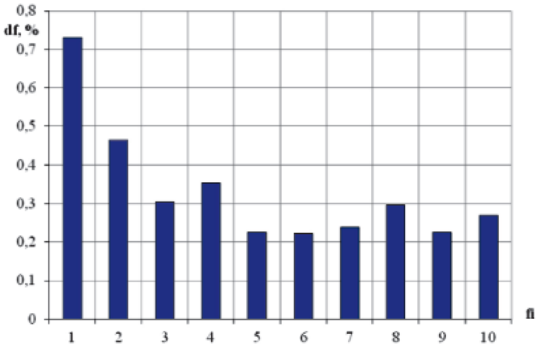


Рис. 3. Относительные изменения частот второго осциллятора

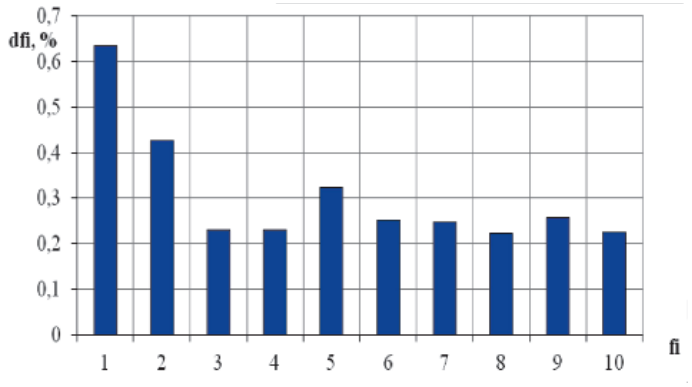


Рис. 4. Относительные изменения частот третьего осциллятора

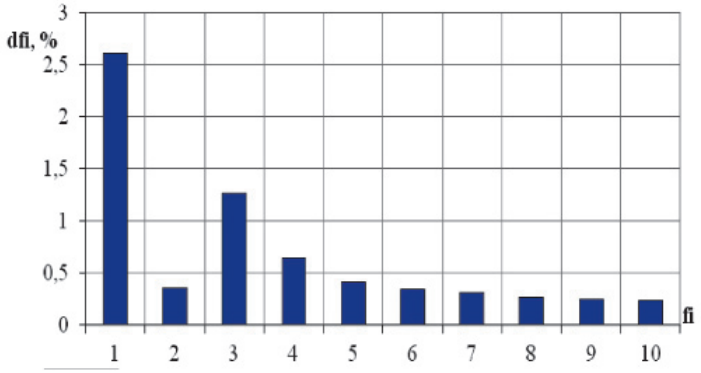


Рис. 5. Относительные изменения частот четвертого осциллятора

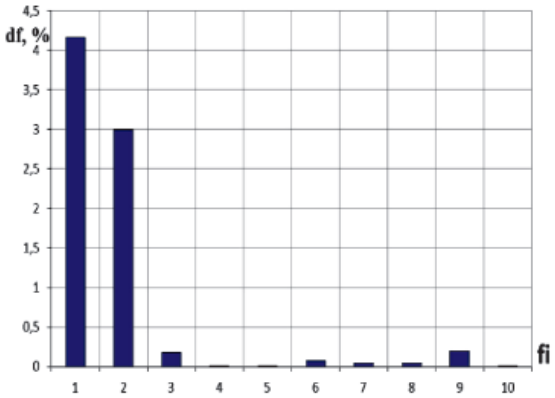


Рис. 6. Относительные изменения частот пятого осциллятора

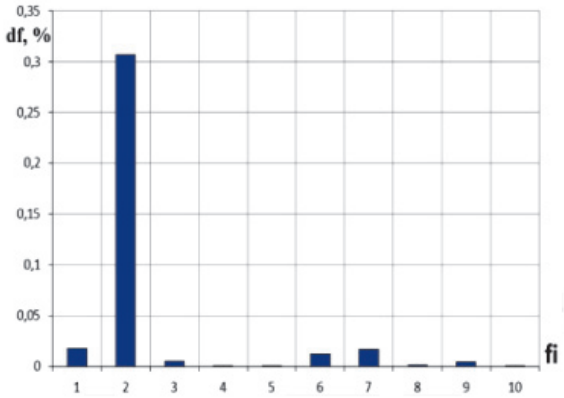


Рис. 7. Относительные изменения частот шестого осциллятора

Заключение и выводы

Для первого осциллятора наибольшей температурной чувствительностью обладает первая форма его колебаний, которая является рабочей в режиме датчика температуры. Седьмая форма колебаний осциллятора имеет минимальную чувствительность к изменению температуры и является рабочей при использовании осциллятора в генераторах.

Наименее чувствительны к изменению температуры 2, 3 и 6-й осцилляторы, которые могут использоваться в качестве сенсоров микрогироскопов, микроакселерометров и микрогироскопов. Наибольшую чувствительность к изменению температуры имеют осцилляторы первого и пятого типов, которые будут использоваться в качестве датчика температуры в многокомпонентной системе (рис. 8, 9).

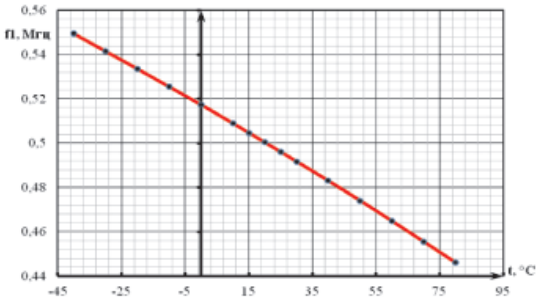


Рис. 8. Температурная зависимость частоты f1 осциллятора первого типа

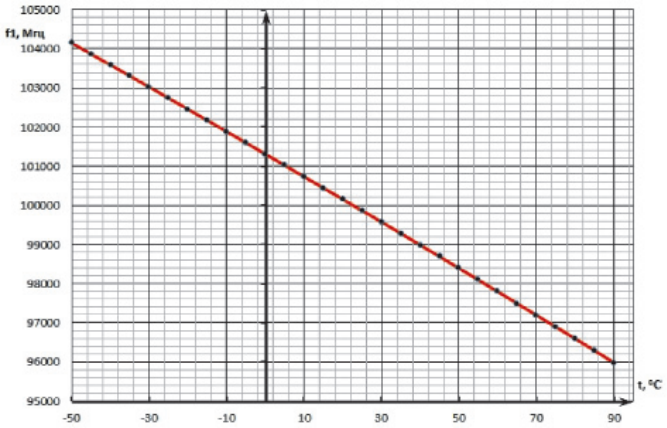


Рис. 9. Температурная зависимость частоты f1 осциллятора пятого типа

Зависимость изменения частоты первой формы колебаний осцилляторов датчиков температуры имеет линейный характер.

Работа выполнена в Томском политехническом университете при финансовой поддержке Минобрнауки России, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.575.21.0068, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57514X0068.

Список литературы

1. Евстигнеев М.И., Смирнова М.Ф., Унтилов А.А. Анализ механических, электрических и тепловых характеристик при проектировании микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением: сб. докладов III научно-технической конференции молодых ученых 12–14 марта 2002 г.). – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 142–148.

2. Нестеренко Т.Г., Пересветов М.В., Коледа А.Н., Колчужин В.А. Электродная структура микромеханического гироскопа // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 7. – С. 62–66.

3. Попова И.В., Лестев А.М., Семенов А.А., Пятышев Е.Н., Лурье М.С., Иванов В.А., Шабров А.А. Микромеханические датчики и системы, практические результаты и перспективы развития // XII Международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2005. – С. 262–267.

4. Fang J.C., Li J.L., Sheng W.J. Improved temperature error model of silicon MEMS gyroscope with inside frame driving // Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut. – 2006. – P. 1277–1280.

5. Dunzhu Xia. Microgyroscope Temperature Effects and Compensation-Control Methods / Shuling Chen, Shourong Wang and Hongsheng Li // Sensors Journal. – 2009. – № 9. – P. 8349–8376.

6. Sheng-Ren Chiu. An Integrated Thermal Compensation System for MEMS Inertial Sensors / Li-Tao Teng, Jen-Wei Chao, Chung-Yang Sue, Chih-Hsiou Lin, Hong-Ren Chen and Yan-Kuin Su. – Sensors Journal. – 2014. – № 14. – P. 4290–4311.

References

1. Evstigneev M.I., Smirnova M.F., Untilov A.A. Analiz mehanicheskih, jelektricheskih i teplovyh harakteristik pri proektirovanii mikromehanicheskogo giroskopa. Navigacija i upravlenie dvizheniem (sb. dokladov III nauchno-tehnicheskoj konferencii molodyh uchenyh, 12-14 marta 2002g.). S.-Peterburg, CNII «Jelektropribor», 2002. pp. 142–148.

2. Nesterenko T.G., Peresvetov M.V., Koleda A.N., Kolchuzhin V.A. Jelektrodnaja struktura mikromehanicheskogo giroskopa. Promyshlennye ASU i kontrollery. 2012, no. 7, pp. 62–66.

3. Popova I.V., Lestev A.M., Semenov A.A., Pjatyshev E.N., Lure M.S., Ivanov V.A., Shabrov A.A. Mikromehanicheskie datchiki i sistemy, prakticheskie rezultaty i perspektivy razvitija. HII Mezhdunarodnaja konferencija po integrirovannym navigacionnym sistemam. S.-Pb. 2005, pp. 262–267.

4. Fang J.C., Li J.L.; Sheng W. J. Improved temperature error model of silicon MEMS gyroscope with inside frame driving. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut. 2006, *pp*. 1277–1280.

5. Dunzhu Xia., Shuling Chen, Shourong Wang and Hongsheng Li Microgyroscope Temperature Effects and Compensation-Control Methods. Sensors Journal. no. 9, 2009, *pp*. 8349–8376.

6. Sheng-Ren Chiu., Li-Tao Teng, Jen-Wei Chao, Chung-Yang Sue, Chih-Hsiou Lin, Hong-Ren Chen and Yan-Kuin Su. An Integrated Thermal Compensation System for MEMS Inertial Sensors. Sensors Journal, no. 14. 2014, *pp*. 4290–4311.

Рецензенты:

Дмитриев В.С., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;

Бориков В.Н., д.т.н., директор Института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 01.04.2015.