

ТРЕХОСЕВОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Барбин Е.С., Коледа А.Н., Нестеренко Т.Г., Вторушин С.Е.
Томский политехнический университет

Перспективы современного приборостроения связаны с разработкой приборов, обладающих малыми массой, габаритами, низкими себестоимостью, энергопотреблением и достаточно высокой надёжностью. Этим требованиям соответствуют микроэлектромеханические сенсоры (МЭМС), основными преимуществами которых являются микроминиатюрность, высокая функциональность, малое энергопотребление, низкая стоимость и массовость. Рынок МЭМС стремительно растет, ежегодный прирост потребности мирового рынка в МЭМС датчиках составляет 14-20 % (Рис. 1) [1].

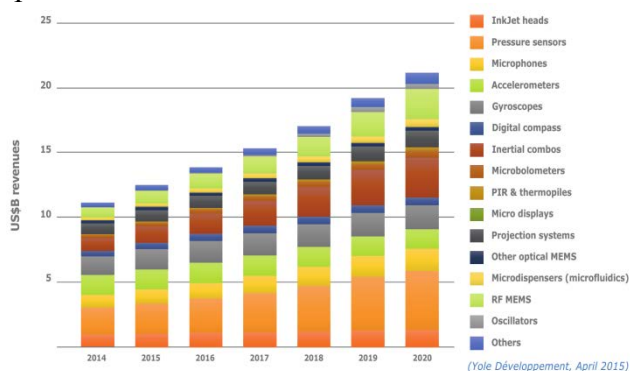


Рис. 1. Прогноз мирового рынка МЭМС

Увеличение срока службы строительных сооружений а также повышение условий безопасности жизнедеятельности является на сегодняшний день мировой тенденцией. В данном направлении огромную роль играет развитие систем безопасности и непрерывного мониторинга зданий, мостов, железнодорожных путей. МЭМС-сейсмодатчики применяются за рубежом в качестве систем охраны железнодорожного полотна. На замену типовому патрулированию приходят интеллектуальные системы мониторинга. В случае попытки подкопать полотно и установить там подрывной заряд срабатывает сигнал тревоги на пульте дежурного [2].

В связи с вступлением в силу в 2011г. в России нового национального стандарта по обследованию зданий и сооружений возникает необходимость мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Контроль характеристик, таких как вибрация, деформация, отклонение и т.д. с удобной для пользователя периодичностью возможен с использованием беспроводных сенсорных сетей мониторинга технического состояния объектов. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – это распределённая, самоорганизующаяся сеть множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединённых между собой радиоканалом, предназначенных для отслеживания физических характеристик объекта и (или) условий окружающей среды. За счёт ретрансляции сообщений от одного элемента к другому область покрытия подобной сети может достигать нескольких километров. Система мониторинга предполагает установку различных типов датчиков на элементах конструкций зданий и сооружений с целью определения физического (влажность и температура) и силового (статическая и динамическая нагрузка) на их прочность и деформируемость [3]. Следовательно, весьма перспективным направлением внедрения БСС в России является рынок мониторинга строительных конструкций и сооружений. Более того при надлежащем контроле исполнения положений законов о

диагностике технического состояния и безопасности промышленных объектов рынок применения БСС может оцениваться в миллиарды рублей [2].

Одними из сенсоров БСС выступают микромеханические акселерометр (ММА), как в составе инклинометров (для измерения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли), так и самостоятельные одно- и двух- и трехосевые единицы, где требуется измерять вибрации вдоль заданных осей объекта.

Целью данной работы является разработка конструкции трехосевого микромеханического акселерометра. Сенсор акселерометра (рис. 2) содержит наружную раму 3, установленную на подложке 12 при помощи упругого подвеса 9 и анкеров 10. Упругий подвес обеспечивает свободу перемещения рамы вместе с инерционными телами 1 и 6 вдоль оси Z. Инерционное тело 1 имеет возможность перемещаться на упругом подвесе 2 вдоль оси X. Инерционное тело 6 перемещается вдоль оси Y.

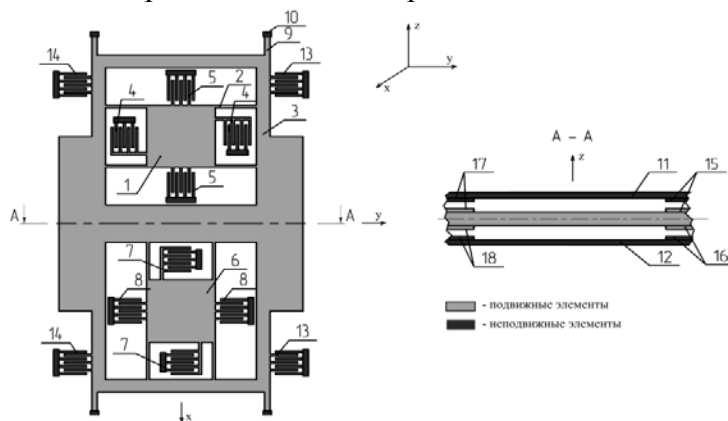


Рис. 2. Функциональная схема сенсора акселерометра

Гребенчатые электроды 4 входят в состав преобразователя механического перемещения инерционного тела 1 вдоль оси X. Это перемещение возникает при наличии ускорения вдоль оси X. Гребенчатые структуры 5 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь по оси X. Гребенчатые электроды 7 входят в состав преобразователя механического перемещения инерционного тела 6 вдоль оси Y. Это перемещение возникает при наличии ускорения вдоль оси Y. Гребенчатые структуры 8 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь по оси Y. Электроды 15, 16, 17, 18 входят в состав преобразователя механического перемещения рамы 3 вдоль оси Z. Это перемещение возникает при наличии ускорения вдоль оси Z. Гребенчатые структуры 13, 14 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь по оси Z.

Составим уравнения движения сенсора акселерометра, эквивалентная схема которого представлена на рис. 3. При выводе уравнений полагаем, что жёсткости G_z , G_x , G_y упругих подвесов сенсора по осям чувствительности намного меньше жесткостей тех же подвесов в перекрёстных направлениях. Это требование является основополагающим при проектировании сенсора. Система координат OXYZ (рис. 4) связана с корпусом, который перемещается поступательно с ускорением, имеющим проекции на оси XYZ: ax , ay , az и вращается с угловыми скоростями Ω_x , Ω_y , Ω_z . Система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ связана с инерционным телом ИТ1, $O_2X_2Y_2Z_2$ - с инерционным телом ИТ2, $O_3X_3Y_3Z_3$ - с общей рамой.

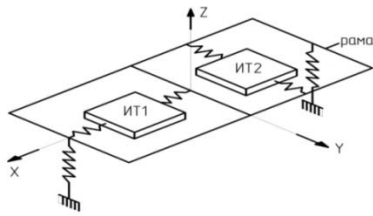


Рис. 3. Эквивалентная схема сенсора акселерометра

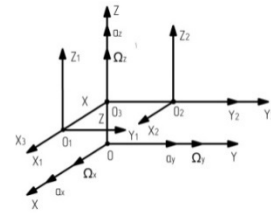


Рис. 4. Системы координат, связанные с сенсором

Уравнения движения сенсора акселерометра, полученные при помощи уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{z} + z[G_z - (m_1 + m_2 + m_3)(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)] + \mu_z \dot{z} = \\ & = (m_1 + m_2 + m_3)a_z - 2m_2\Omega_x \dot{y} + 2m_1\Omega_y \dot{x} - m_2y \cdot \Omega_z \Omega_y - m_1x\Omega_x \Omega_z \\ & m_1\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + x[G_x - m_1(\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = m_1a_x - 2m_1\Omega_y \dot{z} + m_1z\Omega_x \Omega_z \\ & m_2\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + y[G_y - m_2(\Omega_x^2 + \Omega_z^2)] = m_2a_y + 2m_2\Omega_x \dot{z} - m_2z\Omega_y \Omega_z, \end{aligned}$$

где m_1, m_2, m_3 – массы тел 1, 5 и 4 соответственно; G_z, G_x, G_y – коэффициенты жёсткости подвесов; μ_x, μ_y, μ_z – коэффициенты сил вязкого трения в направлении соответствующих обобщённых координат; a_x, a_y, a_z – ускорения поступательного движения объекта.

Собственные частоты и моды колебаний ММА представлены на рис. 5. Решение проводилось в пакете ANSYS Mechanical. Геометрические размеры микроакселерометра подбирались таким образом, чтобы собственные частоты форм колебаний по всем трём осям были близки друг к другу.

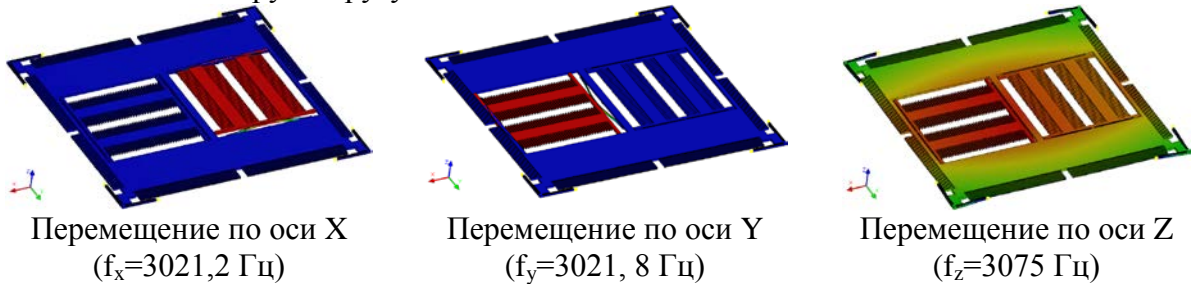


Рис. 5. Собственные частоты и моды колебаний ММА.

По результатам модального анализа находятся коэффициенты жёсткости по соответствующим осям.

$$G_i = \frac{m_i}{\omega_i^2}.$$

Микромеханические акселерометры должны выполнять свои функции при сохранении технических характеристик в широком диапазоне температур (от минус 40°C до +85°C). Главным фактором, влияющим на изменение собственных частот от температуры, является наличие внутренних напряжений вследствие расширения конструкции сенсора. Под влиянием температуры возникают изменения линейных размеров конструкции, изменяется модуль упругости кремния, в конструкции возникают внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма [4,5,6].

Исследование влияния температуры производилось в диапазоне от минус 40°C до +105°C. Изменение собственных частот приводит к изменению механического коэффициента передачи сенсоров акселерометров. На рис.6 и рис. 7 представлены результаты температурного анализа акселерометра – изменения собственных частот и относительные изменения собственных коэффициентов передачи.

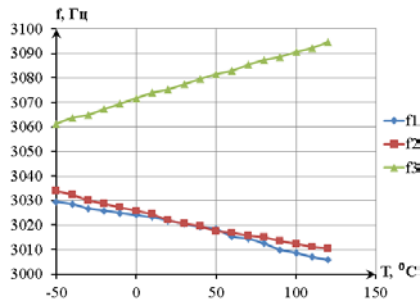


Рис. 6. Зависимость собственных частот акселерометра от температуры

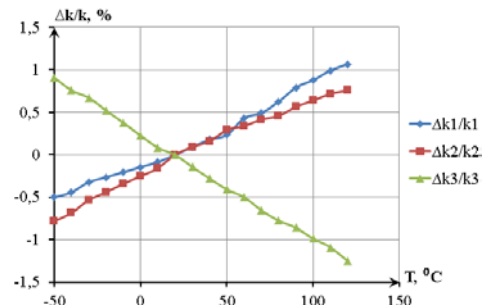


Рис. 7. Относительные изменения коэффициента передачи от температуры

Вследствие изменения геометрических размеров под действием температуры изменяются ёмкости электродных структур и вносится погрешность в снимаемый с датчика сигнал. На рис. 8 представлены ёмкости акселерометра. Пределы перемещения подвижной части сенсора ± 1 мкм. Результаты КЭ анализа зависимости ёмкостей гребенчатых структур от температуры представлены на рис. 9.

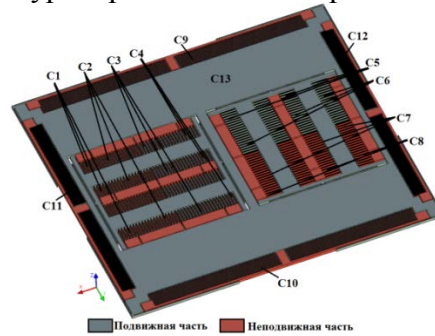


Рис. 8. Ёмкости акселерометра

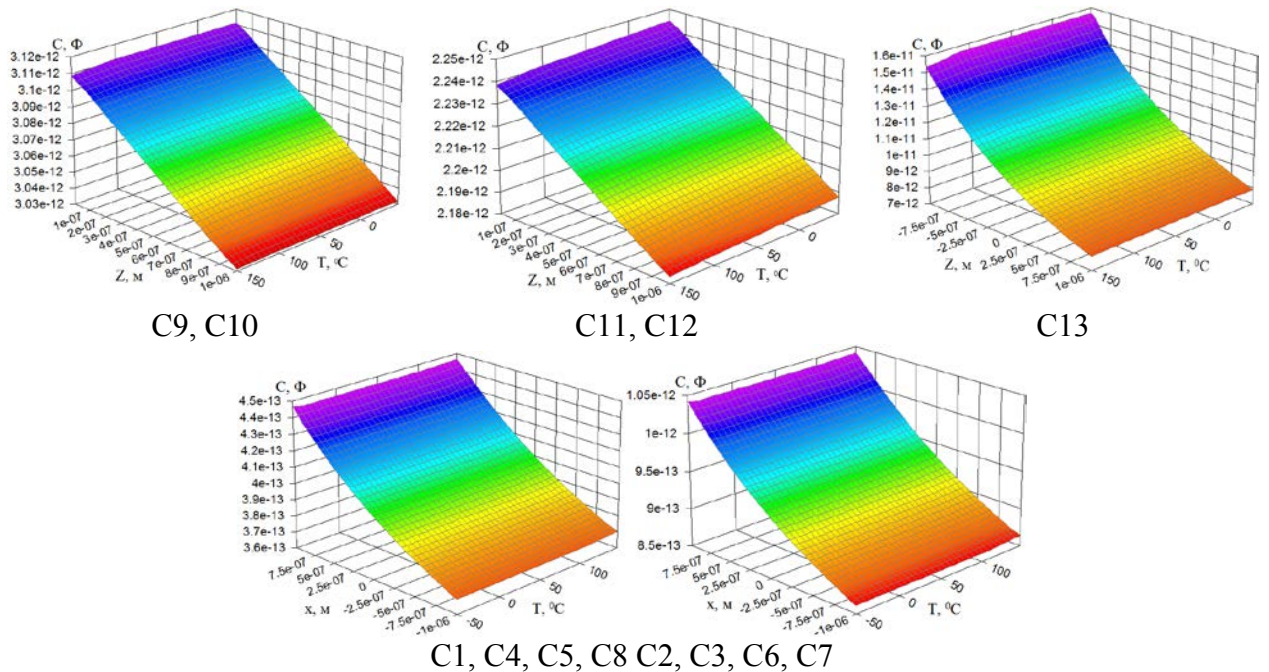


Рис. 9. Зависимости ёмкостей сенсора от температуры при перемещении до ± 1 мкм

Таким образом, максимальное изменение масштабных коэффициентов сенсора акселерометра при изменении температуры в заданном диапазоне температур лежит в пределах 1 %. Погрешности вносимые изменениями ёмкостей гребенчатых структур не

привышают 2%. Способы компенсации температурных погрешностей рассмотрены в [4,5,6].

На основании результатов модального, теплового и электростатического анализа составляется системная модель акселерометра, рис. 10.

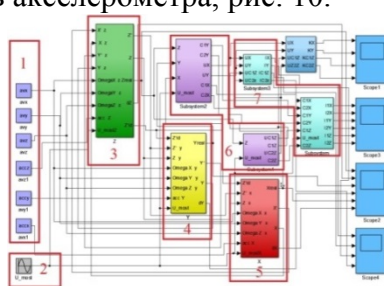


Рис. 10. Макромодель микроакселерометра в MATLAB/Simulink

На рис. 10 обозначено: 1 – источники возмущающих воздействий; 2 – источник напряжения для съёма информации с измерительных мостов; 3 – канал измерения ускорения по оси Z; 4 – канал измерения ускорения по оси Y; 5 – канал измерения ускорения по оси X; 6 – подсистема измерительного моста; 7 – подсистема расчёта выходных токов.

Расчёт вектора сил упругости производился на каждом временном шаге. Моделирование проводилось в несколько этапов, от моделирования отдельных частей к моделированию всей системы. Было проведено моделирование идеальной системы, график изменения выходного напряжения в зависимости от ускорения показан на рис. 11. График перемещения рамок при синусоидальном воздействии ускорения показан на рис. 12.

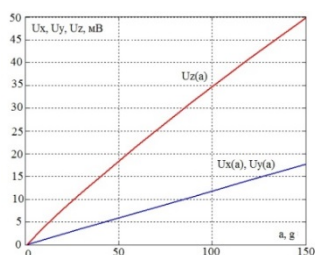


Рис. 11. Зависимость выходного напряжения от ускорения

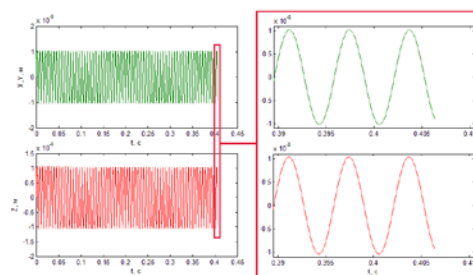


Рис. 12. Перемещение рамок при синусоидальном изменении ускорения

Далее проводится моделирование погрешностей перекрестных связей при наличии угловых скоростей Ω_x , Ω_y , Ω_z , определяется погрешность выходного сигнала. График изменения погрешности в зависимости от угловых скоростей представлен на рис. 13.

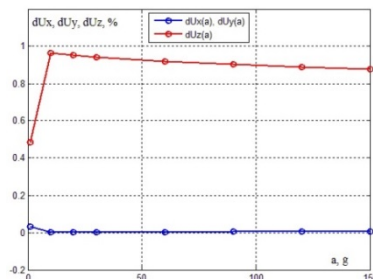


Рис. 13. Зависимость погрешности перекрестных связей по осям X и Y

Заключение

В результате исследований была разработана конструкция трёхкомпонентного ММА, который может применяться для систем мониторинга технического состояния сооружений.

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 использованных источников

1. Yole Development //www.yole.fr
2. Русская ассоциация МЭМС //www.mems-russia.ru
3. Система мониторинга напряжённого состояния зданий и конструкций. Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН - научно-исследовательский институт в области информационных технологий, вычислительной техники и микроэлектроники. //www.ipmce.ru/custom/sensornetworks/products/smbuilding/
4. Nesterenko T.G., Koleda A.N., Barbin E.S., Uchaikin, S.V. Temperature error compensation in two-component Micromechanical Gyroscope // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2014. Volume 4, Issue 10. – p. 1598-1605.
4. Koleda A.N., Barbin E.S., Nesterenko T.G. Three-component microelectromechanical accelerometer // Proceedings of 20th Saint-Petersburg international conference on integrated navigation systems, 22-24 May 2015, Saint-Petersburg, Russia.
5. Tamara G. Nesterenko, Evgeniy S. Barbin, Aleksey N. Koleda, Alisa A. Arshinova. Metrological performance of integrated multiple axis MEMS accelerometers under thermal effect // XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry” August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

ГОЛЬДШТЕЙН А.Е., ВАВИЛОВА Г.В., КИСЕЛЁВА Е.К.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

Введение

Погонная электрическая емкость кабеля и связанное с ней волновое сопротивление являются одними из основных характеристик ряда кабельных изделий, таких как кабели связи, кабели управления, радиочастотные кабели. Значение погонной емкости нормируется стандартами на соответствующие виды кабелей [1].

Контроль емкости кабеля на соответствие требованиям стандартов осуществляется по ГОСТ 27893-88 [2]. Данный стандарт определяет порядок выходного контроля, который осуществляется с использованием отрезка готового кабеля.

Такая методика проведения контроля имеет существенные недостатки, связанные с невозможностью контроля кабеля по всей его длине и получением информации о качестве кабеля уже после завершения процесса его изготовления.

Эти недостатки устраняются в случае проведения контроля еще в процессе производства при изготовлении входящих в состав кабеля одножильных проводов на стадии нанесения изоляции на электропроводящую жилу. Для этого используется трубчатый электрод, погруженный в воду (обычно в охлаждающую ванну экструзионной линии). В процессе контроля измеряется емкость конденсатора, одной из обкладок которого является электропроводящая жила провода, а другой – вода, окружающая его изоляционную оболочку и находящаяся в электрическом контакте с трубчатым электродом, через который непрерывно движется контролируемый провод. Данный метод контроля реализован в разработках ведущих фирм, специализирующихся в выпуске