

Исследование влияния температуры на работу резонатора частотного микромеханического акселерометра

*Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенко,
В.Ф.Шилов, Чжо Мьё Аунг*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

serborsel@mail.ru

Частотный микромеханический акселерометр (ММА) используется для измерения ускорения на основе изменения частоты резонатора, которое возникает при воздействии ускорения в результате смещения инерционной массы. На его чувствительность могут влиять вибрационные шумы, температура и т.д. В работе с помощью расчета и моделирования в программе ANSYS исследовано влияние температуры на собственную частоту колебаний резонаторов частотных ММА различных конструкций. Показано, что в ряде конструкций резонаторов частотных ММА изменение частоты колебания Δf_0 , вызванное повышением температуры, сопоставимо и даже превышает изменение частоты колебаний в результате воздействия ускорения. Установлено, что известные конструкции резонаторов, работающих на основе колебаний двухфиксированной балки, не обеспечивают стабильность собственной частоты колебаний при изменении температуры. У резонаторов, работающих на основе колебания консольной балки, частота практически не изменяется при повышении температуры. Наилучший результат с точки зрения температурной стабильности показал резонатор в виде консольной балки с балочным резонатором внутри нее, для которого изменение Δf_0 при повышении температуры до 70 °С составило всего 4 Гц. Исследование основного конструктива ММА, состоящего из инерционной массы с резонатором, выполненным в виде консольной балки с балочным резонатором внутри нее, показало неизменность собственной частоты колебаний этого конструктива при повышении температуры до 70 °С. При этом чувствительность составляла 130 Гц/g и не зависела от температуры.

Ключевые слова: частотный микромеханический акселерометр; резонатор; чувствительность; двухфиксированная балка; консольная балка; собственная частота; температурная стабильность

Для цитирования: Исследование влияния температуры на работу резонатора частотного микромеханического акселерометра / Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенко и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 268–276. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-268-276

Study on Influence of Temperature on Operation of Resonator of Frequency Micromechanical Accelerometer

*Aung Thura, B.M. Simonov, S.P. Timoshenkov,
B.F. Shilov, Kyaw Myo Aung*

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

Abstract: The frequency micromechanical accelerometer (MMA) measures the acceleration, based on a change of the resonator frequency, when the acceleration is caused by the displacement of the inertial mass. Its sensitivity can be influenced by such factors as vibration noise, temperature, etc. In this study using the calculation and modeling in the ANSYS program the influence of the temperature on the natural oscillation frequency of resonators of various designs has been studied. It has been shown that in a number of studied designs of the frequency MMA resonators the frequency change Δf_0 , caused by the temperature increase, is comparable and even exceeds a change of the frequency due to the acceleration effect. It has been determined that the known designs of the resonators, operating based on the oscillations of a two-fixed beam, do not ensure the stability of the oscillations natural frequency with the temperature change. The frequency, due to the temperature increase, of the resonators, working on the cantilever beam base, practically does not change. The best result from the point of view of the temperature stability has been shown by the resonator in the form of a cantilever beam with the beam resonator inside it, for which change Δf_0 with an increase of temperature up to 70 °C. The study of the basic MMA construction, consisting of an inertial mass with a resonator made in the form of a cantilever beam with a beam resonator inside it has shown that the invariance of the natural oscillation frequency of this construction when the temperature increases up to 70 °C.

Keywords: frequency micromechanical accelerometer; resonator; sensitivity; two-fixed beam; cantilever beam; natural frequency; temperature stability

For citation: Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. et al. Study on influence of temperature on operation of resonator of frequency micromechanical accelerometer. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 268–276. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-268-276

Введение. Частотные микромеханические акселерометры (ММА) на сегодняшний день являются перспективными приборами современной микросистемной техники. В состав частотных ММА входят резонаторы, микроактюаторы, складчатые пружины (торсионы), микрорычаги, инерционные массы и другие конструктивы. На работу резонатора влияют такие факторы, как термоупругое демпфирование, наличие остаточного напряжения, газовое демпфирование, температура и др. [1]. Эффективность датчика

определяется стабильностью его параметров и характеристик и непосредственно связана с их независимостью от воздействующих на резонатор внешних факторов.

В работах [2–5] представлены результаты исследований разных конструкций частотного ММА. Способ возбуждения во всех случаях электростатический, актюаторы выполнены в виде гребенчатой конструкции, и у всех одинаковый двухфиксированный резонатор DETF-типа (Double Ended Tuning Fork resonator). В работе [5] исследование резонатора проведено с целью уменьшения влияния температуры на его работу. До изменения конструкции резонатора при температуре 20 °С собственная частота колебаний резонатора $f_0 = 31,287$ кГц, при температуре 60 °С $f_0 = 33,130$ кГц ($\Delta f_0 = 1,843$ кГц). После изменения конструкции мест закрепления резонатора удалось уменьшить изменение частоты колебаний до 1,17 кГц, что обусловлено изменением температуры. При этом $f_0 = 32,449$ кГц при температуре 60 °С. Однако полученное изменение частоты является высоким значением с учетом того, что чувствительность частотного ММА составляет 66,24 Гц/g. В работе [6] описан резонатор частотного ММА с чувствительностью 455 Гц/g, работающий с использованием балочного двухфиксированного актюатора. По результатам исследования получено $\Delta f_0 = 23,319$ кГц, обусловленное влиянием температуры.

В настоящей работе с помощью моделирования в программе ANSYS исследуется влияние температуры на работу резонатора частотного ММА. Образец резонатора имеет такую же конструкцию, как образец в работе [6]. Исследования проводились при температуре 22 и 70 °С.

Расчет механической силы, возникающей в результате нагрева. Нагрев консольной балки приводит к изменению ее длины (рис.1), что выражается уравнением

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1)$$

где ε – тепловая деформация; Δl – приращение длины; l_0 – начальная длина.

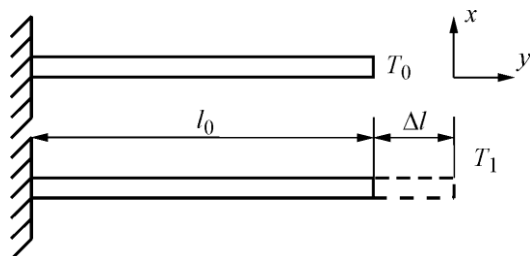


Рис.1. Результат температурного воздействия (нагрева) на консольную балку
Fig.1. The result of the temperature influence (heating) on the cantilever beam

При нагревании материалы расширяются (в том числе кремний и конструкционная сталь и т.д.), в результате чего возникает тепловая деформация ε , которая выражается уравнением [7]

$$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_0), \quad (2)$$

где α – коэффициент термического расширения; T_1 – измененная температура резонатора; T_0 – начальная температура резонатора.

Согласно уравнениям (1) и (2) приращение длины можно записать в виде

$$\Delta l = \alpha l_0 (T_1 - T_0). \quad (3)$$

При нагреве резонатора он расширяется и в направлении оси y . Неподвижные опоры обеспечивают силы реакции на это расширение, которые приводят к сжимающему напряжению в балке. Механическое напряжение в балке, возникающее в результате воздействия силы, выражается уравнением

$$\sigma_y = \varepsilon E, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга.

Используя уравнения (2) и (4), можно рассчитать механическое напряжение σ_y , действующее по оси y . Механическая сила, действующая по оси y , равна:

$$F = \sigma_y A, \quad (5)$$

где A – площадь поперечного сечения балки.

При воздействии механической силы на незакрепленную или закрепленную с одной стороны балку происходит ее деформация и собственная частота колебаний балки меняется незначительно. Но когда балка не может свободно расширяться, как, например, двухфиксированная балка, деформации, связанной с изменением длины, не происходит и собственная частота колебаний балки меняется достаточно заметно.

Для расчета механической силы будем использовать параметры конструкционной стали и уравнения (2), (4) и (5). В результате получаем $F = 34,56$ мН. В программе ANSYS имеются точные параметры конструкционной стали: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $T_1 = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_0 = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$; $A = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. При моделировании в программе ANSYS возникающая сила $F = 34,76$ мН. Результаты моделирования показаны на рис.2.

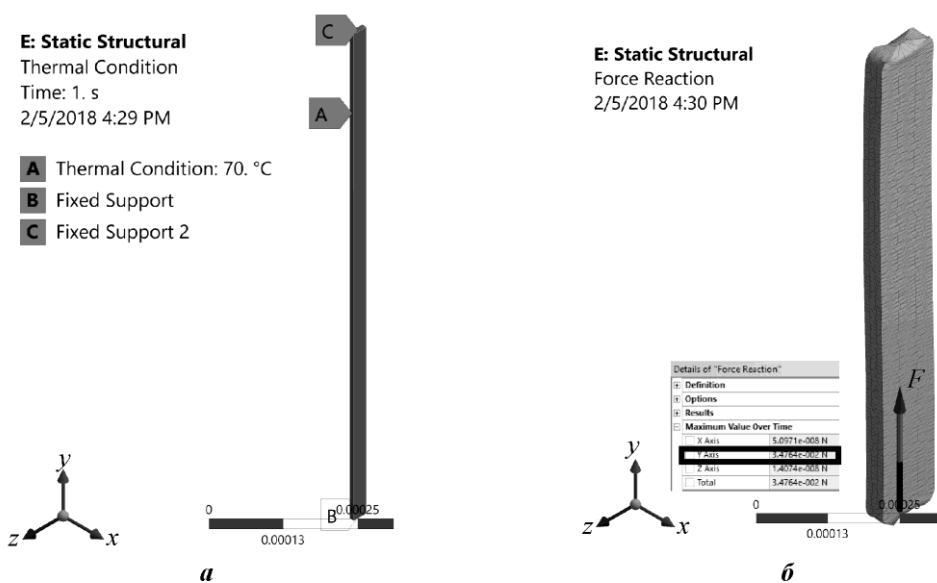


Рис.2. Двухфиксированный резонатор балочной конструкции при температуре 70 °C:

a – общий вид; b – показана возникающая сила $F = 34,761$ мН

Fig.2. Two-fixed resonator of beam structure at 70 °C: a – general view; b – the force resulting due to the change of temperature is $F = 34.761$ mN

Влияние температуры на изменение частоты колебаний резонаторов частотных ММА. В работах [2–6] описаны резонаторы частотных ММА с конструкциями, содержащими двухфиксированные балки. Конструкции чувствительных элементов различны, но тип резонатора одинаковый, кроме резонатора, представленного в [6]. Исходя из полученных результатов изменение частоты колебаний у таких резонаторов при температурном воздействии наиболее вероятно. Частотный ММА измеряет ускорение на основе изменения частоты колебаний резонатора, которое возникает при воздействии ускорения в результате смещения инерционной массы. В работе [5] исследован ре-

зонатор DETF-типа. Получено уменьшение изменения собственной частоты колебаний до 1,17 кГц ($f_0 = 32,449$ кГц при температуре 60 °С) за счет изменения конструкции мест закрепления резонатора.

На рис. 3 представлены результаты моделирования резонатора DETF-типа частотного ММА при температуре 22 и 70 °С. Полученное изменение собственной частоты колебаний этого резонатора $\Delta f_0 = 12,55$ кГц обусловлено повышением температуры.

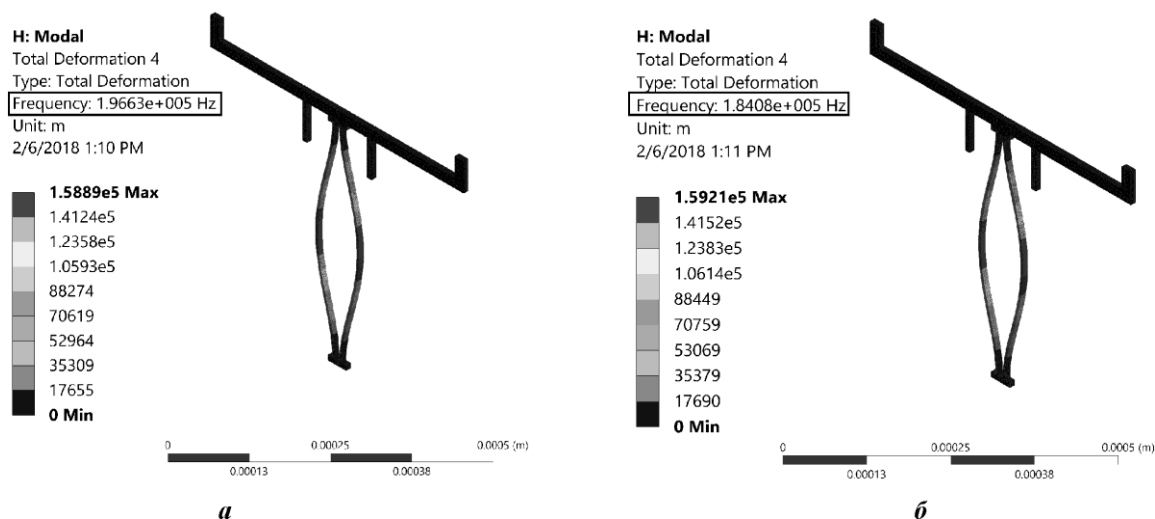


Рис.3. Результаты моделирования резонатора DETF-типа [2–5] при температуре 22 °С (а) и 70 °С (б)
 Fig.3. The modeling results of a DETF-type resonator [2–5] at a temperature of 22 °С (а) and at a temperature of 70 °С (б)

Проведено моделирование образца резонатора, работающего как двухфиксированная балка [6]. На рис.4 показаны результаты моделирования. У такого резонатора при температуре 22 °С $f_0 = 74,705$ кГц, при температуре 70 °С $\Delta f_0 = 68,545$ кГц, изменение частоты $\Delta f_0 = 6,16$ кГц.

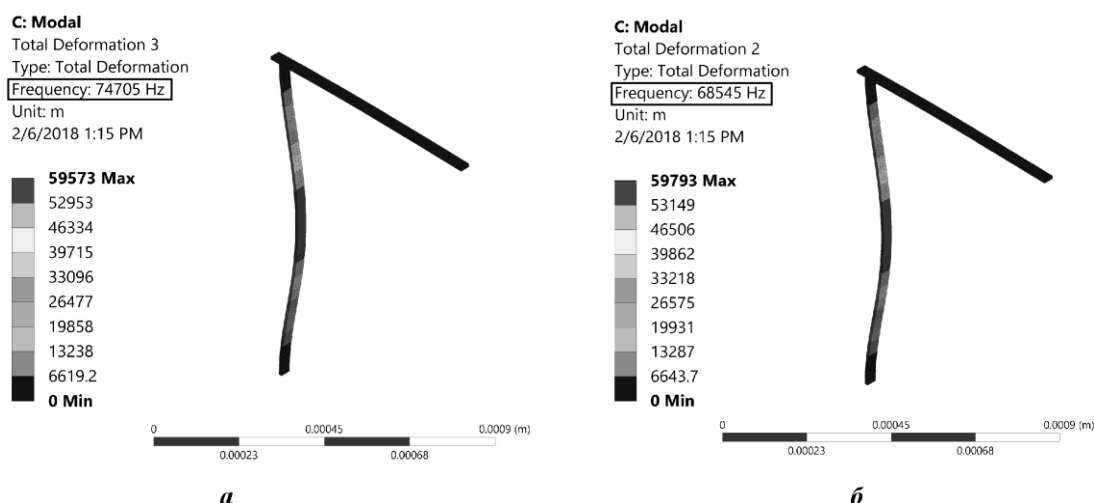


Рис.4. Результаты моделирования резонатора балочной конструкции [6] при температуре 22 °С (а) и 70 °С (б)
 Fig.4. The modeling results of a beam structure resonator [6] at a temperature of 22 °С (а) and at a temperature of 70 °С (б)

Для уменьшения влияния температуры на частоту колебаний резонатора необходимо использовать принцип работы однофиксированной (консольной) балки, у которой частота колебаний практически не изменяется из-за влияния температуры. Один конец консольной балки закреплен, она может расширяться свободно, и ее собственная частота колебаний при изменении температуры почти не меняется.

Создание резонатора внутри консольной балки. На основе конструкции консольной балки разработан и смоделирован образец балочного резонатора, находящегося внутри консольной балки (рис.5). В данной конструкции резонатора удалось добиться высокой температурной стабильности собственной частоты колебаний. Как показали расчеты, выполненные с помощью программы ANSYS, при повышении температуры резонатора до 70 °С собственная частота колебаний меняется незначительно. При нагреве в конструкции консольной балки возникает механическая сила, которая фактически релаксирует, т.е. происходит изменение длины резонатора со стороны не закрепленного (не зафиксированного) по оси y торца. В результате собственная частота колебаний балки меняется незначительно.

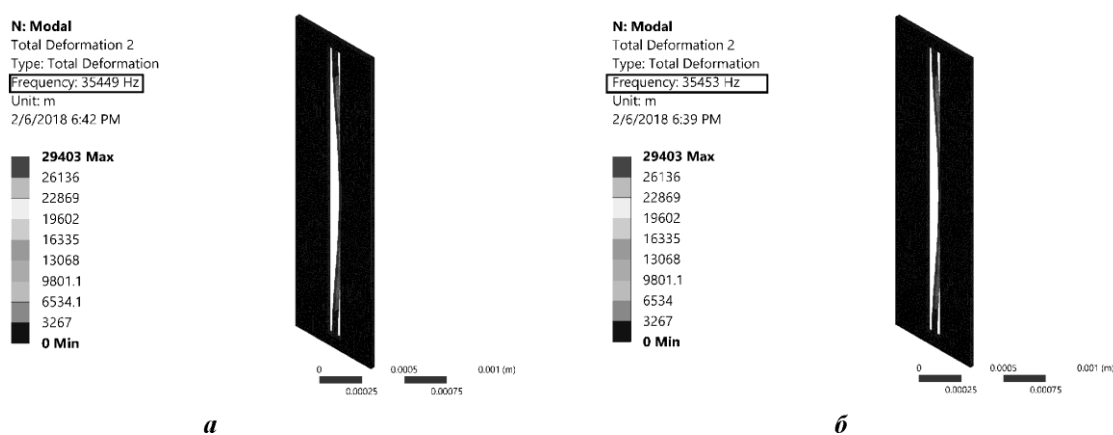


Рис.5. Результаты моделирования балочного резонатора внутри консольной балки: $a - f_0 = 35,449$ кГц при температуре 22 °С; $b - f_0 = 35,453$ кГц при температуре 70 °С

Fig.5. The modeling results of the beam resonator inside the cantilever beam, the natural frequencies of the oscillations $f_0 = 35.449$ kHz and 35.453 kHz respectively at a temperature of 22 °C (a) and at a temperature of 70 °C (b)

Балочный резонатор находится внутри консольной балки, но его колебания происходят так же, как у двухфиксированной балки. Результаты моделирования показали, что у консольной балки с балочным резонатором внутри изменение собственной частоты колебаний, связанное с повышением температуры, составило всего 4 Гц. Собственная частота колебаний резонатора увеличилась. Поэтому на основе подобной конструкции представляется возможным создавать резонаторы частотных ММА, отличающиеся высокой температурной стабильностью собственной частоты колебаний.

Исследование зависимости чувствительности инерционной массы с резонатором от температуры. Чувствительность частотного ММА измеряется в Гц/г и показывает, на сколько герц меняется собственная частота колебаний при воздействии ускорения 1g. На рис.6 представлены результаты моделирования изменения собственной частоты колебаний основного конструктива частотного ММА – инерционной массы с резонатором, выполненным в виде консольной балки с балочным резонатором внутри нее, при температурном воздействии и воздействии на конструктив ускорения 1g.

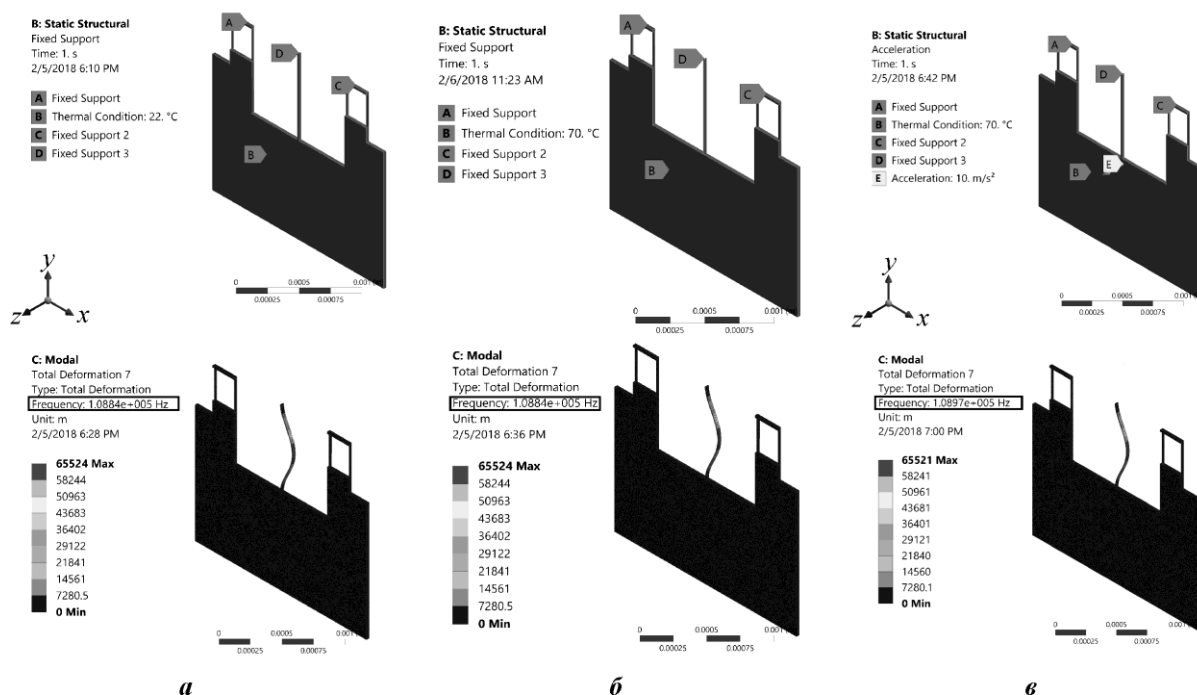


Рис.6. Конструктив частотного ММА и результаты моделирования изменения собственной частоты колебаний резонатора балочной конструкции: *a* – $f_0 = 108,84$ кГц при температуре 22 °С; *б* – $f_0 = 108,84$ кГц при температуре 70 °С; *в* – $f_0 = 108,97$ кГц при температуре 70 °С с ускорением 1 g
 Fig.6. The design of frequency MMA - inertial mass with a beam structure resonator and the modeling results of its own frequency: *a* – 108.84 kHz at a temperature of 22 °C; *b* – 108.84 kHz at a temperature of 70 °C; *c* – 108.97 kHz at a temperature of 70 °C with an acceleration of 1 g

По результатам моделирования определена чувствительность исследованной конструкции (основного конструктива ММА), которая равна 130 Гц/г и не зависит от температуры.

Заключение. При температурном воздействии для резонаторов DETF-типа [2–5] и резонатора балочной конструкции [6] характерно заметное изменение собственной частоты колебаний ($\Delta f_0 = 12,55$ кГц для резонатора DETF-типа и 6,16 кГц для балочного резонатора). Работа данных резонаторов построена на принципе колебаний двухфиксированной балки, что и определяет значительное изменение Δf_0 при воздействии температуры. Наилучший результат с точки зрения температурной стабильности показал резонатор в виде консольной балки с балочным резонатором внутри нее, для которого изменение собственной частоты колебаний при повышении температуры до 70 °С составило всего 4 Гц.

Результат исследования основного конструктива ММА – инерционной массы с резонатором, выполненного в виде консольной балки с балочным резонатором внутри нее, показал стабильность собственной частоты колебаний этого конструктива ММА при повышении температуры до 70 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00177).

Литература

1. Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Влияние параметров конструкции актюаторов на чувствительность частотных микроакселерометров // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – №4. – P. 386–397.
2. Novel resonant accelerometer with micro leverage fabricated by MEMS technology / He Gaofa, Tang Yike, Zhou Chuande et al. // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 24. – №3. – P. 1–6.
3. Xiao-Ping, Su S., Henry S. Yang. Design of compliant microleverage mechanisms // Sensors and Actuators A 87. – 2001. – P. 146–156.
4. A vacuum packaged surface micromachined resonant accelerometer / Ashwin A. Seshia, Trey A. Roessig, Roger T. Howe et al. // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2002. – Vol. 11. – No. 6. – P. 784–793.
5. Design and implementation of a micromechanical silicon resonator accelerometer / H. Libin, Y. Hui, G. Yaung et al. // Sensor. – 2013. – P. 15785–15804.
6. A resonant microaccelerometer with high sensitivity operating in an oscillating circuit / C. Claudia, C. Alberto, L. Giacomo et al. // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2010. – Vol. 19. – №5. – P. 1140–1152.
7. Bramhahand V. Patil, Milind S. Ramgir. Study of structural steel members under thermal loading // International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). – 2016. – Vol. 5. – P. 2278–7798.

Поступила 10.07.2017 г.; принята к публикации 27.02.2018 г.

Аунг Тхура – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), aungthura87@gmail.com

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), serborsel@mail.ru

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), spt@mail.ru

Шилов Валерий Федорович – ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1)

Чжо Мьё Аунг – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), sitbolay@gmail.com

References

1. Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Vliyanie parametrov konstrukcii aktyuatorov na chuvstvitel'nost' chastotnykh mikroakselerometrov [Influence of design parameters of actuators on the sensitivity of frequency microaccelerometers]. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 4, pp. 1–13. (In Russian).
2. He Gaofa, Tang Yike, Zhou Chuande, Ht Xiaoping, WuYing. Novel Resonant Accelerometer with Micro Leverage Fabricated by MEMS Technology. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2011, vol. 24, no. 3, pp. 1–6.
3. Xiao-Ping, S. Su, Henry S. Yang. *Design of compliant microleverage mechanisms. Sensors and Actuators A 87*, 2001, pp. 146–156.

4. Ashwin A. Seshia, Trey A. Roessig, Roger T. Howe, Roland W. Gooch, Thomas R. Schimert, Stephen Montague. A Vacuum Packaged Surface Micromachined Resonant Accelerometer. *Journal of microelectromechanical systems*, 2002, vol. 11, no. 6, pp. 784–793.
5. Libin H., Hui Y., Yaung G., Liye Z., Jinxing L. Design and Implementation of a Micromechanical Silicon Resonator Accelerometer. *Sensor*, 2013, pp. 15785–15804.
6. Claudia C., Alberto C., Giacomo L., Antonio L., Alessandro T., and Barbara S., A Resonant microaccelerometer with high sensitivity operating in an oscillating circuit. *Journal of microelectromechanical systems*, 2010, vol. 19, no.5, pp. 1140–1152.
7. Bramhahand V. Patil, Prof. Milind S. Ramgir, Study of Structural Steel Members Under Thermal Loading. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 2016, vol.5, pp. 2278–7798.

Submitted 10.07.2017; Accepted 27.02.2018.

Information about the authors:

Aung Thura – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aungthura87@gmail.com

Boris M. Simonov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), serborsel@mail.ru

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt@mail.ru

Valery F. Shilov – Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1)

Kyaw Myo Aung – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sitbolay@gmail.com