

Расчет коэффициента жесткости и момента упругости чувствительного элемента микромеханического акселерометра

Б.М. Симонов, В.Н. Горошко, А.С. Тимошенко

Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Москва, Россия

serborsel@mail.ru

На этапе предварительного проектирования топологии чувствительного элемента микромеханического акселерометра необходимо иметь определенный набор критериев его надежности. В работе на основе математического анализа сделано уточнение и обобщение формул для оценки момента упругости и жесткости торсионов чувствительного элемента микромеханического акселерометра. Получен тривиальный критерий работоспособности чувствительного элемента. Намечен путь создания эридитарной системы моделей для оценки работоспособности микромеханического акселерометра с учетом термомеханических воздействий окружающей среды.

Ключевые слова: чувствительный элемент; коэффициент жесткости; момент упругости; микромеханический акселерометр

Для цитирования: Симонов Б.М., Горошко В.Н., Тимошенко А.С. Расчет коэффициентов жесткости и момента упругости чувствительного элемента микромеханического акселерометра // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 6. – С. 625–629. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-625-629

Calculation of Stiffness and Elasticity Coefficient of Sensitive Element of Micromechanical Accelerometer

B.M. Simonov, V.N. Goroshko, A.S. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

serborsel@mail.ru

Abstract: The micromechanical accelerometers (MMA) find more common application in the information-measuring and opto-electronic systems. The parameters and characteristics of MMA are determined by their design and manufacturing technology, the MMA functioning is affected by a significant number of external and internal influencing factors. In the work, a more precise definition and generalization of formulas for estimate the moment of elasticity and stiffness of the sensitive element torsions have been made. In designing SE a trivial criterion of efficiency has been obtained. The way of creating an eridit system of the models for the estimation of the MMA working capacity in view of the thermomechanical influences of the environment has been planned.

Keywords: sensing element; stiffness coefficient; elasticity moment; micromechanical accelerometer

For citation: Simonov B.M., Goroshko V.N., Timoshenkov A.S. Calculation of stiffness and elasticity coefficient of sensitive element of micromechanical accelerometer. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 6, pp. 625–629. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-625-629

Микросистемные датчики физических величин, в том числе микромеханические акселерометры (ММА), находят все большее применение в различных областях [1], например в информационных измерительных и оптико-электронных системах [2]. Параметры и характеристики ММА определяются их конструкцией и технологией изготовления, на их функционирование оказывает влияние множество внешних и внутренних воздействующих факторов [3].

В работах [4, 5] приведены формулы для оценки момента упругости и жесткости торсионов чувствительного элемента (ЧЭ) ММА, показанного на рис.1. В настоящей работе эти формулы уточнены, приведены к виду, удобному для расчетов, а также сформулировано требование, которое необходимо выполнять на этапе проектирования ЧЭ. Представленная на рис.1 конструкция чипа ММА после его сборки (размеры даны в мм) содержит ЧЭ, присоединенный к статорной пластине методом диффузионной сварки Si-Al.

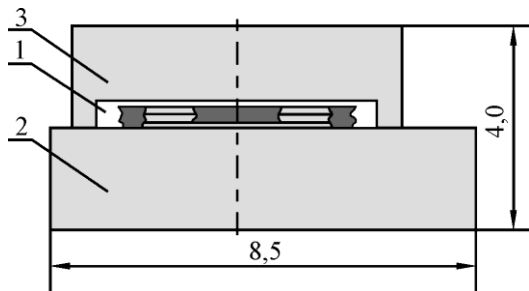


Рис.1. Структура чипа ММА после его сборки:

1 – ЧЭ; 2 – статорная пластина; 3 – крышка

Fig.1. The structure of the micromechanical accelerometer chip after its assembly: 1 – sensitive element (SE); 2 – stator plate; 3 – cover

Для изготовления ЧЭ акселерометра используется монокристаллический кремний марки КЭФ-4,5 (100). ЧЭ состоит из маятника 1, асимметрично подвешенного на двух упругих балках (торсионах) 2 к рамке 3 (рис.2,а). Для создания зазора между ЧЭ и расположенной под ним платой (рис.2,б) нижняя часть рамки имеет четыре выступа. Торсионы имеют в сечении крестообразный вид. При этом состав стекла – материала статорной пластины – выбирается таким образом, чтобы коэффициенты термического расширения стекла и кремния практически совпадали. При конструировании акселерометров маятникового типа имеется возможность варьирования формы и размеров ЧЭ, а также изменения диапазона измеряемых значений ускорения.

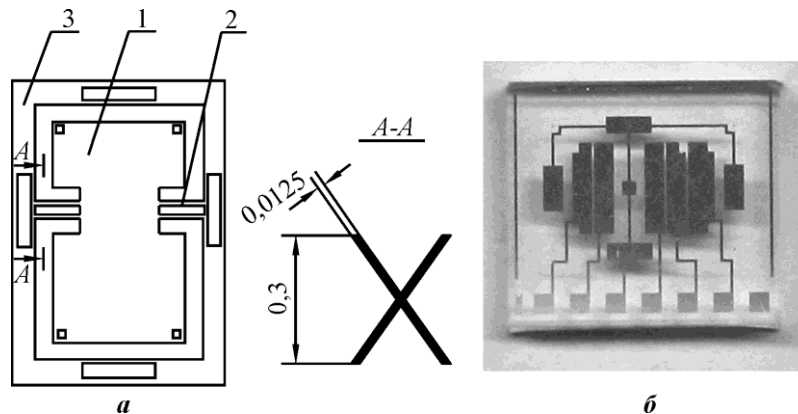


Рис.2. Чувствительный элемент микромеханического акселерометра (а)

и фотография платы (б)

Fig.2. The sensitive element of the MEMS accelerometer (a) and photograph board (b)

Центр масс ЧЭ смещен относительно оси торсионов, следовательно, при действии ускорения вдоль оси чувствительности возникает крутящий момент $M_{кр}$ и компенсирующий его момент упругости торсионов $M_{упр}$ (рис.3).

Момент упругости $M_{упр}$ равен

$$M_{упр} = K\varphi,$$

где K – коэффициент жесткости (жесткость торсионов); φ – угол отклонения.

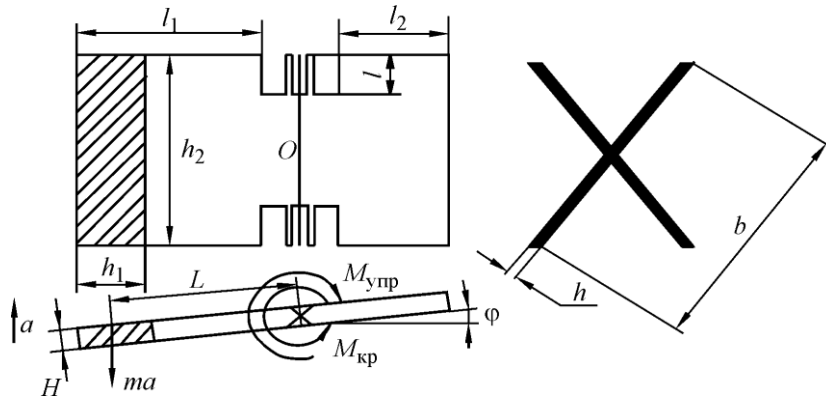


Рис.3. Схема отклонения ЧЭ на угол φ при воздействии ускорения вдоль оси чувствительности

Fig.3. Scheme of the deflection by angle φ under the influence of acceleration along the axis of sensitivity

Коэффициент жесткости определяется выражением

$$K = \frac{Gbh^3\eta}{l},$$

здесь G – модуль упругости второго рода; b – высота торсиона; h – толщина креста торсиона; l – длина торсиона (см. рис.1); η – коэффициент, который определяется выражением [4]

$$\eta = \left(\frac{1}{3} - \frac{64}{\pi^2} \frac{h}{b} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\text{th} \frac{(2k+1)\pi b}{2h}}{(2k+1)^5} \right). \quad (1)$$

В теории упругости [6] используется аналогичное выражение:

$$\eta = \left(\frac{1}{3} - \frac{64}{\pi^5} \frac{h}{b} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\text{th} \frac{(2k+1)\pi b}{2h}}{(2k+1)^5} \right). \quad (2)$$

Из сравнения выражений (1) и (2) следует, что влияние коэффициента η на жесткость торсионов K , а значит, и на момент упругости $M_{упр}$ ослабляется в π^3 раз. Это свойство (свойство робастности микросистем, т.е. их повышенная устойчивость) позволяет получить более про-

стые инженерные формулы. Для этого предварительно вычислим член $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\text{th} \frac{(2k+1)\pi b}{2h}}{(2k+1)^5}$.

Учитывая быструю сходимость ряда Тейлора и пренебрегая малыми величинами выше 2-го порядка, получаем выражение (2) в виде

$$\eta = \frac{1}{3} - 64 \frac{h}{\pi^5 b},$$

или для инженерных расчетов

$$\eta = \frac{1}{3} \left(1 - 0,627211 \frac{h}{b} \right).$$

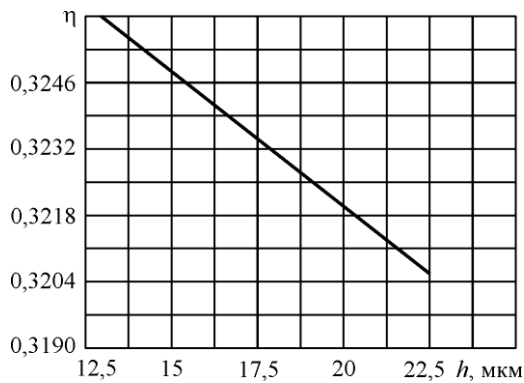


Рис.4. Зависимость коэффициента η от толщины крыла торсиона h при $b = 0,368 \cdot 10^{-3}$ м

Fig.4. The dependence of the coefficient η from of the wing torsion thickness h , by $b = 0.368 \cdot 10^{-3}$ m

В графической форме эта зависимость коэффициента η от толщины крыла торсиона h при $b = 0,368 \cdot 10^{-3}$ м представлена на рис.4.

Как следует из графика (рис. 4), значение η при варьировании толщины крыла торсиона h в пределах 12,5–22,5 мкм изменяется в пределах 0,3260–0,3211. Поэтому в инженерных расчетах можно использовать среднее значение $\eta = 0,323$.

Решая неравенство $\left(1 - 0,627211 \frac{h}{b} \geq 0\right)$ от-

носительно h/b , получаем некоторый тривиальный критерий надежности – нижнюю границу работоспособности ЧЭ, а значит, и ММА. Отсюда следует, что при проектировании ЧЭ необходимо выполнять условие, которое можно выбрать в качестве численного критерия работоспособности ЧЭ:

$$h/b < 1,594359793.$$

Как видно из рис.4, для практических применений последнее неравенство может быть записано в виде $h/b \ll 1,594359793$, т.е. если это неравенство выполняется, то ЧЭ спроектирован правильно.

Таким образом, с учетом сделанного уточнения жесткость торсионов определяется как

$$K^{\text{var}} = \frac{Gb h^3 \eta^{\text{var}}}{l},$$

момент упругости как

$$M_{\text{упр}}^{\text{var}} = K^{\text{var}} \varphi.$$

Обобщая выражения (1) и (2) в форме уравнения

$$\eta^{\text{var}} = \left(\frac{1}{3} - \frac{64}{\pi^{\lambda}} \frac{h}{b} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{th \frac{(2k+1)\pi b}{2h}}{(2k+1)^5} \right), \quad \lambda = 3, 5,$$

отметим, что окончательное решение может быть получено в результате многофакторного эксперимента с привлечением программных пакетов (например, Nostran, Comsol, Solid Works и др.), учитывающих влияние термомеханических факторов внешней среды. Это приведет к усложнению модели, а возможно, к созданию эридитарной системы моделей, если использовать уравнения Коффина – Мэнсона и Аррениуса [7].

Уточненные формулы использованы при расчетах коэффициента жесткости и момента упругости ЧЭ ММА, образцы которых разработаны и изготовлены в Институте нано- и микросистемной техники МИЭТ, в том числе в новых разработках. Точность расчетных параметров оказалась выше более чем на 5%, критерий работоспособности ЧЭ работает на практике.

Литература

1. Вавилов В. Д., Тимошенков С. П., Тимошенков А. С. Микросистемные датчики физических величин: монография: в 2-х ч. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 550 с.
2. Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А. Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 260 с.

3. Amy D., Rob N. C., Thomas W. K., Mathew V. Engineering MEMS resonators with low thermoelastic damping // J. of Microelectromechanical Systems. – 2015. – Vol. 15. – No. 6. – P. 1437–1444.
4. Тимошенко С.П., Бритков О.М., Заводян А.В., Симонов Б.М. Расчет параметров чувствительных элементов микромеханических акселерометров // Микросистемная техника. Моделирование, технология, контроль: сб. научн. трудов / Под ред. С.П. Тимошенко. – М.: МИЭТ, 2007. – 208 с.
5. Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. – М.: Юрайт, 2017. – 502 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
7. Aung Thura, Simonov B.M., Goroshko V.N., Timoshenkov S.P. Accelerated life time estimation of the MEMS devices in the thermal influence // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Moscow, Zelenograd, 29 Jan.–1 Feb. 2018). – 2018. – P. 1590–1594.

Поступило 06.07.2018 г.; принято к публикации 25.09.2018 г.

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

Горошко Владимир Николаевич – ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), vngor@bk.ru

Тимошенко Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), porcuapa@gmail.com

References

1. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Microsystem sensors of physical quantities: Monograph in two parts*. Moscow, Technosphere Publ., 2018. 550 p. (in Russian).
2. Achiliev V.M., Gruzevich Yu.K., Soldatenkov V.A. *Information measuring and optoelectronic systems based on micro and nano mechanical sensors of angular velocity and linear acceleration*. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2016. 260 p. (in Russian).
3. Amy D., Rob N. C., Thomas W. K., Mathew V. Engineering MEMS Resonators with Low Thermoelastic Damping. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1437–1444.
4. Timoshenkov S.P., Britkov O.M., Zavodjan A.V., Simonov B.M. Calculation of Parameters of sensitive Elements of MEMS Accelerometers. *Microsystem Technology. Modeling, Technology, Control. Collection of scientific papers*. Ed. by Timoshenkov S.P. Moscow, MIET Publ., 2007. 208 p. (in Russian).
5. Timoshenkov S.P., Simonov B.M., Goroshko V.N. *Reliability of technical systems and technogenic risk. Tutorial*. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 502 p. (in Russian).
6. Timoshenko S.P., Goodyer J. *The theory of elasticity*. Ed. by G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1979. 560 p. (in Russian).
7. Aung Thura, Simonov B.M., Goroshko V.N., Timoshenkov S.P. Accelerated life time estimation of the MEMS devices in the thermal influence. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, Moscow, 2018, pp. 1590–1594.

Submitted 06.07.2018; Accepted 25.09.2018.

Information about the authors:

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

Vladimir N. Goroshko – Senior Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vngor@bk.ru

Aleksey S. Timoshenkov – Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), porcuapa@gmail.com