

УДК 621.3.049.77

И.Е. Лысенко**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВУХОСЕВЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СЕНСОРОВ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ
RR-ТИПА***

Актуальной задачей является разработка подходов к построению функционально интегрированных микромеханических гироскопов-акселерометров, обеспечивающих измерение угловых скоростей и линейных ускорений по нескольким осям чувствительности, обладающих высокой степенью интеграции и позволяющих снизить массогабаритные характеристики микросистем за счет сокращения площади подложки, используемой под размещение каждого интегрального сенсора. В конструкциях гироскопов и акселерометров применяются схожие конструктивные элементы, поэтому для их разработки могут быть применены одни и те же схемы построения. В данной работе описан метод проектирования микромеханического гироскопа-акселерометра RR-типа с двумя осями чувствительности. Разработано уравнение движения чувствительных элементов устройства.

Метод; проектирование; конструкция; микроэлектромеханические системы; сенсор; гироскоп; акселерометр.

I.E. Lysenko**DESIGN METHOD OF TWO-AXIS MICROMACHINED
GYROSCOPE-ACCELEROMETER RR-TYPE**

Actual problem is working out of approaches to construction of functionally integrated micromechanical gyroscopes-accelerometer providing measurement of angular speeds and linear accelerations on several axis of sensitivity, possessing high degree of integration and allowing to lower masses characteristics of microsystems, at the expense of reduction of the substrate area used under placing of each integrated sensor. In designs of gyroscopes and accelerometers similar constructive elements are applied, therefore the same schemes of construction can be applied to their working out. Design method of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer RR-type is described. Gyroscope-accelerometer model are developed.

Method; design; microelectromechanical systems; sensor; gyroscope; accelerometer.

В микромеханических сенсорах угловых скоростей энергия первичных колебаний инерционной массы (ИМ) преобразовывается в энергию вторичных колебаний. Это преобразование осуществляется вследствие воздействия на чувствительный элемент сенсора сил инерции Кориолиса. Амплитуда вторичных колебаний ИМ очень мала, поэтому требуется усиление ее в форме совмещения частот первичных и вторичных колебаний с резонансной частотой колебаний упругого подвеса чувствительного элемента сенсора. Инерционные массы микромеханических гироскопов RR-типа совершают угловые колебания в обоих режимах работы. Сочетание относительного, вращательного движения инерционной массы в РД и ее переносного, вращательного движения в РЧ приводит к возникновению момента сил инерции Кориолиса (гироскопического момента) [1–4].

Микромеханические сенсоры линейных ускорений, или микромеханические акселерометры (ММА), являются одними из первых компонентов микроэлектромеханических систем. Микромеханические акселерометры R-типа характеризуются угловым перемещением инерционной массы под действием внешнего линейного ускорения [1, 5].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт от 27.08.2009 г. № П1224).

Проведенный анализ принципов построения микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений [1–5] позволяет сделать следующие выводы:

- ◆ в конструкциях интегральных микромеханических гироскопов и акселерометров применяются схожие конструктивные элементы (инерционные массы, упругие подвесы) и, следовательно, для их разработки могут быть применены одни и те же принципиальные схемы построения;
- ◆ для повышения степени интеграции конструкции микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений должны изготавливаться в рамках технологии поверхностной микрообработки;
- ◆ актуальной является разработка подходов к построению функционально интегрированных микромеханических гироскопов-акселерометров (ММГА), обеспечивающих измерение угловых скоростей и линейных ускорений по двум или трем осями чувствительности, обладающих высокой степенью интеграции с компонентами микроэлектромеханических систем и интегральных схем и позволяющих снизить массогабаритные характеристики микросистем, за счет сокращения площади подложки, используемой под размещение каждого интегрального сенсора.

Микромеханический гироскоп-акселерометр содержит подложку, неподвижные электроды емкостных преобразователей перемещений, неподвижных гребенчатых электродов электростатических приводов, внешнюю рамку, среднюю рамку, жесткие элементы подвеса, внутреннюю рамку, гребенчатые подвижные электроды электростатических приводов, опору, упругие балки, инерционные массы, торсионные балки [6].

При выводе уравнения движения чувствительного элемента гироскопа-акселерометра были сделаны следующие предположения: упругие элементы подвеса ротора имеют конечную жесткость на изгиб и кручение относительно осей X, Y; упругие элементы подвеса инерционных масс имеют бесконечную жесткость на изгиб и конечную жесткость на кручение относительно своих продольных осей.

Уравнение движения предложенного микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений, получаемое на основе уравнения Лагранжа второго рода [1], с учетом совпадения центра масс с геометрическим центром ротора и инерционных масс, имеет следующий вид:

$$M \left[\ddot{z} - z \left[\left(\dot{\beta} + \Omega_y - \Omega_x \alpha - \dot{\alpha} \gamma \right)^2 + \left(\dot{\gamma} + \Omega_x + \Omega_y \alpha - \dot{\alpha} \beta \right)^2 \right] \right] = Q_z; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left[A_p \beta^2 + C_p + (B_p + Mz^2) \gamma^2 \right] \ddot{\alpha} + \left[(B_p - C_p) \gamma + z^2 (\alpha - \gamma) M \right] \ddot{\beta} - \\ & - \left(A_p + Mz^2 \right) \beta \ddot{\gamma} - \Omega_y \left(A_p + Mz^2 \right) \left(\dot{\gamma} + \Omega_x + \Omega_y \alpha - \dot{\alpha} \beta \right) + \\ & + \Omega_x \left[\left(B_p + Mz^2 \right) \left(\dot{\beta} + \Omega_y - \Omega_x \alpha \right) + \left(B_p - Mz^2 \right) \dot{\alpha} \gamma \right] = Q_\alpha; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \left(B_p - C_p - Mz^2 \right) \dot{\alpha} \gamma + \left(B_p + C_p \gamma^2 + Mz^2 \right) \ddot{\beta} - \\ & - C_p \left(\dot{\alpha} + \Omega_x \beta - \left(\dot{\beta} + \Omega_y \right) \gamma \right) \cdot \Omega_x + \\ & + \dot{\alpha} \left(A_p + Mz^2 \right) \left(\dot{\gamma} + \Omega_x + \Omega_y \alpha - \dot{\alpha} \beta \right) = Q_\beta; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\left(A_p + Mz^2\right)(\ddot{\gamma} - \beta\ddot{\alpha}) - \left(\dot{\beta} + \Omega_y - \Omega_x\alpha\right)\left(B_p - Mz^2\right)\dot{\alpha} - \quad (4)$$

$$-\left(B_p + Mz^2\right)\dot{\alpha}^2\gamma + C_p\left(\dot{\beta} + \Omega_y\right)\left(\dot{\alpha} + \Omega_x\beta - \left(\dot{\beta} + \Omega_y\right)\gamma\right) = Q_\gamma;$$

$$A_{Mij}\ddot{\phi}_{ij} - C_{Mij}\Omega_{x,y}^2\phi_{ij} = Q_{\phi ij}, \quad (5)$$

где $A_p, B_p, C_p, A_m, B_m, C_m$ – главные моменты инерции ротора и ИМ; k_z – коэффициенты жесткости упругого подвеса ротора; $k_\alpha, k_\beta, k_\gamma, k_\phi$ – угловые коэффициенты жесткости подвеса ротора и ИМ, соответственно; β_z – коэффициент демпфирования для упругого подвеса ротора при его движениях по обобщенной координате z ; $\beta_\alpha, \beta_\beta, \beta_\gamma, \beta_\phi$ – коэффициенты демпфирования для ротора и инерционной массы при их вращении по обобщенным координатам $\alpha, \beta, \gamma, \phi$, соответственно; $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ – проекции угловых скоростей на оси XYZ; $i = 1, 2$ – номер чувствительного элемента ММГА; $j = 1, 2$ – номер инерционной массы.

Предложенные метод построения ММГА LL-типа и уравнение движения его чувствительных элементов могут использоваться при проектировании микромеханических гироскопов-акселерометров RR-типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
2. *Palaniapan M.* Integrated surface micromachined frame microgyroscopes. – University of California, Berkeley, 2002. – 168 p.
3. *Лысенко И.Е.* Теория микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 123-128.
4. *Лысенко И.Е., Шерова Е.В.* Моделирование упругого подвеса трехосевого микромеханического гироскопа-акселерометра // Известия вузов. Электроника. – 2009. – № 4. – С. 48-55.
5. *Yazdi N., Ayazi F., Najafi K.* Micromachined inertial sensors // Proceeding of the IEEE. – 1998. – Vol. 86, № 8. – P. 1640-1659.
6. *Лысенко И.Е.* Интегральный микромеханический гироскоп // Патент России №2293337, 2007. Бюл. № 4.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Е.А. Рындин.

Лысенко Игорь Евгеньевич

Общество с ограниченной ответственностью «Центр нанотехнологий».

E-mail: igor@fep.tit.sfedu.ru.

347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634311584.

Директор.

Lysenko Igor Evgenievich

«Nanotechnology center».

E-mail: igor@fep.tit.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347922, Russia.

Phone: +78634311584.

Director.