

E-mail: andron@fep.tsure.ru.  
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.  
Тел.: 8(8634)371-629.  
Кафедра радиотехнической электроники.  
Доцент.

Chervykov Georgiy Georgievich  
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: rte@fep.tsure.ru.  
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.  
Phone: 8(8634)371-629.  
Department of Electronic Devices.  
Chair of the department.

Osadchiy Evgeniy Nikolaevich  
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: andron @fep.tsure.ru.  
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.  
Phone: 8(8634)371-629.  
Department of Electronic Devices.  
Associate professor.

УДК 621.3.049.77

**И.Е. Лысенко**

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ  
УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ LL-ТИПА**

*Описаны метод проектирования микромеханического гироскопа-акселерометра с двумя осями чувствительности LL-типа. Предложено уравнение движения чувствительных элементов ММГА.*

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

**I.E. Lysenko**

**DESIGN METHOD OF MICROMACHINED  
GYROSCOPE-ACCELEROMETER LL-TYPE**

*Design method of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer is described. Gyroscope-accelerometer model are developed.*

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

Микромеханические сенсоры угловых скоростей, или микромеханические гироскопы (ММГ), являются компонентами микроэлектромеханических

систем, отличающихся от других сложностью их функционирования. В микромеханических гироскопах энергия первичных колебаний инерционной массы (ИМ), обусловленная действием сил, создаваемые актюаторными элементами, преобразовывается в энергию вторичных колебаний, обусловленную действием переносной угловой скорости. Это преобразование осуществляется вследствие воздействия на чувствительный элемент сенсора 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 инерционных масс микромеханического гироскопа. Микромеханические гироскопы LL-типа характеризуются возвратно-поступательным перемещением одной или двух инерционных масс, как в режиме движения (РД), так и в режиме чувствительности (РЧ) [1-4].

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

Проведенный анализ принципов построения микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений [1-6] 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.

К недостаткам первых конструкций ММГА LL-типа следует отнести [1-4]:

- ◆ наличие квадратурной ошибки, возникающей вследствие технологических погрешностей изготовления электростатических приводов и усиленной за счет совпадения частоты квадратурного сигнала с их частотой работы;

- ◆ согласованность первичных и вторичных колебаний инерционных масс. В режиме согласованных колебаний даже незначительное движение инерционной массы вдоль оси РЧ будут усилены и окажут существенное влияние на амплитуду вторичных колебаний.

Если первичные и вторичные колебания ИМ будут независимыми, то влияние вынужденных колебаний инерционной массы вдоль оси РЧ будет значительно слабее. Тогда квадратурная ошибка будет обусловлена исключительно технологическими погрешностями изготовления электростатических приводов, а не согласованностью первичных и вторичных колебаний инерционной массы [2].

Для обеспечения независимости первичные и вторичные колебания ИМ были предложены принципы построения микромеханических гироскопов LL-типа с конфигурациями упругих подвесов, названных IDOS (Inside drive outside sense) и ISOD (Inside sense outside drive) [2].

Достоинством конструкций ММГ с IDOS-подвесом является независимость первичных и вторичных колебаний инерционной массы, а недостатками – квадратурная ошибка, влияющая на РЧ в РД, обусловленная технологическими погрешностями изготовления электростатических приводов и наличие в конструкции ММГ одной инерционной массы [2].

Достоинством конструкций ММГ с ISOD-подвесом является значительное снижение влияния квадратурной ошибки, обусловленной технологическими погрешностями изготовления электростатических приводов на вторичные колебания ИМ. Недостатком является факт совершения колебаний инерционной массой в режиме движения, что оказывает влияние на выходной сигнал емкостных преобразователей перемещений за счет изменения площади взаимного перекрытия ИМ и латеральных неподвижных электродов [2].

Общим недостатком одномассовых ММГА LL-типа является трудность выделения полезного сигнала, обусловленного действием сил инерции Кориолиса, от сигнала, вызванного действием линейного ускорения вдоль оси вторичных колебаний инерционной массы. Введение второй инерционной массы, совершающей противофазные первичные колебания относительно первой массы, позволяет достаточно просто выделить сигналы, обусловленные действием угловых скоростей и линейных ускорений [1, 6].

На основе принципов построения одномассовых микромеханических гироскопов LL-типа с ISOD-подвесом и сенсоров линейных ускорений L-типа с параллельным подвесом, в данной работе разработана и исследована конструкция интегрального двухмассового микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений с ISOD-подвесом и двумя осями чувствительности, топология которого приведена на рис.1 [7].

Микромеханический гироскоп-акселерометр содержит подложку 1, неподвижные электроды емкостных преобразователей перемещений 2-27, неподвижные гребенчатые электроды электростатических приводов 28-31, подвижные гребенчатые электроды электростатических приводов 32-35, упругие балки 36-51, опоры 52-57, инерционные массы 58 и 59.

Как видно на рис.1 особенностью разработанного ММГА является изготовление в одном структурном слое упругого подвеса, инерционных масс, подвижных и неподвижных гребенчатых электродов электростатических приводов, неподвижных электродов емкостных преобразователей перемещений. Использование опор 53 и 56 позволяет исключить взаимное влияние первичных и вторичных колебаний чувствительных элементов ММГА друг на друга.

При выводе уравнения движения инерционных масс ММГА были сделаны следующие предположения: упругие элементы подвеса имеют конечную жесткость на изгиб в направлениях осей X, Y, Z; колебания упругих подвесов инерционных масс ММГА не оказывают влияния друг на друга.

На основе вышесказанного, рассмотрим упругие подвесы чувствительных элементов ММГА отдельно. С подложкой устройства связана система координат X, Y, Z. Подложка жестко соединена с корпусом, который поступательно перемещается с ускорением, имеющим в системе координат X, Y, Z проекции  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ . Кроме того, происходит вращение микромеханического устройства вокруг осей X, Y, Z с некоторыми угловыми скоростями  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$ ,  $\Omega_z$ . Векторы измеряемых линейных ускорений и угловых скоростей направлены вдоль осей X и Z.

На рис. 2 представлена система координат упругого подвеса подвижных гребенчатых электродов электростатических приводов ММГА. На рис. 3 представлена система координат инерционных масс сенсора.

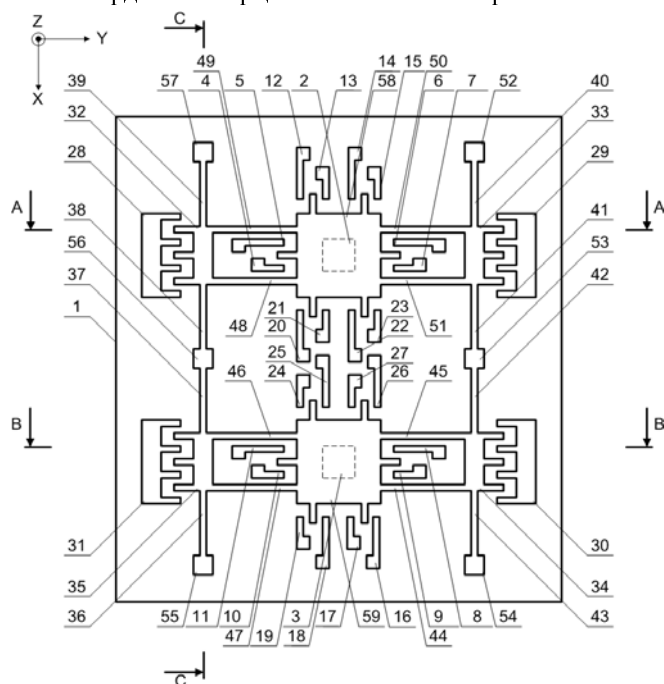


Рис. 1. Топология интегрального ММГА с двумя осями чувствительности

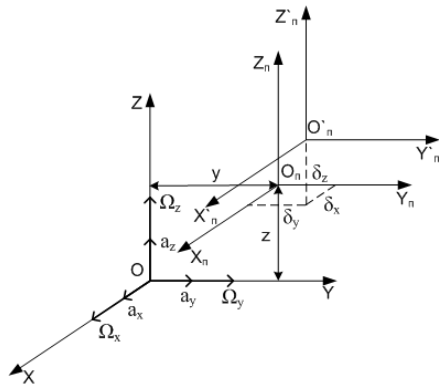


Рис. 2. Система координат упругого подвеса подвижных гребенчатых электродов электростатических приводов ММГА

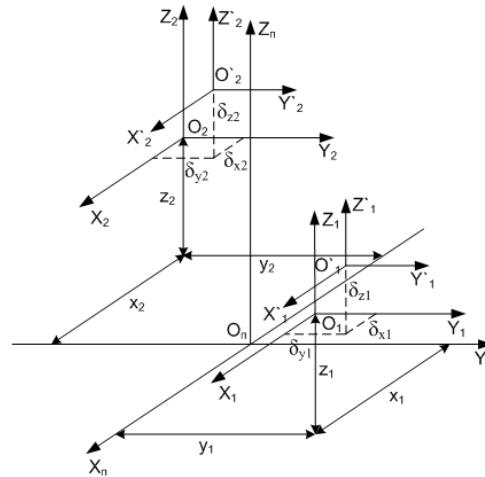


Рис.3. Система координат инерционных масс ММГА

Система координат  $X_n Y_n Z_n$ , оси которой параллельны осям  $X, Y, Z$ , определяет положение геометрического центра упругого подвеса подвижного электрода (точка  $O_n$ ), определенного координатами  $y$  и  $z$ , обусловленных конечной жесткостью на изгиб упругих элементов подвеса. Система координат  $X'_n Y'_n Z'_n$ , оси которой параллельны осям  $X_n, Y_n, Z_n$ , определяет положение центра масс упругого подвеса подвижных электродов (точка  $O'_n$ ), определенного координатами  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  обусловленных технологическими и температурными погрешностями.

Представленная система координат упругого подвеса подвижных электродов электростатических актюаторов ММГА одной инерционной массы будет аналогична для второго чувствительного элемента.

С геометрическими центрами первой и второй инерционной массы (соответственно точки  $O_1$  и  $O_2$ ) связаны системы координат  $X_1, Y_1, Z_1$  и  $X_2, Y_2, Z_2$ , положения которых определены координатами  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$ , соответственно. Причем координаты  $y_1$  и  $y_2$  обусловлены перемещениями под действием электростатических сил, а координаты  $x_1, z_1$  и  $x_2, z_2$  – перемещениями под действием линейных ускорений и угловых скоростей.

С центрами масс ИМ (точки  $O'_1$  и  $O'_2$ ), положения которых в системах координат  $X_1 Y_1 Z_1$  и  $X_2 Y_2 Z_2$  определены координатами  $\delta_{x1}, \delta_{y1}, \delta_{z1}$  и  $\delta_{x2}, \delta_{y2}, \delta_{z2}$  (обусловленных действием технологических и температурных погрешностей), связаны системы координат  $X'_1 Y'_1 Z'_1$  и  $X'_2 Y'_2 Z'_2$ , соответственно.

Уравнение движения ММГА, получаемое на основе уравнения Лагранжа второго рода [1] будет иметь следующий вид:

$$(m_{\Pi} + m_i) \left[ \ddot{y} - (\Omega_x^2 + \Omega_z^2)y - \Omega_x \dot{z} \right] + m_i \left[ \pm \ddot{y}_i \pm \Omega_z \dot{x}_i \mp \Omega_x \dot{z}_i \pm (\Omega_x^2 + \Omega_z^2)y_i \right] = (1)$$

$$= -k_y y - \frac{\partial W}{\partial y} - \beta_y \dot{y} + F_y \pm F_{эл};$$

$$(m_{\Pi} + m_i) \left[ \ddot{z} - \Omega_x^2 z + \Omega_x \dot{y} \right] + m_i \left[ \pm \ddot{z}_i \pm \Omega_x \dot{y}_i \pm \Omega_x^2 z_i \right] = (2)$$

$$= -k_z z - \frac{\partial W}{\partial z} - \beta_z \dot{z} + F_z;$$

$$m_i \left[ \ddot{x}_i - \Omega_z (\dot{y}_i \pm \dot{y}) - \Omega_z^2 x_i + \Omega_x \Omega_z (z_i \pm z) \pm \Omega_x \dot{z} \right] = (3)$$

$$= -k_{xi} x_i - \frac{\partial W}{\partial x_i} - \beta_{xi} \dot{x}_i + F_{xi};$$

$$m_i \left[ \ddot{y} \pm \ddot{y}_i + \Omega_z \dot{x}_i - \Omega_x (\dot{z}_i \pm \dot{z}) \mp (\Omega_x^2 + \Omega_z^2)(y \pm y_i) \right] = (4)$$

$$= -k_{yi} y_i - \frac{\partial W}{\partial y_i} - \beta_{yi} \dot{y}_i + F_{yi};$$

$$m_i \left[ \ddot{z}_i \pm \ddot{z} - \Omega_x^2 (z_i \pm z) + \Omega_x (\dot{y}_i \pm \dot{y}) + \Omega_x \Omega_z x_i \right] = -k_{zi} z_i - \frac{\partial W}{\partial z_i} - \beta_{zi} \dot{z}_i + F_{zi}. (5)$$

где  $m_{\Pi}$ ,  $m_i$  – массы подвижных электродов и ИМ, соответственно;  $k_y, k_z$  – коэффициенты жесткости упругого подвеса подвижных электродов электростатических приводов;  $k_{xi}, k_{yi}, k_{zi}$  – коэффициенты жесткости упругого подвеса ИМ;  $\beta_y, \beta_z$  – коэффициенты демпфирования для упругого подвеса подвижных электродов электростатических приводов;  $\beta_{xi}, \beta_{yi}, \beta_{zi}$  – коэффициенты демпфирования для упругого подвеса ИМ;  $i=1, 2$  – номер инерционной массы.

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

#### 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. *Clark W.A.* Micromachined vibratory rate gyroscopes. – University of California, Berkeley, 1997. – 155 p.
4. *Xie H.* Gyroscope and micromirror design using vertical-axis CMOS-MEMS actuation and sensing. – Carnegie Mellon university, 2002. – 246 p.
5. *Yazdi N., Ayazi F., Najafi K.* Micromachined inertial sensors // Proceeding of the IEEE. – 1998. – vol.86, №8. – p. 1640-1659.

6. *Балычев В.Н., Зотов С.А., Морозова Е.С., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П.* Передаточные функции чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа LL-типа // Нано- и микросистемная техника.– 2007.– №9.– С. 32-34.
7. *Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е.* Интегральный микромеханический гироскоп // Патент России №2266521, 2005. Бюл. №35.

Лысенко Игорь Евгеньевич  
Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.  
E-mail: igor@fep.tsure.ru.  
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.  
Тел.: 8(8634)311-584.

Lysenko Igor Evgenievich  
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.  
E-mail: igor@fep.tsure.ru.  
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.  
Phone: 8(8634)311-584.

УДК 621.3.049.77

**И.Е. Лысенко**

### **ТЕОРИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ LR-ТИПА**

*Описаны принцип функционирования и интегральная конструкция двухосевого микромеханического гироскопа-акселерометра с двумя осями чувствительности LR-типа. Предложено уравнение движения чувствительных элементов ММГА.*

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

**I.E. Lysenko**

### **THEORY OF MICROMACHINED GYROSCOPE-ACCELEROMETER LR-TYPE**

*Principle of operation and design of two-axis micromechanical gyroscope-accelerometer LR-type is described. Gyroscope-accelerometer model are developed.*

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

Одним из направлений развития инерциальных навигационных систем является применение в них микросистем. Интегрированные в подвижный объект микросистемы должны обеспечивать возможность регистрации всех пара-