

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-

метров движения объекта и обладать малыми массой и габаритными размерами [1-4].

Улучшить массогабаритные характеристики навигационных систем и обеспечить возможность регистрации параметров движения подвижного объекта по трем осям, можно применением интегральных многоосевых компонентов. Так как к настоящему времени в России разработаны и изготовлены только одноосевые микромеханические компоненты навигационных систем, то разработка интегральных многоосевых микроэлектромеханических гироскопов-акселерометров, с технической и экономической точек зрения, является значительной и актуальной задачей.

Микромеханические гироскопы (ММГ) LR(RL)-типа совмещают различные комбинации возвратно-поступательного и вращательного движений инерционных масс. Данные сенсоры могут быть изготовлены в рамках любой интегральной технологии изготовления микросистемной техники на одной подложке совместно с элементами интегральных схем [1-6].

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

Проведенный анализ принципов построения и конструкций микромеханических сенсоров угловых скоростей LR-типа и линейных ускорений R-типа [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.

Для обеспечения независимости первичные и вторичные колебания ИМ были предложены принципы построения микромеханических гироскопов 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 технологиче-

скими 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 двухмассовых ММГ LL-типа, является независимость упругих подвесов инерционных масс и, следовательно, сложность обеспечения равенства частот их собственных колебаний и синхронности противофазных первичных и вторичных колебаний [1-4].

На основе принципов построения микромеханических гироскопов LL-типа с ISOD-подвесом и LR-типа, сенсоров линейных скоростей R-типа с торсионными в данной работе разработана и исследована конструкция интегрального одномассового микромеханического гироскопа-акселерометра LR-типа с ISOD-подвесом и двумя осями чувствительности (рис. 1) [7].

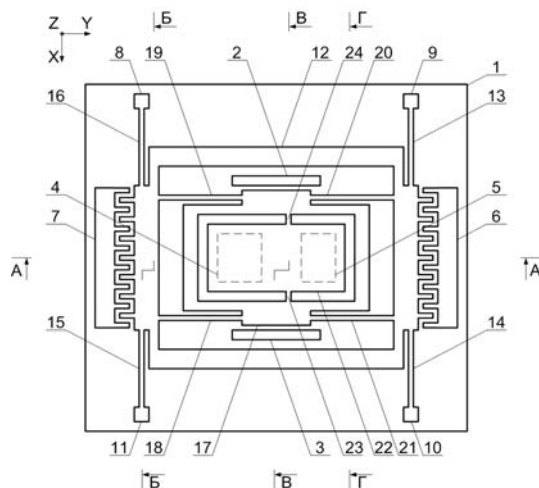


Рис. 1. Топология интегрального ММГА LR-типа с двумя осями чувствительности

Интегральный ММГА содержит подложку 1, неподвижные латеральные и плоские электроды емкостных преобразователей перемещений 2-5, неподвижные гребенчатые электроды электростатических приводов 6 и 7, опоры 8-11 и 18-21, подвижный гребенчатый электрод электростатического привода 12, упругие балки 13-16, внутреннюю рамку 17, инерционную массу 22, торсионные балки 23 и 24.

При выводе уравнения движения чувствительного элемента гироскопа-акселерометра были сделаны следующие предположения: упругие элементы подвеса подвижного гребенчатого электрода электростатических приводов и внутренней рамки имеют конечную жесткость на изгиб в направлениях осей

$X, Y, Z$ ; упругие элементы подвеса инерционной массы имеют бесконечную жесткость на изгиб и конечную жесткость на кручение относительно оси  $X$ .

На рис. 2 представлена система координат упругого подвеса подвижного гребенчатого электрода электростатических приводов ММГА. На рис. 3 представлена система координат упругого подвеса внутренней рамки сенсора. На рис. 4 представлена система координат упругого подвеса инерционной массы ММГА.

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  $Z$ .

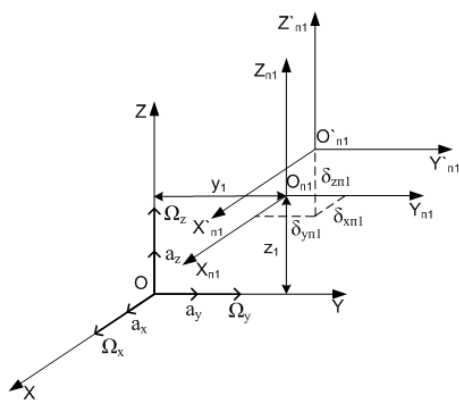


Рис. 2. Система координат упругого подвеса подвижного гребенчатого электрода электростатических приводов ММГА

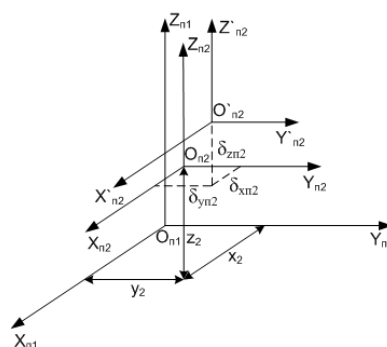


Рис. 3. Система координат упругого подвеса внутренней рамки ММГА

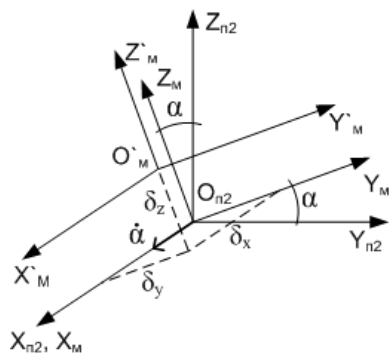


Рис. 4. Система координат упругого подвеса инерционной массы ММГА

Система координат  $X_{n1}Y_{n1}Z_{n1}$ , оси которой параллельны осям  $X, Y, Z$ , определяет положение геометрического центра упругого подвеса (точка  $O_{n1}$ ), определенных координатами  $y_1$  и  $z_1$ , обусловленных конечной жесткостью на изгиб упругих элементов подвеса подвижного гребенчатого электрода электростатических приводов.

Система координат  $X'_{n1}Y'_{n1}Z'_{n1}$ , оси которой параллельны осям  $X_{n1}, Y_{n1}, Z_{n1}$ , определяет положение центра масс упругого подвеса (точка  $O'_{n1}$ ), координатами  $\delta_{xn1}, \delta_{yn1}, \delta_{zn1}$  обусловленных технологическими и температурными погрешностями.

С геометрическим центром внутренней рамки (точка  $O_{п2}$ ) связана система координат  $X_{п2}, Y_{п2}, Z_{п2}$ , положение которой определено координатами  $x_2, y_2, z_2$ . 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 центром масс внутренней рамки (точка  $O'_п2$ ), положение которой определено координатами  $\delta_{xp2}, \delta_{yp2}, \delta_{zp2}$  (обусловленных действием технологических и температурных погрешностей), связана система координат  $X'_{п2}, Y'_{п2}, Z'_{п2}$ . С геометрическим центром инерционной массы (точка  $O_{п2}$ ) связана система координат  $X_M, Y_M, Z_M$ , положение которой определено угловой координатой  $\alpha$ , обусловленной вращением ИМ под действием линейных ускорений и угловых скоростей. С центром масс ИМ (точка  $O'_M$ ), положение которой определено координатами  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ , связана система координат  $X'_M, Y'_M, Z'_M$ .

Уравнение движения предложенного микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений, получаемое на основе уравнения Лагранжа второго рода [1] имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2 + m_M)(\ddot{y}_1 - \Omega_x \dot{z}_1) + (m_2 + m_M)(\ddot{y}_2 - \Omega_x \dot{z}_2 + \Omega_z \dot{x}_2) - \\ & - \left( \Omega_x^2 + \Omega_z^2 \right) \left[ (m_1 + m_2 + m_M)y_1 + (m_2 + m_M)y_2 \right] - \\ & - m_M \left[ (\dot{z}_1 + \dot{z}_2)\dot{\alpha} - (z_1 + z_2)(\ddot{\alpha} + \Omega_z^2 \alpha) + \right. \\ & \left. + x_2 \Omega_z \alpha (\Omega_x + \dot{\alpha}) + (y_1 + y_2)(2\Omega_x \dot{\alpha} + \dot{\alpha}^2) \right] = Q_{y1}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2 + m_M)(\ddot{z}_1 + \Omega_x \dot{y}_1) + (m_2 + m_M)(\ddot{z}_2 + \Omega_x \dot{y}_2 + \Omega_z \dot{x}_2) - \\ & - \Omega_x^2 \left[ (m_1 + m_2 + m_M)z_1 + (m_2 + m_M)z_2 \right] - \\ & - m_M \left[ (z_1 + z_2)(\dot{\alpha}^2 + \Omega_z^2 \alpha^2 + 2\Omega_x \dot{\alpha}) - (y_1 + y_2)(\Omega_z^2 \alpha + \ddot{\alpha}) - \right. \\ & \left. - (\dot{y}_1 + \dot{y}_2)\dot{\alpha} + (\dot{x}_2 \alpha - x_2 \dot{\alpha})\Omega_z \right] = Q_{z1}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_M) \left[ \ddot{x}_2 - \Omega_z (\dot{y}_1 + \dot{y}_2) - \Omega_x \Omega_z (z_1 + z_2) \right] - \\ & - \Omega_z^2 \left[ (m_1 + m_M)x_2 + m_M x_2 \alpha^2 \right] + \\ & + m_M \Omega_z \left[ \dot{\alpha} \left[ (y_1 + y_2)\alpha + (z_1 + z_2) \right] + \right. \\ & \left. + \alpha \left[ (y_1 + y_2)\Omega_x + (\dot{z}_1 + \dot{z}_2) \right] \right] = Q_{x2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_M) \left[ (\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) - \left( \Omega_x^2 + \Omega_z^2 \right) (y_1 + y_2) + \Omega_x (\dot{z}_1 + \dot{z}_2) - \Omega_z \dot{x}_2 \right] - \\ & - m_M \left[ (z_1 + z_2)(\ddot{\alpha} - \Omega_z^2 \alpha) + (\dot{z}_1 + \dot{z}_2)\dot{\alpha} + (y_1 + y_2)(\dot{\alpha}^2 + 2\Omega_z \dot{\alpha}) - \right. \\ & \left. - (\Omega_x + \dot{\alpha})x_2 \Omega_z \alpha \right] = Q_{y2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$(m_1 + m_M) \left[ (\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2) - \Omega_x^2 (z_1 + z_2) + \Omega_x (\dot{y}_1 + \dot{y}_2 + \Omega_z x_2) \right] + \\ + m_M \left[ (y_1 + y_2)(\ddot{\alpha} + \Omega_z^2 \alpha) - (z_1 + z_2)(\dot{\alpha}^2 + 2\Omega_x \dot{\alpha} + \Omega_z^2 \alpha^2) - \right. \\ \left. - \Omega_z (\alpha \dot{x}_2 - \dot{\alpha} x_2) + (\dot{y}_1 + \dot{y}_2) \dot{\alpha} \right] = Q_{z2}; \quad (5)$$

$$A_M \ddot{\alpha} + m_M \left[ \ddot{\alpha} \left[ (y_1 + y_2)^2 + (z_1 + z_2)^2 \right] - (\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2)(z_1 + z_2) + (\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2)(y_1 + y_2) \right] - \\ - \left[ B_M + m_M \left[ (z_1 + z_2)^2 + x_2^2 \right] \right] \Omega_z^2 \alpha + \\ + m_M \Omega_z \left[ (y_1 + y_2) \left[ (\Omega_x + \dot{\alpha}) x_2 + (z_1 + z_2) \Omega_z \right] - \dot{x}_2 (z_1 + z_2) + x_2 (\dot{z}_1 + \dot{z}_2) \right] = Q_\alpha. \quad (6)$$

где  $Q_{y1}$ ,  $Q_{z1}$ ,  $Q_{x2}$ ,  $Q_{y2}$ ,  $Q_{z2}$ ,  $Q_\alpha$  – обобщенные силы.

Предложенные метод построения ММГА LR-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. *Зотов С.А., Тимошенко С.П., Чаплыгин Ю.А.* Особенности динамики элементов микро- и наномеханики углового типа с электростатическим возбуждением // Российские нанотехнологии.– 2006.– №1-2. – С.233-239.
7. *Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е.* Интегральный микромеханический гироскоп // Патент России №2300773. 2007. Бюл. №16.

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.