

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ

Вторушин С.Е., Коледа А.Н., Барбин Е.С.

Научный руководитель: Нестеренко Т.Г., доцент, к.т.н.

Томский политехнический университет, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: vtorushin1991@mail.ru

MEMS GYROSCOPE WITH INTERMEDIATE BODIES

Vtorushin S.E., Koleda A.N., Barbin E.S.

Scientific Supervisor: Doc. Nesterenko T.G.

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: vtorushin1991@mail.ru

В настоящее время активно развиваются направления, связанные с разработкой и созданием малогабаритных, надежных и экономичных инерциальных приборов контроля параметров движения и деформации объектов. Системы контроля необходимы в аэрокосмической, нефтегазовой и железнодорожной отраслях, автомобильной промышленности, медицине, робототехнике. Примером таких разработок являются системы контроля пространственной ориентации скважин и скважинных объектов, инерциальные методы и средства контроля геометрических параметров рельсовых путей, информационно-диагностические системы оценки состояния автомобильных дорог, системы ориентации, навигации и управления с повышенной надежностью, точностью и безопасностью для автомобильного и железнодорожного транспорта [1, 2]. В этих системах основными источниками первичной информации об угловых перемещениях объекта являются микроэлектромеханические гироскопы, метрологические характеристики которых определяют качество создаваемых приборов.

Амплитуда первичных колебаний в микрогироскопе обычно на несколько порядков больше амплитуды информативных колебаний. Для устранения нежелательных связей между этими режимами необходимо их изолировать друг от друга. Желательно, чтобы перемещение сенсорных электродов происходило только при информативных колебаниях вдоль одной оси. Для этого предлагается применение в сенсоре гироскопа промежуточных тел (рис. 1) [3, 4, 5].

Первичное и информативное движение тел сенсора гироскопа происходит в одной плоскости XY. Гребенчатый привод 8 возбуждает первичные колебания рамы 1, установленной на упругом подвесе 4, вдоль оси Y. Внутри этой рамы на упругом подвесе 6 установлено промежуточное тело 2, которое связано с инерционным телом 3 через упругие элементы 5.

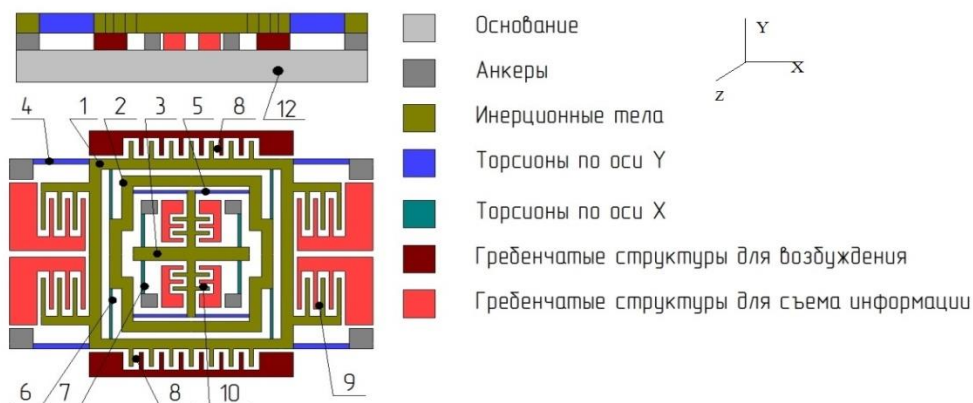


Рис. 1. Функциональная схема однокомпонентного Z-сенсора

Жёсткости упругих элементов таковы, что промежуточное тело совершает первичные колебания вместе с рамой 1. Возникающая при наличии скорости Ω_z сила Кориолиса через промежуточное тело 2

приводит в колебательное движение вдоль оси X инерционное тело 3, установленное в основании 12 на упругом подвесе 7.

Сенсорные электроды 10 связаны с инерционным телом 3, которое совершает информативное движение вдоль оси X , но не участвует в первичном движении. В результате минимизируется нежелательное изменение ёмкости сенсорных электродов из-за первичного движения.

Математическая модель и динамические характеристики сенсора микрогироскопа

Эквивалентная схема сенсора гироскопа, как системы с сосредоточенными массами, представлена на рисунке 2, где m_1, m_2, m_3 – масса рамы 1, промежуточного тела 2 и инерционного тела 3 соответственно, k_1 – жёсткость упругого подвеса 4 по оси Y , k_{2x}, k_{2y} – жёсткость упругого подвеса 6 по осям X и Y , k_{3x}, k_{3y} – жёсткость упругого подвеса 5 по осям X и Y , k_{4x}, k_{4y} – жёсткость упругого подвеса 7 по осям X и Y , μ_x, μ_y – коэффициенты сил вязкого трения.

При проектировании сенсора необходимо обеспечить выполнение соотношений между жесткостями по осям X и Y : $k_{2x} \ll k_{2y}, k_{3y} \ll k_{3x}, k_{4x} \ll k_{4y}$.

Тогда эквивалентная схема сенсора микрогироскопа упрощается (рис. 3).

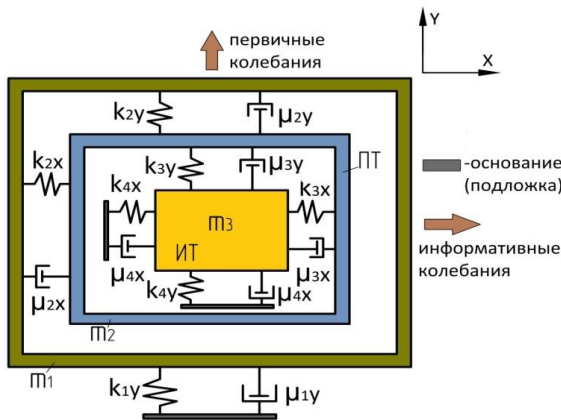


Рис. 2. Эквивалентная схема однокомпонентного Z-сенсора с промежуточным телом

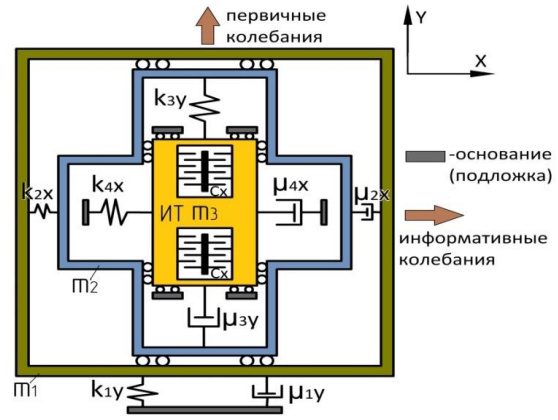


Рис. 3. Упрощённая эквивалентная схема Z-сенсора

В этом случае математическая модель сенсора имеет вид

$$\begin{aligned} m_y \ddot{y} + \mu_y \dot{y} + k_y y &= F_{эл} + m_y a_y, \\ m_x \ddot{x} + \mu_x \dot{x} + k_x x &= 2m_2 \dot{y} \Omega_z - k_{xy} y + m_x a_x, \end{aligned} \quad (1)$$

где введены обозначения: $m_y = m_1 + m_2$; $m_x = m_2 + m_3$; $\mu_y = \mu_{1y} + \mu_{3y}$; $\mu_x = \mu_{4x} + \mu_{2x}$; k_y, k_x – суммарные жёсткости упругих подвесов по осям X и Y ; k_{xy} – перекрёстная жёсткость; $F_{эл} = f_m \sin(qt)$ – гармоническая сила вибропривода, возбуждающая гармонические первичные колебания

$$y(t) = y_m \sin(qt + \varphi_0).$$

Амплитуда и фаза первичных колебаний определяется выражениями

$$y_m = \frac{f_m}{m_y \sqrt{(\omega_y^2 - q^2)^2 + \frac{\omega_y^2 q^2}{Q_y^2}}}, \quad \varphi_0 = \arctg \frac{\omega_y q}{Q_y (\omega_y^2 - q^2)}$$

Из решения системы (1) получим, что информативные колебания инерционного тела вдоль оси X

имеют вид
$$x(t) = \frac{m_2 2 \Omega_z y_m \omega_y}{m_x \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega_x^2}{Q_x^2}}} \cos(\omega_y t + \varepsilon_1),$$

где ω_x , Q_x – собственная частота и добротность информативного канала; ε_1 - сдиг фаз первичных и информативных колебаний. Механический масштабный коэффициент сенсора

$$k_m = \frac{m_2 2\Omega_z y_m \omega_y}{m_x \cdot \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega_x^2}{Q_x^2}}}$$

Перемещение инерционного тела преобразуется в изменение ёмкости C_x , зависящее от величины измеряемой скорости Ω_z .

При наличии ускорения и конечной перекрёстной жёсткости между каналами первичные и вторичные колебания определяются выражениями

$$y(t) = \frac{f_m}{m_y \sqrt{(\omega_y^2 - q^2)^2 + \frac{\omega_y^2 q^2}{Q_y^2}}} \sin(qt + \varphi_0) + \frac{a_{ym}}{\sqrt{(\omega_y^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega^2}{Q_y^2}}} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$x(t) = \frac{m_2 2\Omega_z y_m \omega_y}{m_x \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega_x^2}{Q_x^2}}} \cos(\omega_y t + \varepsilon_1) + \frac{a_{xm}}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega_x^2 \omega^2}{Q_x^2}}} \sin(\omega t + \varepsilon_2) -$$

$$- \frac{k_{xy} y_m}{m_x \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \frac{\omega_y^2 \omega_x^2}{Q_x^2}}} \sin(\omega_y t + \varepsilon_1) \quad (2)$$

Первое слагаемое в выражении (2) определяет полезный сигнал, пропорциональный измеряемой скорости, второе и третье слагаемые определяют погрешности гироскопа.

Выводы

Применение дополнительного промежуточного тела позволяет изолировать информативное перемещение сенсорных электродов от первичного движения, что упрощает систему обработки выходной информации и повышает точность измерения угловой скорости объекта

Работа выполнена в Томском политехническом университете при финансовой поддержке Минобрнауки России, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение № 14.575.21.0068, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57514X0068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстифеев М. И. Основные этапы разработки отечественных микромеханических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 75 – 80.
2. Козин С. А. Технологии МЭМС в разработках интегральных датчиков механических параметров // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 10—14.
3. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 12, NO. 7, JULY 2012. Design of Micromachined Vibratory Gyroscope. With Two Degree-of-Freedom Drive-Mode and Sense-Mode. Wei Wang, , XiaoyongLv, and Feng Sun. Page 2460-2464.
4. JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2006, Inherently Robust Micromachined Gyroscopes With 2-DOF Sense-Mode Oscillator. CenKacar, and Andrei M. Shkel. Page 380-387.
5. IEEE SENSORS 2008 Conference. A Highly Double-Decoupled Self-OscillationGyroscope Operating at Atmospheric Pressure .Haitao Ding, Jian Cui, Xuesong Liu, Xiaozhu Chi, ZhenchuanYang andGuizhen Yan. Page 674-677.