

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, Д. П. ЕЛИСЕЕВ, И. Б. ЧЕЛПАНОВ

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП RR-ТИПА С ПОДВИЖНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Предложена конструкция микромеханического гироскопа RR-типа, стойкого к поступательной вибрации и постоянным линейным ускорениям. Повышение механической стойкости достигается расположением электродов датчиков угла и момента на упругом подвесе с определенной жесткостью. Описываются основные конструктивные особенности предлагаемого гироскопа, приводятся аналитические выражения для соотношения собственных частот подвесов инерционного тела и электрода, а также результаты математического моделирования динамики такого гироскопа на вибрирующем основании.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп RR-типа, подвижный электрод

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) широко используются в различной аппаратуре гражданской и военной техники [1-3]. Повышение требований к техническим параметрам ММГ обусловлено постоянным расширением области применения приборов и инерциальных модулей, в которых ММГ являются датчиками угловых скоростей. Одна из основных проблем при создании ММГ – обеспечение его механической стойкости в различных, в том числе экстремальных, условиях эксплуатации [4-7].

При испытаниях отечественного ММГ RR-типа разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» выявлено существенное усиление амплитуды его выходного сигнала в широкой полосе частот от 20 Гц до 2 кГц, несмотря на то что собственные частоты упругого подвеса (УП) инерционного тела (ИТ) ММГ в виде дискового ротора превышают 3 кГц [8]. Анализ экспериментальных данных показал, что обнаруженные ложные сигналы проявляются на субкратных частотах первичных и вторичных колебаний УП и вызваны нелинейностью характеристик электромеханических элементов системы управления (СУ) [9, 10]. Эта нелинейность порождена использованием плоского конденсатора переменной емкости в качестве преобразователя в датчиках угла (ДУ) и датчиках момента (ДМ) вторичных (выходных) колебаний. Один из электродов конденсато-

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, начальник отдела АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», профессор кафедры Университета ИТМО (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Елисеев Даниил Павлович. Аспирант Университета ИТМО, научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Челпанов Игорь Борисович. Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ведущий научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

ра образован сектором поверхностного слоя дискового ИТ на УП, что при воздействии инерционных нагрузок приводит к нелинейному изменению зазора и, соответственно, к нелинейности СУ.

Существуют различные методы повышения стойкости ММГ к механическим воздействиям [11]. В частности, повышение стойкости к вибрациям достигается путем увеличения собственной частоты УП, калибровки параметров ДУ и ДМ, использования в конструкции многомассовых систем или создания специализированной системы амортизации для чувствительного элемента [12-15]. В качестве одного из перспективных решений предлагается модернизация конструкции ММГ RR-типа для обеспечения инвариантности зазора по отношению к инерционным нагрузкам. Целью работы является обоснование и определение параметров такой конструкции.

Описание и обоснование конструкции ММГ с подвижным электродом

Для обеспечения инвариантности зазора в датчиках СУ при внешних перегрузках плоский конденсатор должен сохранять неизменную величину зазора и быть образован дисковым ИТ на УП и подвижным электродом (ПЭ) на своем УП. При этом собственные частоты поступательных колебаний ИТ и ПЭ в соответствующих УП выбираются равными или по крайней мере близкими. На схеме такого ММГ, представленной на рис.1, ПЭ изображен в виде площадки с двумя парами электродов ДУ и ДМ [16].

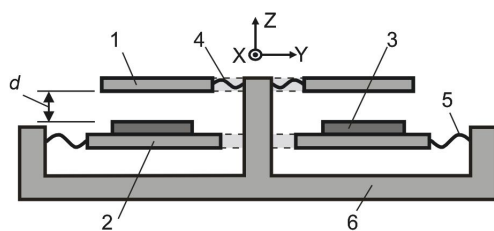


Рис. 1. Схема ММГ с электродами на УП.
1 – ИТ; 2 – площадка ПЭ; 3 – электроды ДУ и ДМ;
4 – УП ИТ; 5 – УП ПЭ; 6 – основание;
 d – зазор между ИТ и ПЭ.

Вследствие воздействия ускорения, например в направлении оси Z , происходят равные деформации УП ИТ и УП ПЭ, обеспечивая неизменность величины зазора между ними. Амплитуды вынужденных перемещений ИТ и ПЭ под действием постоянного или вибрационного ускорений равны или близки (в зависимости от соотношения собственных частот подвесов).

Конструктивно возможна реализация такого УП ПЭ, у которого поступательные жесткости (и, следовательно, соответствующие собственные частоты) по всем трем осям равны соответствующим поступательным жесткостям УП ИТ. В этом случае обеспечивается инвариантность зазора в СУ с точностью до сохранения плоской формы ИТ при внешних инерционных нагрузках [17]. Неизменность зазора и отсутствие относительных перемещений ИТ и ПЭ в СУ выходными (вторичными) колебаниями обеспечивают постоянство масштабного коэффициента прибора и создают нечувствительность ММГ к поступательным вибрациям основания.

Для оценки эффективности предлагаемого решения необходимо провести сравнение с тем, что получается при неподвижном электроде. Относительное изменение масштабного коэффициента δM при действии ускорения для ММГ с неподвижным расположением электродов в основном обусловлено перемещением ИТ вдоль оси Z (рис. 1) и определяется выражением [8]

$$\delta M \approx 2 W_z(\omega_{z1}^2 d)^{-1}, \quad (1)$$

где ω_{z1} – собственная частота поступательных колебаний ИТ на УП по оси Z ; d

– номинальный зазор; W_z – ускорение вдоль оси Z .

Изменение зазора при ускорении равно прогибу УП ИТ: $z_1 \approx W_z \omega_{z1}^{-2}$, приводящему к относительному изменению масштабного коэффициента $\delta M \approx 2z_1/d$.

В случае, когда электроды СУ выходными колебаниями закреплены на ПЭ в УП, изменение зазора составит

$$z = z_1 - z_2 \approx W_z [\omega_{z1}^{-2} - \omega_{z2}^{-2}] \quad (2)$$

где ω_{z2} – собственная частота поступательных колебаний площадки ПЭ на УП по оси Z ; z_2 – прогиб УП ПЭ.

Введя обозначение $\delta\omega = (\omega_{z2} - \omega_{z1})/\omega_{z1}$ для относительной разности собственных частот подвесов, из выражения (2) получим:

$$z = W_z \omega_{z1}^{-2} \delta\omega (2 + \delta\omega) (1 + \delta\omega)^{-2} \approx 2 W_z \omega_{z1}^{-2} \delta\omega (1 + 2\delta\omega)^{-1} \quad (3)$$

Даже при относительном несовпадении частот обоих подвесов на уровне $\delta\omega = 10\%$ согласно выражению (3) изменение зазора в предлагаемой конструкции z уменьшится примерно в 6 раз по сравнению с z_1 . Максимальное подавление воздействия ускорений достигается при точном совпадении собственных частот поступательных колебаний ИТ и ПЭ на соответствующих УП, при этом $z = 0$ и масштабный коэффициент не зависит от ускорений.

Аналогичная ситуация возникает при действии вибрационных ускорений. При наличии вибрации вдали от резонанса как ИТ, так и ПЭ совершают вынужденные синфазные поступательные колебания в направлении действия вибрации. При равенстве собственных частот поступательных колебаний УП ИТ и ПЭ амплитуды вынужденных колебаний под воздействием вибрации равны и зазор в ДУ и ДМ остается постоянным. При этом относительные колебания между ИТ и ПЭ отсутствуют и, соответственно, уменьшаются помехи прибора от инерционных воздействий.

Результаты предварительной конструктивной проработки ММГ RR-типа с ПЭ на УП показаны на рис. 2. Конструкция состоит из последовательно соединенных друг с другом четырех пластин. Первая пластина (на рисунке не показана) является крышкой, обеспечивающей герметизацию внутреннего объема, в котором расположено ИТ, во второй пластине сформирован ИТ в виде диска со своим УП, а в третьей пластине – ПЭ и его УП, четвертая пластина представляет собой основание с электрическими контактами. В третьей пластине имеются отверстия (окна) для прохода выступов крепления ИТ и статоров гребенчатого электростатического двигателя, расположенных на основании. Таким образом, в соответствии со схемой (рис. 1) конструктивно может обеспечиваться независимое крепление ИТ и

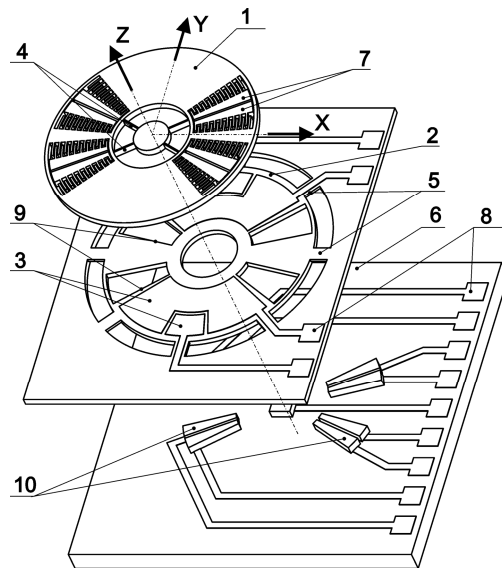


Рис. 2. Конструкция ММГ с ПЭ на УП: 1 – ИТ; 2 – площадка ПЭ; 3 – электроды ДУ и ДМ; 4 – УП ИТ; 5 – УП ПЭ; 6 – основание; 7 – статоры гребенчатого двигателя первичных колебаний; 8 – электрические контакты; 9 – окна в ПЭ; 10 – выступы на основании.

ПЭ на основании. Технологически формирование геометрии ИТ и ПЭ возможно осуществить при помощи глубокого анизотропного травления, а соединение пластин между собой – при помощи диффузионной сварки по контрольным меткам с использованием инфракрасного микроскопа.

Предлагаемая конструкция ММГ позволит уменьшить габариты прибора и зависимость масштабного коэффициента от изменений положения ИТ при деформации его УП, эффективно снизить чувствительность прибора к воздействию инерционных перегрузок и тем самым повысить устойчивость ММГ к вибрациям и линейным ускорениям.

Одно из требований к УП ПЭ состоит в минимизации дополнительных погрешностей ММГ при измерении угловой скорости вследствие подвижности электрода. Минимальное измеряемое угловое отклонение ИТ по оси вторичных колебаний X под действием ускорений Кориолиса определяется выражением [18]:

$$\alpha_1 = 2\gamma_1 Q_\alpha \Omega_{\min} \omega_{\alpha 1}^{-1}, \quad (4)$$

где γ_1 – амплитуда угла первичных колебаний ИТ по оси Z ; Q_α – добротность контура вторичных колебаний; $\Omega_{\min}$ – минимальное значение измеряемой угловой скорости (нижнее значение диапазона измерений); $\omega_{\alpha 1}$ – собственная частота вторичных колебаний УП ИТ, совпадающая с собственной частотой первичных колебаний $\omega_{\gamma 1}$.

Максимальный угол поворота ПЭ вокруг оси X образуется под действием максимального углового ускорения основания

$$\alpha_2 = \varepsilon_x \omega_{\alpha 2}^{-2} = B \Omega_{\max} \omega_{\alpha 2}^{-2} = B \delta_\Omega \Omega_{\min} \omega_{\alpha 2}^{-2}, \quad (5)$$

где ε_x – максимальное угловое ускорение основания вокруг оси X ; $\omega_{\alpha 2}$ – собственная частота угловых колебаний УП ПЭ по оси X ; B – ширина полосы пропускания (частотный диапазон); $\Omega_{\max}$ – максимальное значение измеряемой угловой скорости; δ_Ω – относительный динамический диапазон измерений.

Для обеспечения показателей точности ММГ во всем диапазоне измерений необходимо выполнение условия $\alpha_1 > \alpha_2$. Учитывая формулы (4) и (5), получим требование к превышению собственных частот угловых колебаний УП ПЭ над собственными частотами угловых колебаний УП ИТ:

$$N_\omega = \frac{\omega_{\alpha 2}}{\omega_{\alpha 1}} = \sqrt{\frac{B \delta_\Omega}{2 \omega_{\alpha 1} \gamma_1 Q_\alpha}} \quad (6)$$

При параметрах ММГ типа ММГ-2 [19] $B = 100$ Гц; $\delta_\Omega = 1000$; $\omega_{\alpha 1} = 3$ кГц; $\gamma_1 = 1^\circ$; $Q_\alpha = 10$ по формуле (6) получаем $N_\omega = 9,8$. В случае с ММГ типа ММГ-ЭПТРОН при $\omega_{\alpha 1} = 8$ кГц [15] и сохранении остальных значений параметров получим $N_\omega = 6$.

Предполагается, что упругие элементы УП ПЭ расположены в плоскости площадки с ее внешней стороны симметрично относительно оси, перпендикулярной плоскости ИТ (рис. 2). Внешнее расположение упругих элементов УП ПЭ позволяет создать подвес с угловой жесткостью, значительно превосходящей угловую жесткость УП ИТ, упругие элементы которого расположены внутри центрального отверстия ИТ. Это существенно повышает собственные частоты угловых колебаний УП ПЭ по отношению к собственным частотам угловых колебаний УП ИТ, что создает минимальные искажения показаний ММГ при измерении угловой скорости основания.

Оценим технологическую возможность достижения соотношения частот согласно выражению (6). Допустим, размеры, масса и моменты инерции ИТ и ПЭ

равны. Тогда соотношение угловых жесткостей подвесов будет равно N_ω^2 . Положим, что УП ИТ и УП ПЭ содержат по четыре одинаковых прямоугольных упругих элемента в виде стержней, равномерно радиально расположенных, но отстоящих от центра подвеса на разные расстояния. Угловые жесткости подвесов в этом случае определяются соответственно выражениями [20]:

$$C_{\alpha 1} = 2 \left[\frac{G\beta h b^3}{l} + \frac{E b h^3}{3l} \left(\frac{3R_1^2}{l^2} + 1 \right) \right]; \quad C_{\alpha 2} = 2 \left[\frac{G\beta h b^3}{l} + \frac{E b h^3}{3l} \left(\frac{3R_2^2}{l^2} + 1 \right) \right] \quad (7)$$

Здесь $C_{\alpha 1}$, $C_{\alpha 2}$ – угловые жесткости УП ИТ и ПЭ соответственно; E – модуль Юнга; G – модуль сдвига материала подвесов; l , b , h – длина, ширина и толщина стержня; β – коэффициент кручения; R_1 , R_2 – расстояния от центра соответствующего подвеса до центра стержня.

Предполагая, что подвесы ИТ и ПЭ выполнены из одинакового материала, и пренебрегая крутильной жесткостью, с учетом выражений (7) и соотношения $C_{\alpha 1}/C_{\alpha 2} = N_\omega^2$ имеем:

$$R_2 = \sqrt{N_\omega^2 \left(R_1^2 + \frac{l^2}{3} \right) - \frac{l^2}{3}} \quad (8)$$

При параметрах подвеса $R_1 = 0,25$ мм и $l = 0,3$ мм и с учетом требования $N_\omega = 6$, получим из выражения (8) значение $R_2 = 1,8$ мм, что сравнимо с радиусом дискового ИТ, составляющим 1,5 мм. Это доказывает практическую реализуемость представленной на рис. 2 конструкции. При $N_\omega = 10$ получаем значение $R_2 = 3$ мм, что превосходит размеры датчика. Для удовлетворения требования к соотношению частот в соответствии с формулой (8) необходима более сложная конструкция УП ПЭ.

Математическая модель ММГ с ПЭ

Для исследования ММГ с ПЭ при наличии вибрации по оси Z за основу принята математическая модель, учитывающая электромеханические взаимодействия в емкостных преобразователях [9], которая дополнена системой уравнений движения ПЭ. Эта модель представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\ddot{z}_1 + 2\xi_{z1}\omega_{z1}\dot{z}_1 + \omega_{z1}^2 z_1 = W_z + (W_1 + W_2),$$

$$\ddot{\gamma}_1 + 2\xi_{\gamma 1}\omega_{\gamma 1}\dot{\gamma}_1 + \omega_{\gamma 1}^2 \gamma_1 = \varepsilon_\gamma^B, \quad (9)$$

$$\ddot{\alpha}_1 + 2\xi_{\alpha 1}\omega_{\alpha 1}\dot{\alpha}_1 + \omega_{\alpha 1}^2 \alpha_1 = -2\Omega_y \dot{\gamma}_1 + \varepsilon_{\alpha 1}^{DM},$$

$$\ddot{z}_2 + 2\xi_{z2}\omega_{z2}\dot{z}_2 + \omega_{z2}^2 z_2 = W_z - (W_1 + W_2),$$

$$\ddot{\alpha}_2 + 2\xi_{\alpha 2}\omega_{\alpha 2}\dot{\alpha}_2 + \omega_{\alpha 2}^2 \alpha_2 = -\varepsilon_{\alpha 2}^{DM}, \quad (10)$$

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \quad (11)$$

$$z = z_1 - z_2,$$

$$F_1 = k_{DM1} U_1^2 (d - z - \alpha R)^{-2},$$

$$F_2 = k_{DM2} U_2^2 (d - z + \alpha R)^{-2},$$

$$M_{DM}(\alpha) = (F_1 - F_2)R, \quad (12)$$

$$k_{DM1} = \frac{1}{2}\varepsilon_A S_{DM1}; \quad k_{DM2} = \frac{1}{2}\varepsilon_A S_{DM2},$$

$$\begin{aligned} C_1 &= k_{\text{ДУ}1} (d - z - \alpha R)^{-1}, \\ C_2 &= k_{\text{ДУ}2} (d - z + \alpha R)^{-1}, \\ \Delta C &= C_1 - C_2, \\ k_{\text{ДУ}1} &= \varepsilon_A S_{\text{ДУ}1}; \quad k_{\text{ДУ}2} = \varepsilon_A S_{\text{ДУ}2}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} U_1 &= u_0 + \Delta C K_{\text{ПЕН}}, \\ U_2 &= u_0 - \Delta C K_{\text{ПЕН}}. \end{aligned} \quad (14)$$

В уравнениях (9)-(14) использованы следующие обозначения:

$\xi_{z1}, \xi_{y1}, \xi_{\alpha1}, \xi_{z2}, \xi_{\alpha2}$ – коэффициенты затухания соответствующих контуров колебаний ИТ и ПЭ; Ω_y – измеряемая угловая скорость; $\varepsilon_y^B = M_{y1}^B/J_{z1}$ – угловое ускорение, вызванное моментом сил возбуждения M_{y1}^B по оси первичных колебаний; $\varepsilon_{\alpha1}^{\text{ДМ}} = M_{\text{ДМ}}(\alpha)/J_{x1}$; $\varepsilon_{\alpha2}^{\text{ДМ}} = M_{\text{ДМ}}(\alpha)/J_{x2}$ – угловые ускорения от момента управляющего воздействия, прикладываемого ДМ к ИТ и ПЭ соответственно; J_{x1}, J_{z1} – моменты инерции ИТ по осям X и Z; J_{x2} – момент инерции ПЭ по оси X; $S_{\text{ДМ}1}, S_{\text{ДМ}2}, S_{\text{ДУ}1}, S_{\text{ДУ}2}$ – площади электродов ДМ и ДУ; ε_A – абсолютная диэлектрическая проницаемость; R – средний радиус расположения электродов; C_1 и C_2 – емкости на электродах ДУ; U_1, U_2 – переменные напряжения на электродах ДМ, обеспечивающие демпфирование вторичных колебаний; u_0 – опорное напряжение в СУ; $K_{\text{ПЕН}}$ – передаточная функция преобразователя «емкость-напряжение»; $W_1 = F_1/m_1, W_2 = F_2/m_2$ – ускорения, создаваемые силами F_1 и F_2 на электродах ДМ; m_1, m_2 – массы ИТ и ПЭ.

В системе уравнений (9) не учитывается влияние напряжений U_1 и U_2 на изменение собственных частот $\omega_{\alpha1}, \omega_{\alpha2}, \omega_{z1}, \omega_{z2}$ и формирование электрических пружин. Влияние вибрации на вторичные угловые колебания ИТ определяется членом $\varepsilon_{\alpha}^{\text{ДМ}}$, так как характеристики ДМ и создаваемые ими моменты зависят от поступательного движения по оси OZ.

При выполнении условия (6) и $\delta\omega = 0$ разность перемещений ИТ относительно ДУ и ДМ $z = 0$, а угловое отклонение ПЭ пренебрежимо мало и $\alpha = \alpha_1$. Благодаря этому инерционные нагрузки не влияют на емкостные характеристики ДУ и ДМ и выходной сигнал датчика пропорционален только угловому отклонению ИТ α_1 .

Блок-схема математической модели (9)-(14) представлена на рис. 3.

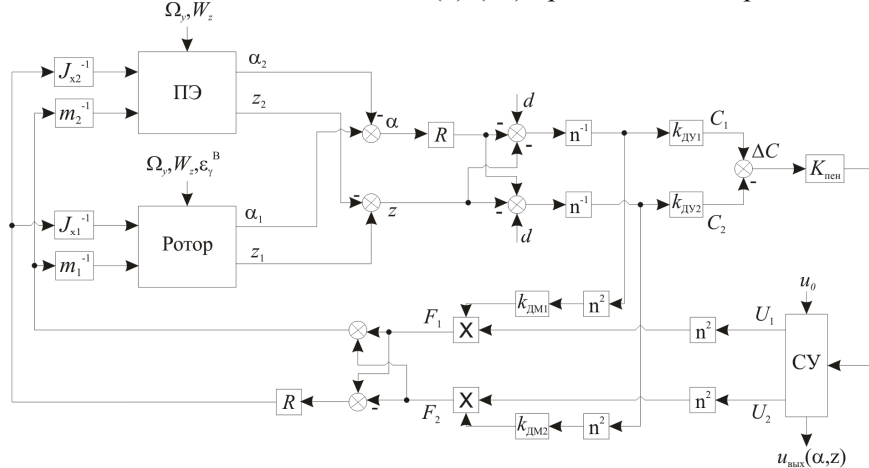


Рис.3. Блок-схема модели ММГ с ПЭ.

n^{-1}, n^2 – операторы преобразования; $u_{\text{вых}}(\alpha, z)$ – выходной сигнал ММГ.

Модель СУ первичными и вторичными колебаниями ИТ заимствована из существующего ММГ-2 [21] и уточнена с учетом электромеханических взаимодействий [9, 10]. Процедура синхронной демодуляции и выделения полезного сигнала осуществляется в СУ в соответствии с [9].

Компьютерное моделирование

Полученная математическая модель ММГ с ПЭ (9)-(13) спроектирована в среде Simulink. Моделирование проводилось при численных значениях параметров, соответствующих ММГ типа ММГ-2 и ММГ-ЭПТРОН. Для первого типа гироскопа собственные частоты УП равняются: $\omega_{a1} = 20\,420$ рад/с (3250 Гц), $\omega_{\gamma1} = 18\,944$ рад/с (3015 Гц) и $\omega_{z1} = 57\,805$ рад/с (9200 Гц), для второго: $\omega_{a1} = 51\,836$ рад/с (8250 Гц), $\omega_{\gamma1} = 50\,265$ рад/с (8000 Гц) и $\omega_{z1} = 169\,646$ рад/с (27 000 Гц). Остальные значения параметров у обоих типов ММГ одинаковые: $\varepsilon_A = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\omega_{z2} = \omega_{z1}(1 + \delta\omega)$; $\delta\omega = \pm 10\%$; $\xi_{a1} = \xi_{a2} = 5 \cdot 10^{-5}$; $\xi_{z1} = \xi_{z2} = 2 \cdot 10^{-4}$; $\xi_{\gamma1} = 5 \cdot 10^{-6}$; $m_1 = m_2 = 8 \cdot 10^{-7}$ кг; $J_{x1} = J_{x2} = 5.25 \cdot 10^{-13}$ кг·м²; $J_{z1} = 7.26 \cdot 10^{-13}$ кг·м²; $S_{DM1} = 0.3$ мм²; $S_{DM2} = 0.9 \cdot S_{DM1}$; $S_{DU1} = 1$ мм²; $S_{DU2} = 0.9 \cdot S_{DU1}$; $d = 2$ мкм; $R = 1.025$ мм; $\Omega_y = 0 \dots 100$ °/с.

Результаты моделирования динамики ММГ с ПЭ при воздействии вибраций с амплитудой ускорения $W_z = 10$ g в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц в направлении оси Z подтвердили ожидаемую эффективность предлагаемого метода повышения стойкости ММГ к поступательным ускорениям. При совпадении частот ω_{z1} и ω_{z2} отсутствует изменение зазора z в направлении оси Z. На рис. 4а показаны графики изменения зазоров в конструкциях ММГ с частотой первичных колебаний 3 и 8 кГц.

При несовпадении частот эффективность метода снижается: при $\delta\omega = 10\%$ изменение зазора z в предлагаемой конструкции уменьшится лишь в 2-3 раза по сравнению с конструкцией ММГ с неподвижным расположением электродов. Отметим, что обеспечить значение $|\delta\omega| = 10\%$ технологически возможно на этапе изготовления ЧЭ [22], но для более точного совпадения частот потребуется использование электромеханических устройств типа электрической пружины. На рис. 4б показана эффективность использования ПЭ для повышения стабильности масштабного коэффициента.

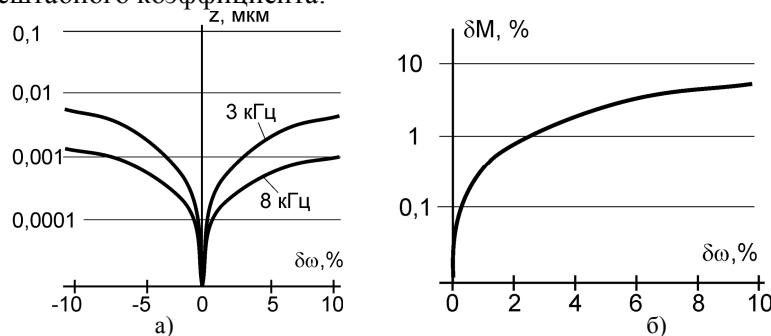


Рис. 4. Изменение зазора z между ИТ и ПЭ (а) и изменение масштабного коэффициента (б) при относительном несовпадении частот $\delta\omega$ обоих УП.

Результаты моделирования согласуются с аналитическими выводами.

1. Совпадение частот ω_{z1} и ω_{z2} обеспечивает инвариантность зазора между ИТ и ПЭ по отношению к поступательным вибрациям.

2. Несовпадение частот $\delta\omega = 10\%$ соответствует уменьшению изменений зазора z в 5-6 раз, что существенно сокращает амплитуду ложного сигнала на субкратных частотах.

3. Предлагаемая конструкция одинаково эффективна для конструкций ММГ с собственной частотой подвеса ИТ 3 и 8 кГц.

На рис. 5 представлен график выходного сигнала ММГ 3 кГц с ПЭ и без него при моделировании воздействия вибрации с амплитудой ускорения $10g$ в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц по оси Z . Полученные результаты показывают, что при $\delta\omega = 0\%$ в выходном сигнале остается только шумовая составляющая, при $\delta\omega = 10\%$ наблюдается существенное уменьшение амплитуды ложного сигнала на частоте 1500 Гц (вторая субкратная гармоника частоты собственных колебаний $\omega_{\gamma 1}$).

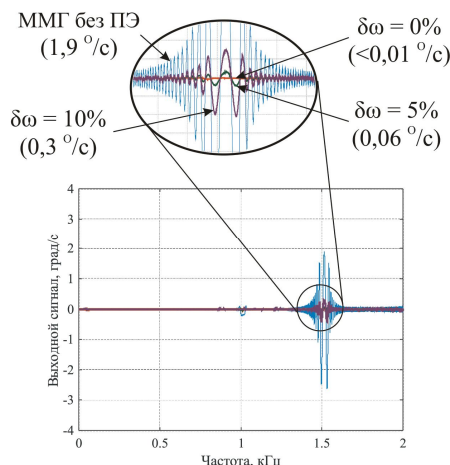


Рис. 5. Выходной сигнал ММГ при воздействии вибрации с амплитудой ускорения $10g$. В скобках указана амплитуда ложного сигнала

Проведено моделирование динамики угловой скорости основания в условиях воздействия вибрации. На рис.6 показано изменение выходного сигнала ММГ-2 при постоянной угловой скорости, равной $1^\circ/\text{с}$, при вибрации основания с амплитудой виброускорения $10g$ на частоте 1500 Гц. При перечисленных входных воздействиях на ММГ без ПЭ или с ним, но при $\delta\omega \neq 0\%$ частота выходного сигнала составляет 15 Гц, что соответствует разности частот $\omega_{\gamma 1} - i\nu_z$, где ν_z – частота действующей вибрации, а i – порядок кратности. Это объясняется процедурой синхронной демодуляции в СУ [9, 23].

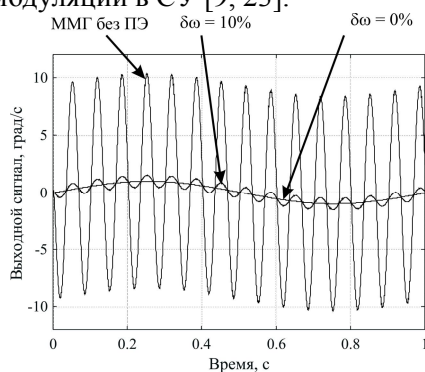


Рис.6. Измерение угловой скорости в условиях вибрации

Как видно из рис. 6, использование ПЭ значительно повышает виброустой-

чивость ММГ. Реализация такой конструкции позволяет достичь параметров устойчивости ММГ к внешним механическим воздействиям на уровне лучших зарубежных образцов [24].

Заключение

Рассмотрен микромеханический гироскоп RR-типа с малой чувствительностью к линейным ускорениям (постоянным и вибрационным). Такое свойство достигается в модифицированной конструкции за счет обеспечения упругой подвижности ранее неподвижных (для существующих ММГ) электродов электростатических датчиков вторичных колебаний. Получена математическая модель динамики ММГ с ПЭ и проведено компьютерное моделирование, которое подтвердило эффективность введения в конструкцию предлагаемых изменений. Показано, что это позволяет существенно уменьшить чувствительность прибора к воздействию инерционных перегрузок и сократить дополнительные погрешности ММГ от поступательных вибраций и линейных ускорений. Рассматриваемая модифицированная конструкция ММГ позволяет уменьшить габариты прибора по сравнению с аналогами и снизить зависимость масштабного коэффициента от воздействия инерционных сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В. Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем / В. Г. Пешехонов [и др.] // Гироскопия и навигация. 2011. № 1. С. 3–16.
2. **Пешехонов В. Г.** Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы / В. Г. Пешехонов [и др.] // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. № 19. С. 108–114.
3. **Barbour N.** Inertial MEMS System Applications / N. Barbour [et al.] // Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. 2004. P. 7-1–7-12.
4. **Geen J.** Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine. November, 2004. P. 12–17.
5. **Weinberg H.** Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. September 2011. pp. 1–5.
6. **Nguyen C.** The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) Program: Success and Some Unfinished Business // Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, June 2012. P. 1–3.
7. **Евстифеев М. И.** Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. 2013. № 1. С. 119–133.
8. **Евстифеев М. И.** Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, А. С. Ковалев, Д. В. Розенцвейн // Гироскопия и навигация. 2011. № 1. С. 49–58.
9. **Евстифеев М. И.** Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа RR-типа с учетом вибраций основания / М. И. Евстифеев, А. С. Ковалев, Д. П. Елисеев // Гироскопия и навигация. 2013. № 3. С. 24–32.
10. **Елисеев Д. П.** Исследование влияния линейных вибраций на ММГ RR-типа с учетом нелинейности емкостных датчиков / Д. П. Елисеев, А. С. Ковалев // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 2014. С. 406–412.
11. **Евстифеев М. И.** Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. 2014. № 4. С. 56–68.
12. **Habibi S.** Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / S. Habibi [et al.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008, May 6–8 2008. pp. 232-237.
13. **Sang Won Yoon.** Vibration Isolation and Shock Protection for MEMS // University of Michigan Ph.D. Dissertation. 2009. 208 p.

14. **Евстифеев М. И.** Использование многомассовых систем для повышения вибростойкости микромеханических гироскопов / М. И. Евстифеев, Д. В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 1. С. 40–44.
15. **Некрасов Я. А.** Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа / Я. А. Некрасов [и др.] // Материалы XXI Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам. 2014. С. 226–235.
16. Патент 2561006 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». № 2014123821/28; заявл. 10.06.2014; опубл. 20.08.2015; Бюл. № 23. 9 с.
17. **Евстифеев М. И.** Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах / М. И. Евстифеев, Д. В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 4. С. 46–50.
18. **Евстифеев М. И.** Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2004. № 1. С. 26–39.
19. **Пешехонов В. Г.** Результаты разработки микромеханического гироскопа / В. Г. Пешехонов [и др.] // Гироскопия и навигация. 2005. № 3. С. 44–51.
20. **Евстифеев М. И.** Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. 2007. № 2. С. 63–76.
21. **Ковалев А. С.** К вопросу построения контура обратной связи микромеханического гироскопа / А. С. Ковалев, Д. Г. Грязин, Д. И. Лычев, Ю. В. Шадрин // РАН. Научное приборостроение. Т. 17, выпуск 1. 2007. С. 91–97.
22. **Евстифеев М. И.** Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа / М. И. Евстифеев, А. А. Унтилов // Гироскопия и навигация. 2003. № 2. С. 24–31.
23. **Ефремов Р. С.** Микромеханический датчик угловой скорости с повышенной вибростойкостью / Р. С. Ефремов, О. Н. Куликова // Материалы XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 2013. С. 225–229.
24. **ADXRS646.** High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope / Data Sheet. AnalogDevices. 2012. 12 p.

Evstifeev M. I., Eliseev D. P., Chelpanov I. B. (Concern CSRI Elektropribor, JSC)
MEMS RR-type gyro with a moving electrode // *Гироскопия и Навигация*. 2015. № 4 (91).
Р. 67–76.

Abstract. A MEMS RR-type gyro design is proposed, which is immune to translational vibrations and constant linear accelerations. Mechanical immunity is enhanced by arranging the electrodes of angle sensors and torques on elastic suspension with certain rigidity. Main design features of the gyro are described, analytical expressions are given for the ratio of suspension and electrode eigenfrequencies, and results of mathematical modeling of gyro dynamics on vibrating foundation are provided.

Key words: MEMS RR-type gyro, moving electrode

Материал поступил 22.07.15