

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, А. С. КОВАЛЕВ, Д. П. ЕЛИСЕЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА R-R ТИПА
С УЧЕТОМ ВИБРАЦИЙ ОСНОВАНИЯ**

Приведены результаты разработки электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа, учитывающей нелинейные эффекты и неравенство характеристик датчиков угла и момента. Исследованы причины появления резонансных пиков на субгармониках при вибрации основания, и определены требования к характеристикам элементов системы управления.

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) представляют собой миниатюрные датчики угловой скорости, которые используются, как правило, без специализированных амортизирующих средств [1-3]. Принцип работы большинства ММГ аналогичен принципу работы осцилляторных вибрационных гироскопов, согласно которому при первичных колебаниях инерционного тела (ИТ) и воздействии угловой скорости основания возникают вторичные колебания ИТ под действием сил Кориолиса. В настоящее время в связи с расширением областей использования ММГ особое внимание уделяется вопросам вибростойкости таких приборов [4]. Важным направлением в разработке новых ММГ является использование упругих систем с несколькими ИТ. Фирма Analog Devices в 2011 году представила разработку нового четырехмассового ММГ ADXRS646 с пониженной чувствительностью к линейным ускорениям и вибрации [5]. Однако такие системы достаточно сложны в части как конструкции, так и системотехники.

Использование ММГ с одним ИТ имеет свои перспективы при условии тщательного анализа составляющих инструментальных погрешностей прибора, в том числе чувствительности к вибрации, и выработки мер по их снижению.

Испытания конструкции ММГ-2 разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (R-R типа с одним ИТ), проведенные в 2010 году, показали наличие резонансных явлений в полосе частот от 20 Гц до 2 кГц [6]. Эксперименты, выполненные в 2012 году на следующих образцах ММГ-2, подтвердили наличие субгармонических резонансов при действии вибрации. Однако согласно расчетам, выполненным методом конечных элементов, механическая компонента ММГ (ИТ в упругом подвесе) не имеет собственных частот ниже 3 кГц. Упрочнение внешних элементов, таких как печатная плата, на которой установлен ММГ, и кронштейн крепления ММГ к вибростенду, не дало желаемых результатов. Более подробный анализ экспериментальных данных показал, что выяв-

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Ковалев Андрей Сергеевич. Кандидат технических наук, начальник лаборатории ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член молодежной секции Академии навигации и управления движением.

Елисеев Даниил Павлович. Инженер-конструктор ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

ленные резонансы проявляются на частотах, кратных частотам первичных и вторичных колебаний. Наличие таких субгармонических колебаний может быть объяснено присутствием нелинейностей в мехатронной системе «механическая компонента – система управления (СУ)».

Настоящая статья посвящена вопросам построения электромеханической модели ММГ R-R типа, учитывающей взаимодействия со стороны СУ при учете нелинейности и неравенства характеристик датчиков угла (ДУ) и датчиков момента (ДМ), входящих в СУ [7, 8]. Цель создания такой модели состоит в выявлении факторов, вызывающих субгармонические колебания ИТ при вибрации основания, и определения путей повышения вибростойкости ММГ R-R типа.

Построение электромеханической модели

Схема чувствительного элемента ММГ показана на рис. 1. Упругие элементы и ИТ в виде диска диаметром 3 мм и толщиной 60 мкм выполнены из монокристаллического кремния. При наличии относительных первичных угловых колебаний ИТ γ по оси OZ , возбуждаемых электростатическим двигателем, и переносной угловой скорости Ω основания по оси OY силы Кориолиса обуславливают возникновение вторичных угловых колебаний α по оси OX , измеряемых емкостными ДУ вторичных колебаний, расположенными под диском. ДМ оказывают управляющие воздействия на ИТ.



Рис.1. Схема ММГ R-R типа

Для выявления влияния электромеханических взаимодействий использована упрощенная модель динамики ММГ, не учитывающая такие факторы, как статический и динамический дисбалансы, которые подробно исследованы в работе [9]. В механической модели рассматриваются поступательные движения ИТ вдоль оси OZ и угловые колебания ИТ по осям OX и OZ :

$$\begin{aligned} \ddot{z} + 2\xi_z \omega_z \dot{z} + \omega_z^2 z &= W_z, \\ \ddot{\gamma} + 2\xi_\gamma \omega_\gamma \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma &= m_\gamma^B, \\ \ddot{\alpha} + 2\xi_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha &= -2\Omega\dot{\gamma} + m_\alpha^{DM}. \end{aligned} \quad (1)$$

где γ, α – углы поворота ИТ относительно корпуса прибора по осям первичных и вторичных колебаний соответственно; ω_z, ξ_z – собственная частота и показатель колебательности контура колебаний ИТ по оси OZ ; $\omega_\gamma, \xi_\gamma$ и $\omega_\alpha, \xi_\alpha$ – соответственно собственные частоты и показатели колебательности контуров первичных и вторичных колебаний; W_z – вибрационное ускорение по оси OZ ; Ω – измеряемая угловая скорость; $m_\gamma^B = M_\gamma^B/J_z$ – угловое ускорение, вызванное моментом сил возбуждения по оси первичных колебаний, $m_\alpha^{DM} = M_{DM}(\alpha)/J_x$ – угловое ускорение от момента управляющего воздействия, прикладываемого ДМ. В системе уравнений (1) влияние вибрации на вторичные колебания ИТ определяется членом m_α^{DM} , так как характеристики ДМ и прикладываемый момент зависят от поступательного движения по оси OZ .

Выходной сигнал является в общем случае амплитудно-модулированным и

определяется выражением

$$u_{\text{мод}}(t) = K_{\text{ЕН}}K_{\text{ДУ}}(\alpha)\alpha(t) = K_{\text{ЕН}}K_{\text{ДУ}}(\alpha)A(\Omega)\cos\omega_{\gamma}t \quad (2)$$

где $A(\Omega)$ – огибающая вторичных колебаний, содержащая информацию о действующей угловой скорости Ω ; $K_{\text{ДУ}}(\alpha)$ – коэффициент преобразования ДУ, нелинейно зависящий от угла α ; $K_{\text{ЕН}}$ – коэффициент преобразователя «емкость-напряжение». Выражение (2) справедливо при резонансном автогенераторном возбуждении и не учитывает квадратурную составляющую, для борьбы с которой предложено большое количество решений [10-12].

Для выделения составляющей $A(\Omega)$ применяется процедура синхронной демодуляции, при которой сигнал ММГ по оси вторичных колебаний перемножается на опорный сигнал $u_0 = 2\cos\omega_{\gamma}t$. В этом случае результирующий сигнал примет вид

$$u_{\text{демод}}(t) = K_{\text{ЕН}}K_{\text{ДУ}}(\alpha)A(\Omega) + K_{\text{ЕН}}K_{\text{ДУ}}(\alpha)A(\Omega)\cos 2\omega_{\gamma}t, \quad (3)$$

Второе слагаемое отфильтровывается фильтром низких частот, а оставшееся слагаемое является выходным сигналом ММГ

$$u_{\text{вых}} = K_{\text{ЕН}}K_{\text{ДУ}}(\alpha)A(\Omega) \quad (4)$$

Конструктивное оформление ДУ и ДМ выполнено в виде двух пар емкостных обкладок, расположенных симметрично относительно центра ИТ. Вследствие технологических погрешностей возникает неравенство их характеристик. В общем случае под неравенством характеристик следует понимать неравенство площадей обкладок, неравномерный зазор между ИТ и обкладками ДУ и ДМ, наличие различных «паразитных» емкостей, неравенство прикладываемых напряжений и пр.

Изменения коэффициентов преобразования ДУ и ДМ при поступательном движении ИТ в электромеханической модели учитываются в виде следующих факторов:

- неравенство емкостных характеристик ДУ и ДМ;
- изменение зазоров в ДУ и ДМ при движении ИТ вследствие вибраций.

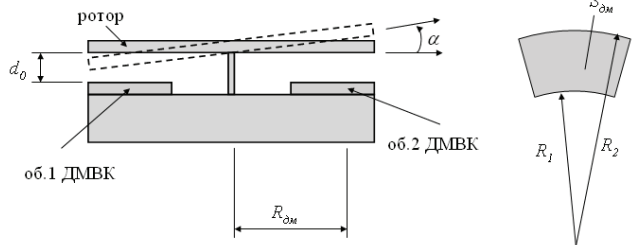


Рис.2. Конструкция ДМ по оси вторичных колебаний

ных колебаний.

Обкладки ДМ вторичных колебаний «об.1 ДМВК» и «об.2 ДМВК» расположены симметрично относительно центра подвеса ИТ для формирования управляющих моментов в противоположных направлениях (рис. 2).

Силы F_1 и F_2 , возникающие между обкладками и ИТ при подаче на них управляющих напряжений U_1 и U_2 , формируемых СУ на основе $u_{\text{мод}}(t)$, определяются выражениями:

$$F_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S_{\text{ДМ1}}}{2(d_0 - d(z) - \alpha R_{\text{ДМ}})^2} U_1^2, \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{\text{ДМ}2}}{2(d_0 - d(z) + \alpha R_{\text{ДМ}})^2} U_2^2, \quad (6)$$

где ε – относительная диэлектрическая постоянная среды; ε_0 – абсолютная диэлектрическая постоянная; d_0 – номинальный зазор; $d(z)$ – изменение зазора, вызванное колебаниями ИТ по оси OZ ; $R_{\text{ДМ}} = R_1 + \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$ – радиус от центра подвеса до середины обкладки ДМ; $S_{\text{ДМ}1}$ и $S_{\text{ДМ}2}$ – площади обкладок ДМ.

Выражения (5) и (6) для электростатических сил ДМ получены при замене углового перемещения ИТ на его плоскопараллельное смещение. Это допущение позволяет получить решения, пригодные для инженерной практики с погрешностью не более 2 % при отклонениях ИТ до 10 % от максимально возможного положения. На практике условие отклонения ИТ на небольшие углы при максимальной измеряемой скорости является определяющим при отброске ММГ после изготовления [13].

В выражениях (5) и (6) учтено, что при вибрации зазор изменяется одинаково для обеих обкладок, а при отклонении ИТ по углу α для одной обкладки уменьшается, а для другой увеличивается. Учет изменения по углу α важен, поскольку в общем случае напряжения управления не равны друг другу и ИТ отклоняется от первоначального положения. Неравенство емкостных характеристик ДМ задается неравенством площадей обкладок $S_{\text{ДМ}1} \neq S_{\text{ДМ}2}$.

Момент, действующий на ИТ и входящий в систему уравнений (1), формируется следующим образом:

$$M_{\text{ДМ}}(\alpha) = (F_1 - F_2)R_{\text{ДМ}}. \quad (7)$$

ДУ имеет схожую структуру с ДМ (рис.3).

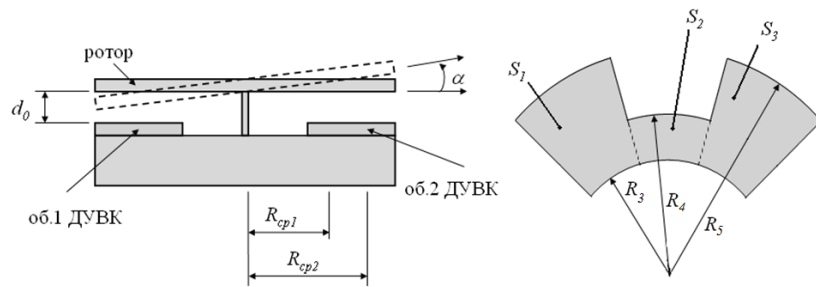


Рис.3. Конструкция ДУ

Применив те же допущения и заменив сложную геометрию более простой таким образом, чтобы площади $S_{\text{ДУ}} = S_1 + S_2 + S_3$ и радиусы $R_{\text{ДУ}} = R_{\text{cp}1} + \frac{1}{2}(R_{\text{cp}1} + R_{\text{cp}2}) = R_3 + \frac{3}{4}R_4 + \frac{1}{4}R_5$ обкладок соответствовали первоначальным, запишем выражения для изменения емкостей:

$$C_1 \cong \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{\text{ДУ}1}}{(d_0 - d(z) - \alpha R_{\text{ДУ}})}, \quad (8)$$

$$C_2 \cong \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{\text{ДУ}2}}{(d_0 - d(z) + \alpha R_{\text{ДУ}})} \quad (9)$$

Суммарное изменение емкости можно свести к выражению

$$\Delta C = C_1 - C_2 \approx K_{\text{ДУ}}(\alpha) \cdot \alpha \quad (10)$$

Неравенство емкостных характеристик ДУ, также как и в предыдущем случае, задается неравенством площадей обкладок $S_{\text{ДУ}1} \neq S_{\text{ДУ}2}$.

Из-за нелинейности ДУ и ДМ и процедуры синхронной демодуляции в случаях совпадения частот линейных вибраций основания с субгармониками частот угловых колебаний ИТ вибрация основания оказывает влияние на выходной сигнал ММГ в виде резонансных пиков на кратных ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$...) гармониках.

Система уравнений (1) – (10) представляет собой электромеханическую модель ММГ, учитывающую нелинейность и неравенство характеристик ДУ и ДМ, входящих в СУ. Данная электромеханическая модель не учитывает целый ряд других явлений, которые могут иметь место в реальных образцах ММГ при вибрации (например, изменение квадратурной составляющей, изменение условий работы двигателя первичных колебаний, сложное движение ИТ при кривой вибрации, потеря плоской формы ИТ при инерционных нагрузках и пр.). Кроме того, при испытании ММГ-2 выявлены субгармонические резонансы при вибрации вдоль осей OX и OY , для описания которых электромеханическая модель требует уточнения. Однако анализ представленной модели позволяет наметить пути по повышению вибростойкости ММГ R-R типа, для чего было проведено моделирование работы ММГ и выполнено сравнение с ранее полученными экспериментальными данными.

Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований

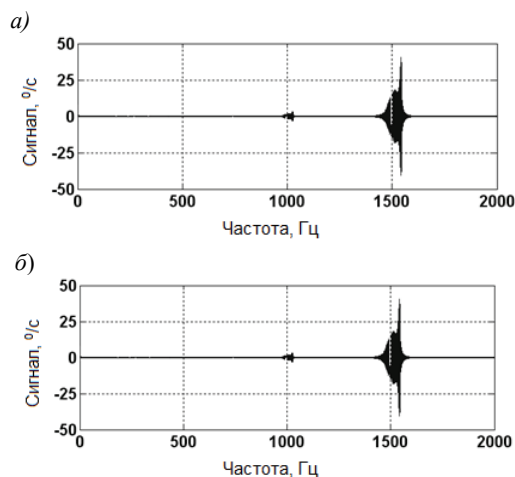


Рис.4. Результаты компьютерного моделирования (скорость изменения частоты 10 Гц/с) (а), и эксперимента (скорость изменения частоты 1 Гц/с) (б)

Общая электромеханическая модель ММГ R-R типа была построена в среде Simulink программного комплекса MATLAB. Модель содержит блоки математической модели, описывающей динамику ИТ в подвесе, и блоки СУ, включая ДУ и ДМ.

При моделировании выводились сигнал по углу вторичных колебаний и выходной сигнал ММГ. Результаты моделирования методом «качающейся частоты» и эксперимента при задании постоянной амплитуды вибрации 10g в диапазоне от 20 до 2000 Гц показаны на рис. 4. Параметры модели,

отвечающие за значение собственных частот, были подобраны таким образом, чтобы соответствовать собственным частотам прибора ММГ-2 ($\nu_\gamma = \omega_\gamma/2\pi = 3000$ Гц, $\nu_\alpha = \omega_\alpha/2\pi = 3150$ Гц).

На рис. 4 видно качественное совпадение результатов моделирования в части наличия пиков на резонансных частотах субгармоник собственных колебаний ИТ, полученное при принятых допущениях.

На рис. 5 показаны результаты исследования прибора ММГ-2 на вибростенде в районе субгармоники $\frac{1}{3} \nu_\alpha$ и показаны результаты моделирования характера изменения сигнала для этого образца при приближении к субгармоникам первичных и вторичных колебаний.

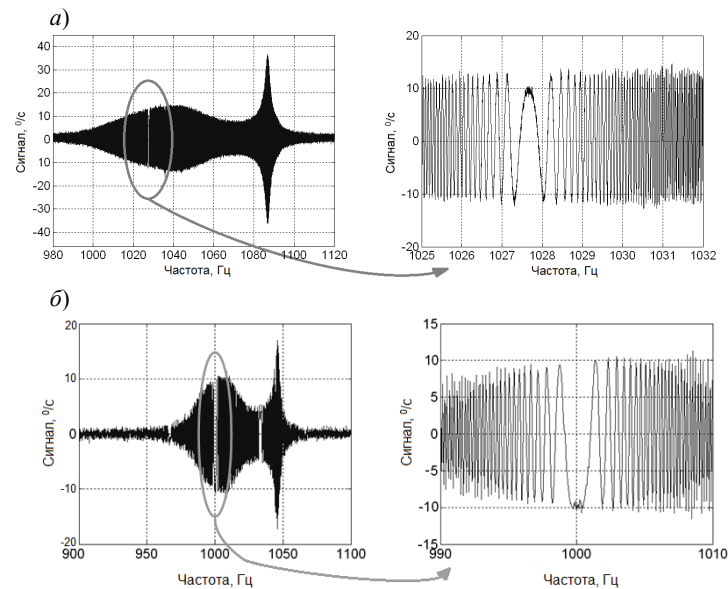


Рис.5. Результаты экспериментального исследования ММГ-2 (а) и моделирования электромеханической модели (б)

Для более детального исследования возникновения субгармонических колебаний выполнено моделирование, в котором первичная и вторичная частоты колебаний ИТ были разнесены на 500 Гц вместо первоначальных 150 Гц. На рис.6, а отмечены частоты возникновения «всплесков» выходного сигнала, совпадающие с субгармониками первичных и вторичных колебаний. На рис. 6, б показан сигнал, получаемый на выходе ДУ.

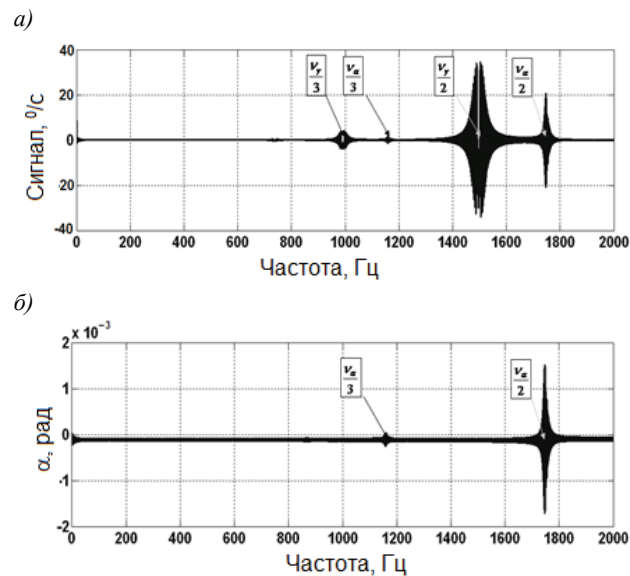


Рис. 6. Результаты моделирования: (а) выходной сигнал ММГ, (б) угол отклонения ИТ по оси вторичных колебаний

Результаты моделирования свидетельствуют о появлении резонансных пиков на субгармониках первичных и вторичных колебаний ИТ. Выявлено, что в сигнале угла α по оси вторичных колебаний присутствуют «всплески» сигналов

только на субгармониках вторичных колебаний, а в выходном сигнале – на субгармониках вторичных и первичных колебаний. Это позволяет предположить, что причина появления «всплесков» в выходном сигнале заключается в процессе синхронной демодуляции вторичных колебаний.

В целом следует отметить качественное совпадение результатов моделирования с результатами ранее выполненного эксперимента. Сходство результатов указывает на принципиальную возможность появления при вибрации основания субгармонических резонансных явлений в ММГ R-R типа, имеющего нелинейную СУ.

Анализ неравенства характеристик ДУ и ДМ

Компьютерное исследование показало, что наличие неравенства характеристик ДУ и ДМ при моделировании действия на ММГ линейной вибрации создает ложный сигнал на субгармониках, кратных частоте первичных и вторичных колебаний. Как видно из рис. 4–6, амплитуда пика выходного сигнала на частоте $\frac{1}{2}\nu_\gamma$ наиболее сильно проявляется на фоне остальных пиков. Таким образом, указанную амплитуду в выходном сигнале наиболее логично выбрать в качестве критерия оценки для дальнейших исследований.

Зависимости амплитуды пика выходного сигнала на частоте $\frac{1}{2}\nu_\gamma$ от неравенства характеристик ДУ и ДМ представлены на рис. 7. Амплитуда пика в выходном сигнале при неравенстве площадей обкладок ($S_{\text{дм}1} > S_{\text{дм}2}$, $S_{\text{ду}1} > S_{\text{ду}2}$) определялась как разность амплитуды пика, вызванного неравенством площадей обкладок ДУ, и амплитуды пика, вызванного неравенством площадей обкладок ДМ.

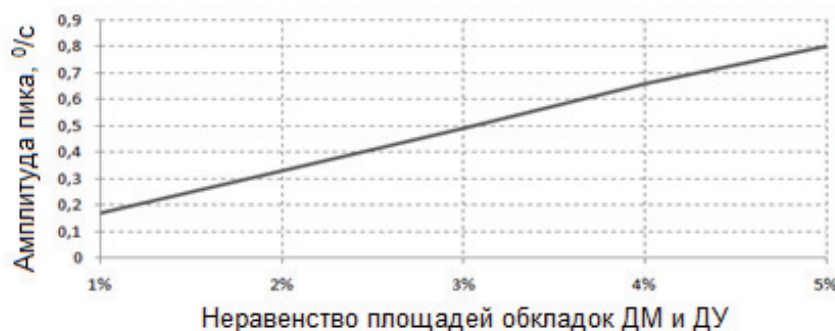


Рис. 7. Зависимость амплитуды пиков в выходном сигнале на частоте $\frac{1}{2}\nu_\gamma$ от неравенства площадей обкладок ДМ и ДУ

Компьютерным моделированием установлено, что резонансные явления исчезают при равенстве характеристик ДУ и ДМ. При заданной точности ММГ на уровне 10 град/ч допустимое неравенство площадей обкладок ДМ составляет 0,01%. В существующей конструкции прибора ММГ-2 площадь обкладки ДМ равна $S_{\text{дм}} = 0,3 \text{ мм}^2$, таким образом, исходя из неравенства на уровне 0,01% допуск на геометрические размеры обкладок составит 0,027 мкм. Достижимая технологическая точность изготовления микромеханических устройств находится на уровне 0,1–0,2 мкм, что делает невозможным обеспечение равенства характеристик ДУ и ДМ с требуемой точностью на этапе изготовления.

В таблице приведены измеренные значения емкостей ДМ и ДУ трех образцов прибора ММГ-2.

Емкостные характеристики прибора ММГ-2

Обкладки	Образец 1		Образец 2		Образец 3	
	Емкость, пФ	Расхождение, %	Емкость, пФ	Расхождение, %	Емкость, пФ	Расхождение, %
ДМ_1	4,42	19,5	4,02	5,7	4,17	2,4
ДМ_2	3,70		4,25		4,27	
ДУ_1	1,05	20,9	1,27	13,4	1,17	7,3
ДУ_2	1,27		1,12		1,09	

Среднее значение расхождения емкостных характеристик ДМ и ДУ составляет 9 и 14%, что в соответствии с результатами моделирования может привести к появлению субгармонических резонансов с амплитудой выше 2 град/с при действии вибрации.

Таким образом, снижение амплитуды пика выходного сигнала на частоте $\frac{1}{2}v_\gamma$ до уровня прецизионных датчиков 10 град/ч путем увеличения требований к точности изготовления ММГ и введения дополнительной отбраковки невозможно. Следует констатировать, что если существует техническая возможность измерения емкостных характеристик на этапе сборки приборов и введения дополнительных коэффициентов в СУ, которые максимально (до уровня шумов ММГ) уменьшат ложные сигналы на субгармониках при вибрации основания, то разработка вибростойкого ММГ R-R типа класса точности 10 град/ч может быть реализована. В испытанном приборе ММГ-2 такой технической возможности не предусмотрено.

Альтернативный путь, такой как повышение собственной частоты колебаний ИТ на упругом подвесе, снижает чувствительность ММГ к измеряемой угловой скорости. Действительно, коэффициент преобразования ММГ обратно пропорционален величине собственной частоты первичных колебаний v_γ и прямо пропорционален величине угла γ в первичных колебаниях [14]. В то же время допустимый угол поворота γ при увеличении частоты путем изменения ширины упругого элемента подвеса и при заданном напряжении в конструкции подвеса снижается обратно пропорционально частоте $\gamma \sim v_\gamma^{-0,66}$ [15]. Таким образом, при увеличении частоты подвеса в 2 раза чувствительность ММГ к угловой скорости снижается примерно в 3,2 раза. Повышение частоты подвеса не устраняет причину появления субгармонических резонансных явлений при действии вибрации вследствие нелинейности и неравенства характеристик элементов СУ. Даже при высокой частоте подвеса возможны резонансные субгармонические явления на частотах, кратных частотам первичных и вторичных колебаний.

Выводы

Разработана электромеханическая модель ММГ R-R типа, учитывающая нелинейные эффекты в элементах СУ (ДУ и ДМ). Подтверждено компьютерным моделированием, что в случаях совпадения частот линейных вибраций основания с субгармониками частот угловых колебаний ИТ вибрация основания мо-

жет оказывать существенное влияние на выходной сигнал гироскопа в виде резонансных пиков на кратных ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$...) гармониках. Определено, что это влияние проявляется только при неравенстве характеристик ДМ и ДУ. Результаты моделирования качественно совпадают с ранее полученными экспериментальными данными. Показано, что, при осуществлении технической возможности измерения емкостных характеристик ДУ и ДМ на этапе сборки приборов и введения дополнительных коэффициентов в СУ для выравнивания характеристик ДУ и ДМ, то разработка вибростойкого ММГ R-R типа класса точности 10 град/ч может быть реализована.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-00153а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов, В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. - 2011. - № 1. - С.3-16.
2. **Xie H., Fedder G.K.** Integrated Microelectromechanical Gyroscopes // Journal of Aerospace Engineering. - April 2003. - pp. 65-75.
3. **Тузов, А.** Датчики для измерения параметров движения на основе МЭМС-технологии. Ч. 2. Инерциальные датчики высокой точности // Электроника. - 2011. - № 1. - С.2-5.
4. **Евстифеев, М.И.** Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. - 2013. - № 1. - С.-.
5. **Weinberg, H.** Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. - September 2011. - Pp.1-5.
6. **Результаты** испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2011. - №.1. - С.49-58.
7. **Евстифеев, М.И.** Анализ электромеханической модели микромеханического гироскопа RR-типа / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев // Материалы XXVIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова. - СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2012. - 13 с.
8. **Ковалев, А.С.** Анализ уточненной математической модели ММГ RR-типа при воздействии линейных вибраций / А.С. Ковалев, Д.П. Елисеев, А.А. Белогуров / Реф. докл. на XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» // Гироскопия и навигация. - 2012. - №2. - С.167.
9. **Исследование** динамики микромеханического гироскопа при механических воздействиях / М.И. Евстифеев [и др.] // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО - 2011. - №4. - С.72-76.
10. **Беляева, Т.А.** Подавление квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе RR типа с помощью электродов, расположенных над зубцовой зоной / Т.А. Беляева, Я.А. Некрасов // Гироскопия и навигация. - 2008. - №1. - С.82-90.
11. **U.S. Patent 2005/0139005 A1.** Micromachined Sensor with Quadrature Suppression / Geen J.; Analog Devices. - Jun.30, 2005. - 24 p.
12. **U.S. Patent 8266961.** Inertial Sensors with Reduced Sensitivity to Quadrature Errors and Micromachining Inaccuracies / Kuang J., Geen J.; Analog Devices. - Sep.18, 2012. - 17 p.
13. **Ковалев, А.С.,** Методы снижения влияния разбросов конструктивных параметров микромеханического гироскопа на его характеристики / А.С. Ковалев, Е.В. Логовская // Материалы X конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». - 2009. - С.362-369.
14. **Евстифеев, М.И.** Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. - 2004. - №1. - С.27-39.
15. **Евстифеев, М.И.** Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. - 2009. - №.3 - С.22-34.

Abstract. The results of developing the electromechanical model of a R-R type MEMS Gyro are given. This model considers nonlinear effects and inequality of the drive and sense elements parameters. The reasons for the appearance of resonance peaks on the sub-multiple harmonics with the base vibration are investigated and requirements for the characteristics of the control system elements are defined.

Key words: electromechanical model, R-R type MEMS, control system elements

Материал поступил 15.12.12