

УДК 531.383-11:531.714.7

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЕМКОСТНЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА RR-ТИПА С УЧЕТОМ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

М.И. Евстифеев^{a,b}, Д.П. Елисеев^a

^a АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: eliseev.dp@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.04.16, принята к печати 22.04.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-541-549

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Математическая модель емкостных гребенчатых преобразователей микромеханического гироскопа RR-типа с учетом вибрационных воздействий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 541–549. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-541-549

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы причины проявления субгармонических резонансов в выходном сигнале микромеханического гироскопа RR-типа при воздействии поступательных вибраций. Приборы подобного типа в идеальном случае не должны быть чувствительны к поступательным вибрациям вследствие угловых первичных и вторичных колебаний. Однако в силу нелинейностей характеристик емкостных преобразователей плоского и гребенчатого типов при экспериментальных исследованиях выявлено существенное усиление амплитуды его выходного сигнала в полосе частот от 20 Гц до 2 кГц. При этом собственные частоты упругого подвеса превышают 3 кГц. **Метод.** Уточнена математическая модель емкостных преобразователей гребенчатого типа. Описаны электромеханические взаимодействия в указанных преобразователях с учетом внешнего вибрационного воздействия. Уточненная математическая модель исследована в среде Simulink. Моделирование вибрационного воздействия проведено методом «качающейся частоты» при задании постоянной амплитуды ускорения в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц. **Основные результаты.** Получено качественное совпадение результатов моделирования и экспериментов в виде проявления субгармонических резонансов при воздействии поступательной вибрации в трех взаимно ортогональных направлениях. Предложенные математические модели позволили объяснить причины полученных эффектов. Сделано заключение о том, что основной причиной появления пиков в выходном сигнале микромеханического гироскопа на субкратных частотах является выход зубцов статора и инерционного тела из зацепления. **Практическая значимость.** Проведенное исследование позволяет определить алгоритмические и конструктивные методы компенсации изученных взаимодействий с целью повышения вибрационной устойчивости рассматриваемого микромеханического гироскопа RR-типа.

Ключевые слова

микромеханический гироскоп, вибрационное воздействие, субгармонический резонанс

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в организации исследований коллективу международной научной лаборатории «Интегрированные системы ориентации и навигации» на базе кафедры информационно-навигационных систем Университета ИТМО и лично ее руководителю О.А. Степанову.

MATHEMATICAL MODEL OF RR-TYPE MICROMECHANICAL GYRO CAPACITIVE COMB-TYPE SENSORS WITH ACCOUNT FOR VIBRATIONS

M.I. Evstifeev^{a,b}, D.P. Eliseev^a

^a Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: eliseev.dp@gmail.com

Article info

Received 04.04.16, accepted 22.04.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-541-549

Article in Russian

For citation: Evstifeev M.I., Eliseev D.P. Mathematical model of RR-type micromechanical gyro capacitive comb-type sensors with account for vibrations. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 541–549.

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-541-549

Abstract

Subject of Research. The reasons for subharmonic resonances in RR-type micromechanical gyro output under linear vibrations are investigated. In ideal case, this type of gyro should be insensitive to this kind of impact due to primary and secondary angular oscillations. However, experimental results reveal significant increase in output signal under external vibrations in 20 Hz - 2 kHz bandwidth, though the device natural frequencies are above 3 kHz. This effect is caused by characteristics nonlinearity of plate-type and comb-type capacitive sensors. **Method.** Mathematical model of the capacitive comb-type sensors is clarified. Electromechanical interactions in the sensors under external vibrations are described. Simulink modeling of specified mathematical model is carried out. External vibration modeling is done by "oscillating frequency" method with constant acceleration amplitude in 20 Hz - 2 kHz bandwidth. **Main Results.** We have received good agreement of modeling and experimental results in the form of occurrence of subharmonic resonances under linear vibrations in three orthogonal directions. Obtained effects are explained by proposed mathematical models. The main reason for subharmonic resonances in RR-type micromechanical gyro output is that combs of stator and combs of proof mass jump out of mesh. **Practical Relevance.** The provided investigation gives the possibility to determine algorithmic and construction compensation methods of studied interactions for enhancing vibration resistance of RR-type micromechanical gyro.

Keywords

micromechanical gyro, vibration, subharmonic resonance

Acknowledgements

The authors are thankful to the staff of international scientific laboratory "Integrated orientation and navigation systems" based on Information Navigation Systems Department of ITMO University and personally to its head O.A. Stepanov for assistance in organization of research.

Введение

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

Схема разрабатываемого в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» ММГ RR-типа представлена на рис. 1. Первичные колебания (ПК) инерционного тела (ИТ) в виде диска возбуждаются системой управления (СУ) вокруг оси Z. При наличии угловой скорости основания Ω образуются силы Кориолиса, приводящие ко вторичным колебаниям (ВК) ИТ вокруг оси X. Идеальный ММГ RR-типа должен быть нечувствителен к поступательной вибрации вследствие угловых ПК и ВК. Однако при экспериментальных исследованиях выявлено существенное усиление амплитуды его выходного сигнала в полосе частот от 20 Гц до 2 кГц (рис. 2), несмотря на то, что собственные частоты упругого подвеса (УП) превышают 3 кГц [8, 9]. Анализ полученных данных показал, что обнаруженные ложные сигналы проявляются на субкратных частотах ПК и ВК, что свидетельствует о нелинейностях характеристик электромеханических элементов СУ. В предыдущих работах авторов [10–12] показано, что эти нелинейности вызваны конструктивными особенностями прибора – использованием преобразователя угла в виде пары электродов как почти плоского конденсатора переменной емкости в датчиках угла (ДУ) ВК и датчиках моментов (ДМ) ВК. Уменьшение ложных сигналов прибора по оси ВК может быть достигнуто установкой подвижного электрода [13, 14]. Один из электродов конденсатора образован сектором поверхностного слоя дискового ИТ на УП, что при действии инерционных нагрузок приводит к изменению зазора и емкости к нелинейности цепи СУ. Составленные и изученные модели ДУ и ДМ ВК позволили объяснить субгармонические резонансы только при вибрационном воздействии в направлении Z.



Рис. 1. Схема микромеханического гироскопа RR-типа

Настоящая работа посвящена анализу причин проявления субгармонических резонансов при воздействии вибрации в направлениях осей X и Y , в результате чего проведено уточнение математической модели емкостных преобразователей гребенчатого типа (ДУ и ДМ ПК) и описаны электромеханические взаимодействия в них.

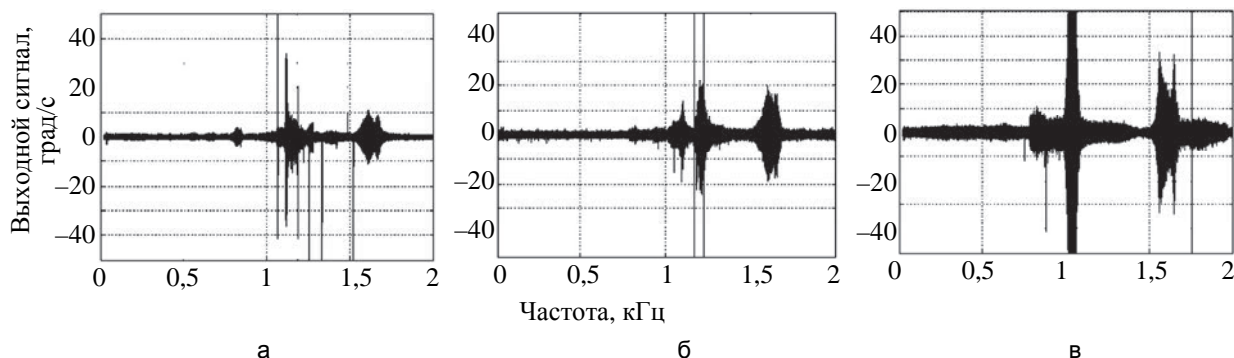


Рис. 2. Экспериментальные исследования микромеханического гироскопа при вибрации основания по осям: X (а), Y (б) и Z (в)

Датчик угла первичных колебаний

Составление искомых выражений будем производить с учетом обозначения поступательных и угловых перемещения ИТ векторами $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ и $\boldsymbol{\theta} = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ соответственно (где T – оператор транспонирования; x, y, z – перемещения в направлении соответствующих осей; α – угол отклонения вокруг оси X (ВК); β – угол отклонения вокруг оси Y ; γ – угол отклонения вокруг оси Z (ПК)).

Конструктивно ДУ и ДМ ПК выполнены в виде четырех пар гребенчатых структур (рис. 3) **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Изменение угла γ поворота ИТ приводит к увеличению емкости одной диагонали ДУ ПК и уменьшению емкости второй, чем реализуется дифференциальный принцип измерения. Коэффициент преобразования $K_{ДУ}$ вычисляется по формуле **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**

$$K_{ДУ} = \Delta C(\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}) / \gamma = (C_{11} + C_{12} - C_{21} - C_{22}) / \gamma, \quad (1)$$

где C_{11}, C_{12}, C_{21} и C_{22} – емкости обкладок 11, 12, 21 и 22 ДУ соответственно, в общем случае зависящие от линейных и угловых перемещений ИТ.

$$C_{ДУ}(r, \boldsymbol{\theta}) = n \epsilon \epsilon_0 S(\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}) / d(\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}), \quad (2)$$

где n – количество зубцов в гребенчатой структуре; ϵ и ϵ_0 – относительная диэлектрическая проницаемость среды и электрическая постоянная соответственно; S – площадь перекрытия одного среднего зубца гребенчатой структуры (расположенного на среднем радиусе R_{cp}), зависящая от угловых и поступательных перемещений ИТ; d – зазор между зубьями, также зависящий от перемещений ИТ.

Пренебрегая кривизной зубьев и учитывая угловые и поступательные перемещения ИТ, зазоры между каждой обкладкой ДУ и ИТ определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} d_{ДУ11} &= d_0 + x \cos \Theta_2 + y \sin \Theta_2, \\ d_{ДУ12} &= d_0 - x \cos \Theta_2 - y \sin \Theta_2, \\ d_{ДУ21} &= d_0 + x \cos \Theta_1 + y \sin \Theta_1, \\ d_{ДУ22} &= d_0 - x \cos \Theta_1 - y \sin \Theta_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где $d_{ДУ11}, d_{ДУ12}, d_{ДУ21}$ и $d_{ДУ22}$ – зазор между ИТ и обкладками 11, 12, 21 и 22 ДУ ПК; d_0 – номинальный зазор между гребнями статора емкостных преобразователей и ИТ; Θ_1 и Θ_2 – углы между осью X и средней линией ДУ ПК (рис. 3).

Определение площади S перекрытия одного среднего зубца ДУ при воздействии вибраций требует учета двух параметров – направления (знака) угла наклона и направления (знака) вертикальных перемещений ИТ. В случае их совпадения площадь S определяется однозначно. Однако при разнонаправленных угловых и поступательных перемещениях возникает неопределенность, которая связана с отношением указанных параметров и определением большего значения вертикальных перемещений или угловых, умноженных на определенное плечо. В табл. 1 приведены схемы изменения площади перекрытия при инерционных нагрузках с учетом описанных параметров и их отношения, которое выражено параметром $\lambda = h - (R_{cp} \gamma + R_i + L + r) \sin \varphi$ (R_i – расстояния R_1 или R_2 на рис. 3). Учет описанных отношений важен, так как ММГ является осциллятором, и при воздействии вибрации возможно случайное изменение емкости между ИТ и обкладками ДУ, вызванное неравенством выражений (7)–(12).

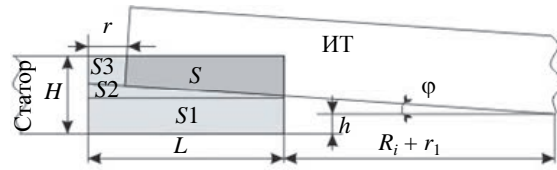
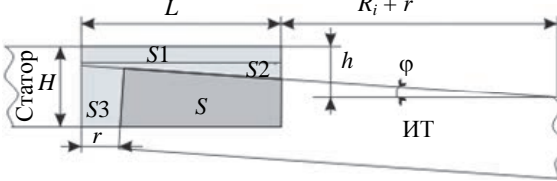
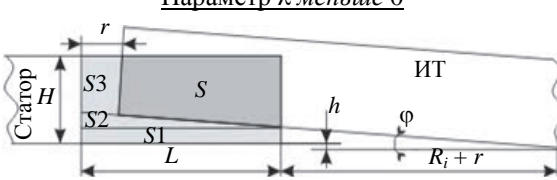
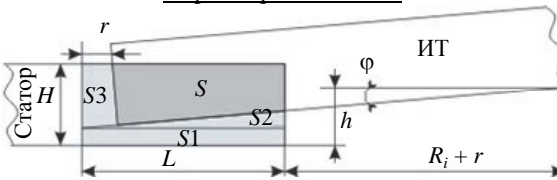
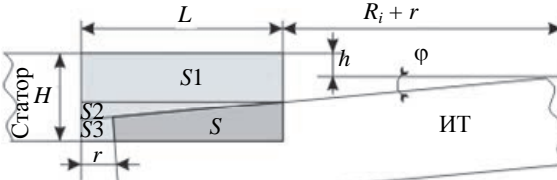
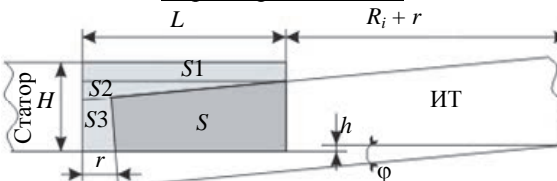
	Обобщенная координата h больше 0	Обобщенная координата h меньше 0
Обобщенная координата φ больше 0	 $S = LH - S1 - S2 - S3 = LH - Hr + HR_{cp}\gamma - (R_i + L^2/2)\varphi + R_i\varphi r - Lh + rh - R_{cp}\gamma h - (R_i + L)R_{cp}\gamma\varphi \quad (7)$	<p>Параметр λ больше 0</p>  $S = LH - S1 - S2 - S3 = LH - Hr + HR_{cp}\gamma + (R_i + L^2/2)\varphi + (R_i + L)\varphi r - Lh + rh + R_{cp}\gamma h - (R_i + L)R_{cp}\gamma\varphi \quad (8)$
		<p>Параметр λ меньше 0</p>  $S = LH - S1 - S2 - S3 = LH - Hr + HR_{cp}\gamma - (R_i + L^2/2)\varphi + R_i\varphi r + Lh - rh - R_{cp}\gamma h + (R_i + L)R_{cp}\gamma\varphi \quad (9)$
Обобщенная координата φ меньше 0	<p>Параметр λ больше 0</p>  $S = LH - S1 - S2 - S3 = LH - Hr + HR_{cp}\gamma + (R_i + L^2/2)\varphi - (R_i + L)\varphi r - Lh + rh - R_{cp}\gamma h + (R_i + L)R_{cp}\gamma\varphi \quad (10)$	 $S = LH - S1 - S2 - S3 = LH - Hr + HR_{cp}\gamma - (R_i + L^2/2)\varphi + R_i\varphi r - Lh + rh - R_{cp}\gamma h - (R_i + L)R_{cp}\gamma\varphi \quad (12)$
	<p>Параметр λ меньше 0</p>  $S = LH - S1 - S2 - S3 = LH - Hr + HR_{cp}\gamma - (R_i + L^2/2)\varphi + R_i\varphi r + Lh - rh - R_{cp}\gamma h - (R_i + L)R_{cp}\gamma\varphi \quad (11)$	

Таблица 1. Схемы изменения площади перекрытия среднего зубца

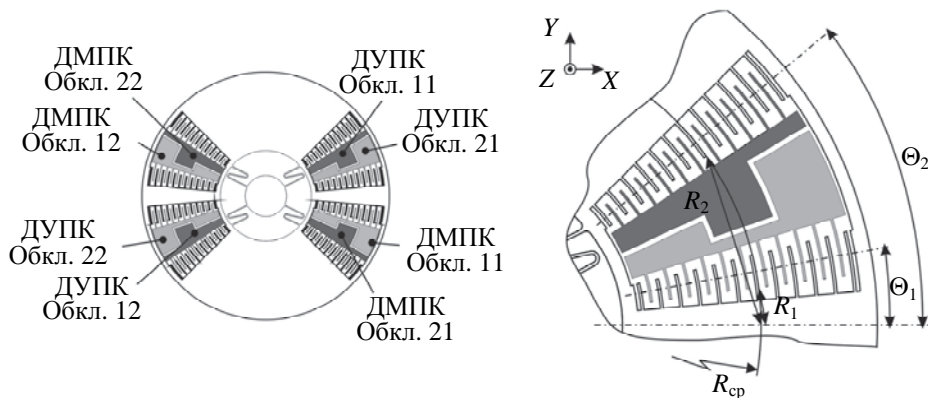


Рис. 3. Конструкция емкостных преобразователей первичных колебаний.
 Θ_1 и Θ_2 – углы между осью X и средней линией датчиков угла первичных колебаний;
 R_1 или R_2 – расстояния от оси X до гребенок датчиков угла первичных колебаний

Обобщенная координата φ характеризует угол поворота ИТ на угол α с учетом углов Θ_1 и Θ_2 и для каждой обкладки ДУ определяются из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \varphi_{ДУ11} &= \alpha \sin \Theta_2, \\ \varphi_{ДУ12} &= -\alpha \sin \Theta_2, \\ \varphi_{ДУ21} &= \alpha \sin \Theta_1, \\ \varphi_{ДУ22} &= -\alpha \sin \Theta_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi_{ДУ11}$, $\varphi_{ДУ12}$, $\varphi_{ДУ21}$ и $\varphi_{ДУ22}$ – углы для обкладок 11, 12, 21 и 22 ДУ ПК соответственно.

Обобщенная координата h характеризует вертикальные перемещения z с учетом отклонения ИТ на угол β и углов Θ_1 и Θ_2 . Для каждой обкладки ДУ h определяется из следующих выражений:

$$\begin{aligned} h_{ДУ11} &= z + \beta \cos \Theta_2, \\ h_{ДУ12} &= z - \beta \cos \Theta_2, \\ h_{ДУ21} &= z + \beta \cos \Theta_1, \\ h_{ДУ22} &= z - \beta \cos \Theta_1, \end{aligned} \quad (5)$$

где $h_{ДУ11}$, $h_{ДУ12}$, $h_{ДУ21}$ и $h_{ДУ22}$ – перемещения обкладок 11, 12, 21 и 22 ДУ ПК соответственно.

Обобщенная координата r характеризует перемещения ИТ в направлениях, нормальных к плоскости диска x и y , с учетом углов Θ_1 и Θ_2 . Для каждой обкладки ДУ r определяется из следующих выражений:

$$\begin{aligned} r_{ДУ11} &= x \sin \Theta_2 + y \cos \Theta_2, \\ r_{ДУ12} &= -x \sin \Theta_2 - y \cos \Theta_2, \\ r_{ДУ21} &= x \sin \Theta_1 + y \cos \Theta_1, \\ r_{ДУ22} &= -x \sin \Theta_1 - y \cos \Theta_1, \end{aligned} \quad (6)$$

где $r_{ДУ11}$, $r_{ДУ12}$, $r_{ДУ21}$ и $r_{ДУ22}$ – перемещения обкладок 11, 12, 21 и 22 ДУ ПК соответственно.

Система уравнений (1)–(12) является математической моделью ДУ ПК рассматриваемого ММГ RR-типа, учитывающей влияние внешних инерционных нагрузок, в том числе и вибрационные воздействия.

Датчик момента первичных колебаний

При подаче на обкладки 11 и 12 ДМ одинакового напряжения U_1 между ИТ и ДМ создается электростатическое поле, которое вызывает момент \mathbf{M} и, как следствие, поворот ИТ по часовой стрелке на угол γ . После отключения U_1 на обкладки 21 и 22 ДМ подается напряжение U_2 , которое также создает момент \mathbf{M} , но при этом ИТ уже совершает поворот на угол γ против часовой стрелки. Для резонансной настройки ММГ напряжения U_1 и U_2 должны модулироваться на собственной частоте ПК УП ω_γ , при этом их можно упрощенно представить в виде

$$U(t) = K_{\text{ПЕН}} \cdot K_{\text{ДУ}} \cdot \cos \omega_\gamma t, \quad (13)$$

где $K_{\text{ПЕН}}$ – коэффициент преобразователя «емкость–напряжение» в канале ПК.

Суммарные момент \mathbf{M} и сила \mathbf{F} , создаваемые ДМ, определяются дифференцированием энергии E электростатического поля между ИТ и электродами емкостных преобразователей

$$\mathbf{F} = \partial E / \partial \mathbf{r}, \quad \mathbf{M} = \partial E / \partial \boldsymbol{\theta}. \quad (14)$$

Энергия электростатического поля находится из известного выражения для энергии заряженного конденсатора:

$$E = \frac{1}{2} U^2 C_{\text{ДМ}}(\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}), \quad (15)$$

где $C_{\text{ДМ}}(\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta})$ – емкость между ИТ и обкладками ДМ, в общем случае зависящая от линейных и угловых перемещений ИТ; U – управляющее напряжение на статоре ДМ (U_1 или U_2).

Емкость между ИТ и обкладками ДМ определяется аналогично (2) при подстановке следующих параметров ДМ:

$$\begin{aligned} d_{\text{ДМ11}} &= d_0 + x \cos \Theta_1 - y \sin \Theta_1, \\ d_{\text{ДМ12}} &= d_0 - x \cos \Theta_1 + y \sin \Theta_1, \\ d_{\text{ДМ21}} &= d_0 + x \cos \Theta_2 - y \sin \Theta_2, \\ d_{\text{ДМ22}} &= d_0 - x \cos \Theta_2 + y \sin \Theta_2, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{ДМ11}} &= -\alpha \sin \Theta_1, \\ \varphi_{\text{ДМ12}} &= \alpha \sin \Theta_1, \\ \varphi_{\text{ДМ21}} &= -\alpha \sin \Theta_2, \\ \varphi_{\text{ДМ22}} &= \alpha \sin \Theta_2, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} h_{\text{ДМ11}} &= z + \beta \cos \Theta_1, \\ h_{\text{ДМ12}} &= z - \beta \cos \Theta_1, \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{ДМ21}} &= z + \beta \cos \Theta_2, \\ h_{\text{ДМ22}} &= z - \beta \cos \Theta_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{\text{ДМ11}} &= x \sin \Theta_1 - y \cos \Theta_1, \\ r_{\text{ДМ12}} &= -x \sin \Theta_1 + y \cos \Theta_1, \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} r_{\text{ДМ21}} &= x \sin \Theta_2 - y \cos \Theta_2, \\ r_{\text{ДМ22}} &= -x \sin \Theta_2 + y \cos \Theta_2, \end{aligned}$$

где $d_{\text{ДМ11}}, d_{\text{ДМ12}}, d_{\text{ДМ21}}$ и $d_{\text{ДМ22}}$ – зазоры между ИТ и обкладками 11, 12, 21 и 22 ДМ ПК; $\varphi_{\text{ДМ11}}, \varphi_{\text{ДМ12}}, \varphi_{\text{ДМ21}}$ и $\varphi_{\text{ДМ22}}$ – углы для обкладок 11, 12, 21 и 22 ДМ ПК соответственно; $h_{\text{ДМ11}}, h_{\text{ДМ12}}, h_{\text{ДМ21}}$ и $h_{\text{ДМ22}}$ – перемещения обкладок 11, 12, 21 и 22 ДМ ПК соответственно; $r_{\text{ДМ11}}, r_{\text{ДМ12}}, r_{\text{ДМ21}}$ и $r_{\text{ДМ22}}$ – перемещения обкладок 11, 12, 21 и 22 ДМ ПК соответственно. Система уравнений (2), (7)–(19) является математической моделью ДМ ПК рассматриваемого ММГ RR-типа, учитывающей влияние внешних инерционных нагрузок, в том числе и вибрационные воздействия.

Описание модели в среде Simulink

На основе составленных моделей (1)–(19) и уравнений, описывающих движение ИТ ММГ [Ошибка! Источник ссылки не найден.] и СУ [16, 18], в Simulink построена электро-механическая модель ММГ, конструктивные параметры которого приведены в табл. 2. Моделирование вибрационного воздействия проводилось методом «качающейся частоты» при задании постоянной амплитуды ускорения в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Масса m , кг	$7,97 \cdot 10^{-7}$	Собственная частота первичных колебаний УП ω_γ , Гц	3000
Угол Θ_1 , град	10	Собственная частота вторичных колебаний УП ω_α , Гц	3300
Угол Θ_2 , град	30	Собственная частота перекрестных колебаний УП ω_β , Гц	6400
Радиус $R_{\text{ср}}$, м	$1,025 \cdot 10^{-3}$	Собственная частота поступательных колебаний УП по оси X ω_x , Гц	10100
Номинальный зазор d_0 , м	$2 \cdot 10^{-6}$	Собственная частота поступательных колебаний УП по оси Y ω_y , Гц	8500
Плечо R_1 , м	$0,13 \cdot 10^{-3}$	Собственная частота поступательных колебаний УП по оси Z ω_z , Гц	9200
Плечо R_2 , м	$0,74 \cdot 10^{-3}$	Добротность колебательного контура по оси первичных колебаний Q_γ	100000
Начальное перекрытие гребней L , м	$0,12 \cdot 10^{-3}$	Добротность колебательного контура по оси вторичных колебаний Q_α	10000
Высота гребней H , м	$0,06 \cdot 10^{-3}$	Добротность колебательного контура по оси перекрестных колебаний Q_β	10000
Момент инерции по оси X J_x , кг·мм ²	$5,41 \cdot 10^{-7}$	Добротность колебательного контура по оси X Q_x	2500
Момент инерции по оси Y J_y , кг·мм ²	$3,17 \cdot 10^{-7}$	Добротность колебательного контура по оси Y Q_y	2500
Момент инерции по оси Z J_z , кг·мм ²	$9,18 \cdot 10^{-7}$	Добротность колебательного контура по оси Z Q_z	2500

Таблица 2. Конструктивные параметры моделируемого ММГ RR-типа

Блок-схема, поясняющая составленную математическую модель, представлена на рис. 4 [19]. Под действием управляющих сил и моментов ММГ совершает поступательные и угловые перемещения \mathbf{r} и $\boldsymbol{\theta}$, что детектируется обкладками (на рис. 4 – «Обкл») ДУ ПК и ВК. Указанные датчики работают в дифференциальном режиме, в результате чего их суммарная емкость при отсутствии внешних воздействий должна быть равна нулю. Наличие в конструкции рассматриваемого прибора углов Θ_1 и Θ_2 , расстояний R_1 и R_2 и несимметричность характеристик преобразователей ВК [10] нарушает это равенство, а при воздействии вибрации обуславливает проявление дополнительных нелинейных слагаемых. Напряжения $U_{\text{ДУПК}}, U_{\text{ДУВК}}$, формируемые соответствующими преобразователями емкость–напряжение (на рис. 4 – ПЕН), поступают в СУ, где преобразуются в управляющие напряжения $U_1, U_2, U_{\text{ВК1}}, U_{\text{ВК2}}$. Последние подаются на соответ-

ствующие обкладки ДМ, в результате чего формируются управляющие силы F , $F_{ВК}$ и моменты M , $M_{ВК}$.

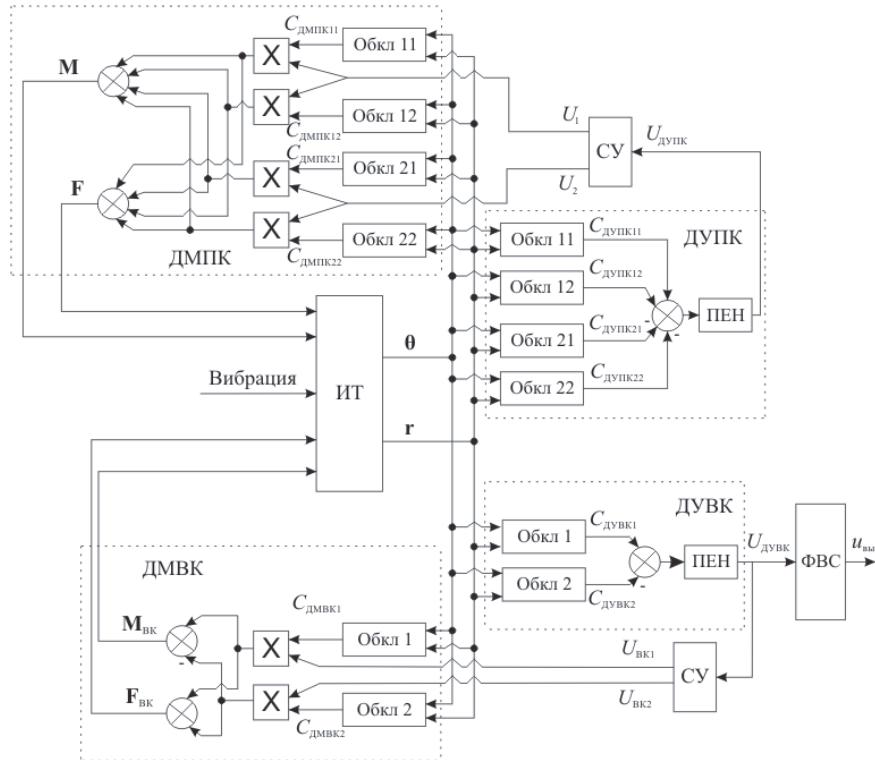


Рис. 4. Блок-схема модели микромеханического гироскопа RR-типа в Simulink. ФВС – блок формирования выходного сигнала; $u_{\text{вых}}$ – выходной сигнал прибора

Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены на рис. 5. По полученным данным видно, что измененная модель практически не повлияла на проявление субгармонических резонансов при воздействии вибрации в направлении Z. Тем не менее, при вибрации по осям X и Y теперь также наблюдаются субгармонический резонанс, что соответствует экспериментальным данным.

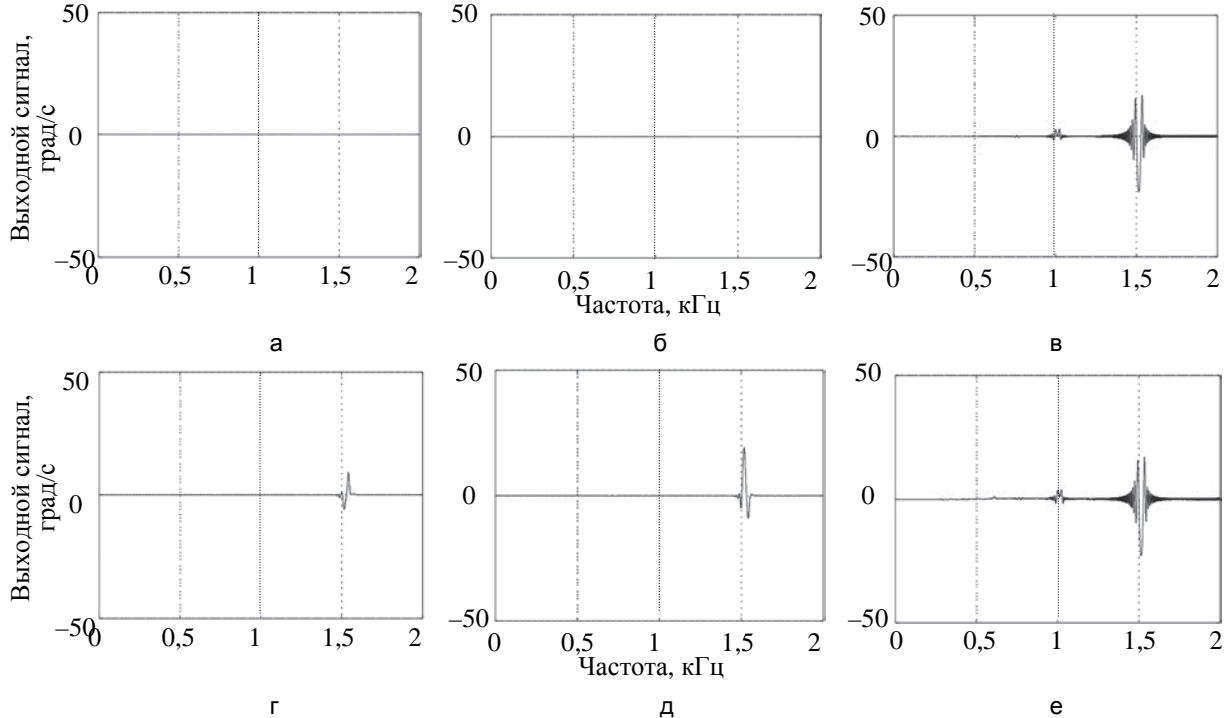


Рис. 5. Моделирование без уточнения моделей преобразователей первичных колебаний воздействия вибрации основания по осям X (а), Y (б) и Z (в) и с их уточнением при аналогичном воздействии по осям X (г), Y (д) и Z (е)

Количественного совпадения между моделированием и экспериментом (рис. 2) не наблюдается, что объясняется упрощением модели и неполным учетом множества масштабирующих факторов.

Сигнал о повороте ИТ на угол γ формируется изменением емкостей на обкладках ДУ ПК, которые определяются согласно выражению (2). При этом в силу конструктивных особенностей емкостных преобразователей в канале ПК – наличии в них углов Θ_1 , Θ_2 и плеч R_1 , R_2 – измеряемый угол отличается от действительного. Полученная ошибка измерения никак не детектируется существующей СУ и входит в напряжения U_1 и U_2 , при формировании которых в СУ также не учитываются указанные углы и плечи. Исследование составленной модели ММГ RR-типа показало, что совпадение значений $\Theta_1 = \Theta_2$ и $R_1 = R_2$ (что технологически невозможно) дает существенное уменьшение амплитуды резонансных усилений в выходном сигнале при воздействии поступательной вибрации, но не исключает их полностью.

Анализ полученных результатов позволил сделать заключение о том, что основная причина проявления пиков на субкратных частотах в выходном сигнале ММГ при учете электромеханических нелинейных эффектов в емкостных преобразователях в канале ПК – это выход зубцов статора и ИТ из зацепления. При этом создаются сила в направлении оси Z и момент вокруг оси X (оси ВК). Кроме того, при детальном рассмотрении схем в табл. 1 видно, что при воздействии вибрации электростатические силы будут создаваться таким образом, чтобы «втягивать» гребенку ИТ обратно в гребенку статора и увеличивать численное значение площади S. Следовательно, при разнонаправленных h и ϕ направление действия электростатических сил будет меняться с частотой ν_λ параметра λ , которую можно упрощенно представить в виде $\cos \nu_\lambda = \cos \nu_z - \cos \omega_\gamma \cos \omega_\alpha$ (где ν_z – частота вибрации в направлении оси Z). Таким образом, обуславливается формирование квадратурных колебаний со сложной частотой, оказывающих существенный вклад на виброустойчивость исследуемого ММГ.

К алгоритмическим методам повышения виброустойчивости [20] рассматриваемого прибора следует отнести использование обратной связи в СУ и реализацию схемы ММГ компенсационного типа. В этом случае сила в направлении оси Z и момент вокруг оси X (оси ВК), создаваемые преобразователями ПК, будут минимизированы и, следовательно, исключены субгармонические резонансы в выходном сигнале при воздействии вибрации в направлениях X и Y. Кроме того, аналогичного эффекта можно добиться и конструктивными методами, например, уменьшением начального перекрытия зубьев или введением упругого подвеса для электродных структур.

Заключение

Описаны электромеханические взаимодействия в датчиках первичных колебаний ММГ RR-типа разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Составлены математические модели указанных датчиков, проведено моделирование в среде Simulink вибрационного воздействия на исследуемый прибор. Получено качественное совпадение результатов моделирования и экспериментов. Проведенное исследование позволяет определить алгоритмические и конструктивные методы компенсации изученных взаимодействий с целью повышения вибрационной устойчивости рассматриваемого микромеханического гироскопа RR-типа.

References

1. Peshekhonov V.G. Gyroscopic systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no.3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
2. Lestev A.M., Popova I.V., Evstifeev M.I., Pyatyshev E.N., Lur'e M.S., Semenov A.A. Features of micromechanical gyroscopes. *Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2000, no. 4, pp. 16–18. (In Russian)
3. Barbour N., Hopkins R., Kourepenis A. Inertial MEMS system applications. *Advances in Navigation Sensors and Integration Technology*, 2004, vol. 232, pp. 7-1–7-12.
4. Geen J. Progress in integrated gyroscopes. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004, vol. 19, no. 11, pp. 12–17. doi: 10.1109/MAES.2004.1365660
5. Weinberg H. *Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter. Technical Article MS-2158*. Analog Devices, Inc, 2011, pp. 1–5.
6. Nguyen C. The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) program: success and some unfinished business. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2012, art. 6259750. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259750
7. Evstifeev M.I., Chelpanov I.B. Providing the mechanical stability of MEMS gyros. *Gyroscopy and Navigation*, 2013, no. 1(80), pp. 119–133.
8. Evstifeev M.I. Problems of calculation and design for micromechanical gyroscopes. *Gyroscopy and Navigation*, 2004, no. 1(44), pp. 27–39.
9. Evstifeev M.I. *Teoriya i Metody Rascheta Uprugikh Podvesov Inertsial'nykh Chuvstvitel'nykh Elementov Priborov Navigatsii*. Dis. dokt. tekhn. nauk. St. Petersburg, 2007, 341 p.
10. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Kovalev A.S., Rozentsvein D.V. Results of MEMS gyro mechanical tests. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 119–126. doi: 10.1134/S2075108711030047

11. Evstifeev M.I., Kovalev A.S., Eliseev D.P. Electromechanical model of RR type MEMS gyro with consideration for the platform vibrations. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 174–180. doi: 10.1134/S2075108714030043
12. Eliseev D.P., Kovalev A.S. Investigation of the linear vibrations influence on the MMG RR type with regard to non-linearity of the capacitive sensor. *Navigatsiya i Upravlenie Dvizhenie Materialy XVI Konferentsii Molodykh Uchenykh* [Navigation and control. Proc. XII Conference of Young Scientists]. St. Petersburg, 2014, pp. 406–412. (In Russian)
13. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Chelpanov I.B. MEMS RR-type gyro with a moving electrode. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 4(91), pp. 67–76.
14. Evstifeev M.I., Eliseev D.P. Micromechanical Vibration Gyroscope. Patent RU2561006, 2015.
15. Bernstein J.J., Weinberg M.S. *Comb Drive Micromechanical Tuning Fork Gyro*. Patent US5349855. Published 27.09.1994.
16. Kovalev A.S. *Upravlenie Pervichnymi i Vtorichnymi Kolebaniyami Mikromekhanicheskogo Giroskopa*. Dis. kand. tekhn. nauk [Control of Primary and Secondary Oscillations of a Micromechanical Gyroscope. Dis. Eng. Sci.]. St. Petersburg, 2008, 157 p.
17. Evstifeev M.I. Eliseev D.P., Kovalev A.S., Rozentsvein D.V. Research of the MEMS gyro dynamics under the mechanical impact. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 4(74), pp. 72–76.
18. Kovalev A.S., Gryazin D.G., Shadrin Yu.V., Lychev D.I. Investigation of operation modes of micromechanical gyroscope with superimposed frequencies along the primary and secondary Oscillation axes. *Nauchnoe Priborostroenie (Scientific Instrumentation)*, 2007, vol. 17, no. 1, pp. 91–97.
19. Eliseev D.P. *Povyshenie Vibroustoichivosti Mikromekhanicheskogo Giroskopa RR-tipa*. Dis. kand. tekhn. nauk. [Increasing Vibration Resistance of Micromechanical Gyroscope RR-type. Dis. Eng. Sci.]. St. Petersburg, 2015, 142 p.
20. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Chelpanov I.B. Enhancing the mechanical resistance of micromechanical gyros. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 115–122. doi: 10.1134/S2075108715020042

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Евстифеев Михаил Илларионович | – доктор технических наук, доцент, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mevstifeev@eprib.ru |
| Елисеев Даниил Павлович | – научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, eliseev.dp@gmail.com |
| Mikhail I. Evstifeev | – D.Sc., Associate professor, Chief of department, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mevstifeev@eprib.ru |
| Daniil P. Eliseev | – Scientific researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, eliseev.dp@gmail.com |