

Е.А. БАРАНОВА, М.И. ЕВСТИФЕЕВ, Д.П. ЕЛИСЕЕВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП RR-ТИПА КОМПЕНСАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

*Разработана математическая модель микромеханического гироскопа RR-типа компенсационного преобразования, учитывающая динамику инерционного тела, электро-механические нелинейные эффекты в емкостных преобразователях и асимметрию их параметров в канал вторичных колебаний. Исследована реакция полученной системы на поступательные вибрации. Получено качественное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментальных данных. Выработаны рекомендации по повышению вибрационной устойчивости рассматриваемого датчика.*

**Ключевые слова:** микромеханический гироскоп, вибрации, моделирование, Simulink.

### Введение

Микромеханический гироскоп (ММГ) является одним из наиболее широко применяемых датчиков угловой скорости в современных системах ориентации и навигации, где не требуется высокая точность [1–3]. Большинство ММГ по принципу действия являются вибрационными гироскопами, инерционное тело которых совершает вынужденные (первичные) колебания в определенном направлении. При наличии внешней угловой скорости инерционное тело совершает дополнительные (вторичные) колебания, вызванные кориолисовыми ускорениями. В случае ММГ LL-типа первичные и вторичные колебания являются поступательными, в случае RR-типа – крутильными. Инерционное тело ММГ LR-типа совершает смешанные колебания [4, 5]. Одним из самых существенных недостатков ММГ является высокая чувствительность к внешним поступательным ускорениям – вибрациям и ударам [6]. Из принципа действия ММГ следует, что этот недостаток можно преодолеть, возбуждая крутильные первичные и вторичные колебания. Другими словами, преимущество ММГ RR-типа над ММГ LL-типа заключается в нечувствительности первых к поступательной вибрации. Однако экспериментальные исследования ММГ RR-типа разработки ЦНИИ «Электроприбор» показали резонансные усиления в выходном сигнале датчика при воздействии посту-

---

**Баранова** Евгения Александровна. Магистрант, Университет ИТМО (Санкт-Петербург).

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

**Елисеев** Даниил Павлович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер Университета ИТМО.

Статья по докладу на XIX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (с международным участием), 2017.

пательной вибрации на частотах, субкратных собственным частотам крутильных колебаний [7].

Настоящая работа посвящена исследованию причин проявления резонансных усилений в выходном сигнале ММГ RR-типа компенсационного преобразования. Для достижения поставленной цели в среде Simulink составлена математическая модель исследуемого датчика, учитывающая динамику инерционного тела, электромеханические нелинейные эффекты в емкостных преобразователях и асимметрию их параметров в канале вторичных колебаний.

### Описание микромеханического гироскопа RR-типа

Схема рассматриваемого чувствительного элемента ММГ показана на рис. 1. Упругие элементы и ротор в виде диска диаметром 3 мм и толщиной 60 мкм выполнены из монокристаллического кремния. Первичные угловые колебания ротора  $\gamma$  возбуждаются электростатическим двигателем вокруг оси Z. При наличии внешней угловой скорости  $\Omega$ , действующей вдоль оси Y, возникают силы Кориолиса, которые обуславливают возбуждение вторичных угловых колебаний  $\alpha$  вокруг оси X. Амплитуда вторичных колебаний измеряется датчиками угла, расположенными под ротором [8].

В настоящее время разработаны модификации ММГ RR-типа с системами управления прямого и компенсационного преобразований. Различие между этими двумя модификациями прибора заключается в способе формирования выходного сигнала: в первом случае он формируется на основе сигнала об изменении положения ротора с датчика угла, во втором – с датчика момента. При этом датчиком момента создается усилие, поддерживающее ротор в невозмущенном состоянии ( $\alpha \approx 0$ ).

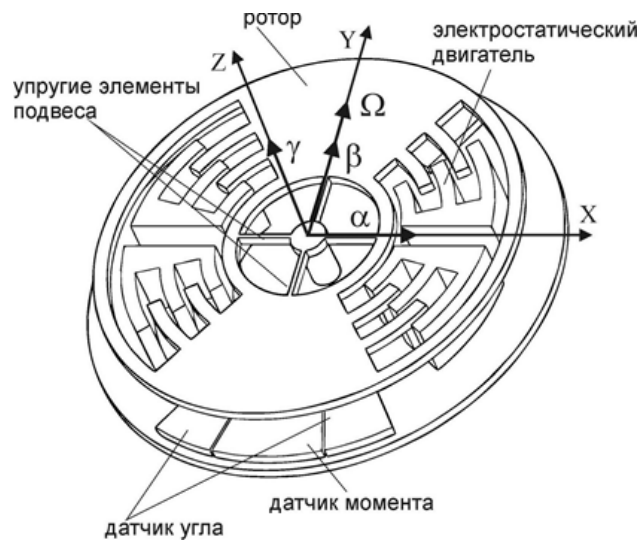


Рис. 1. Схема ММГ

Первичные колебания ротора осуществляются на резонансной частоте  $\omega_1$  упругого подвеса с целью обеспечить наибольшую амплитуду при наимень-

ших энергетических затратах. В силу законов физики вторичные колебания также возникают на резонансной частоте  $\omega_1$ , при этом значение собственной частоты вторичных колебаний равно  $\omega_2$ . Конструктивные параметры упругого подвеса ротора выбираются таким образом, чтобы обеспечить  $\omega_1 < \omega_2$ . Сверхмалые размеры ММГ обуславливают значение собственных частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  от единиц до нескольких десятков кГц [9], а в рассматриваемом датчике они составляют 3 и 3,1 кГц соответственно. Такие значения приводят к амплитуде колебаний ротора порядка долей микрометров, для измерения которых необходимо использовать преобразователь емкостного типа, обеспечивающий точность измерения порядка долей пФ.

Приведенные значения собственных частот были выбраны для обеспечения нечувствительности ММГ к поступательной вибрации в диапазоне частот до 3 кГц. Однако экспериментальные исследования рассматриваемого датчика с системой управления прямого преобразования показали, что поступательные вибрации вызывают в его выходном сигнале высокий уровень шума с резонансными усилениями на частотах, субкратных  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (рис. 2, а). Полученные эффекты объясняются нелинейностью характеристик датчика угла [10].

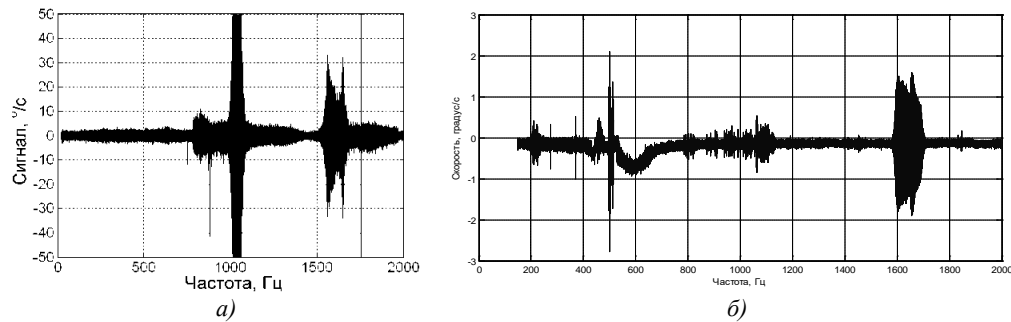


Рис. 2. Выходной сигнал ММГ при воздействии поступательной вибрации:  
 а) ММГ с системой управления прямого преобразования;  
 б) ММГ с системой управления компенсационного преобразования

Датчик угла состоит из двух диаметрально расположенных преобразователей, что позволяет использовать их в дифференциальном режиме. Одна обкладка каждого преобразователя закреплена на неподвижном основании, вторая – на подвижном роторе. Упрощенная математическая модель подобного датчика для малых значений углов  $\alpha$  может быть записана следующим образом:

$$C_0(\alpha) = C_1 - C_2 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot [(d - \alpha \cdot R)^{-1} - (d + \alpha \cdot R)^{-1}], \quad (1)$$

где  $C_0$  – емкость датчика угла;  $C_1$  и  $C_2$  – емкости каждого преобразователя в отдельности;  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  – относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости среды соответственно;  $S$  – площадь обкладки преобразователя;  $d$  – номинальный зазор между обкладкой преобразователя и ротором;  $R$  – радиус до геометрического центра обкладки.

При наличии поступательной вибрации модель (1) переписывается в следующем виде:

$$C_0(\alpha, \delta d) = C_1 - C_2 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot [(d - \alpha \cdot R + \delta d)^{-1} - (d + \alpha \cdot R + \delta d)^{-1}], \quad (2)$$

где  $\delta d$  – изменение зазора между обкладками преобразователей, вызванное вибрацией основания.

Таким образом, очевидно, что поступательные вибрации вызывают дополнительные нелинейности в емкостных преобразователях. Эти нелинейности усиливаются в случае учета асимметрии емкостей между двумя преобразователями в невозмущенном состоянии ( $\alpha = \delta d = 0$ ), которое можно описать коэффициентом  $\Delta = C_1(0)/C_2(0)$ . В реальных приборах описанная асимметрия проявляется в виде неравенства площадей обкладок, неравенства длины электрических проводников и прочими технологическими погрешностями изготовления.

Ранее авторами проведено исследование [10], в ходе которого объясняются причины проявления резонансных усилений на субкратных частотах для ММГ RR-типа прямого преобразования. Показано, что причина возникновения описанных явлений заключается в конечной жесткости упругого подвеса, вызывающей изменение зазора между электродами емкостных преобразователей в системе управления и увеличение нелинейности их характеристик [10]. Очевидно, что применение системы управления компенсационного преобразования в ММГ уменьшает практически до нуля относительные перемещения электродов, снижает нелинейности емкостных преобразователей и повышает вибрационную устойчивость датчика [9]. Тем не менее экспериментальные исследования ММГ RR-типа компенсационного преобразования показали, что такой датчик остается чувствительным к поступательным вибрациям и в его выходном сигнале также проявляются резонансные усиления (рис. 2, б) [11].

Для исследования полученных эффектов необходимо составление новой математической модели ММГ RR-типа компенсационного преобразования. При этом из приведенных ранее выводов очевидно, что помимо системы управления компенсационного преобразования эта модель должна учитывать целый ряд факторов: динамику инерционного тела, электромеханические нелинейные эффекты в емкостных преобразователях и асимметрию их параметров в канале вторичных колебаний.

### **Математическая модель ММГ RR-типа компенсационного преобразования**

Известна математическая модель ММГ RR-типа [10], учитывающая динамику инерционного тела, электромеханические нелинейные эффекты (2) и асимметрию параметров емкостных преобразователей  $\Delta$ . Однако в этой модели используется система управления прямого преобразования, что не позволяет ее использовать для настоящих исследований. Вместе с тем в работе [12] составлена математическая модель ММГ RR-типа на основе системы управления компенсационного преобразования, которая не учитывает динамику инерционного тела. Решение поставленной в настоящей работе задачи требует совмещения моделей [10] и [12]: настройки необходимых коэффициентов преобразования и синхронизации их во временной области. В результате описанных действий в среде Simulink составлена искомая модель, упрощенная блок-схема которой приведена на рис. 3.

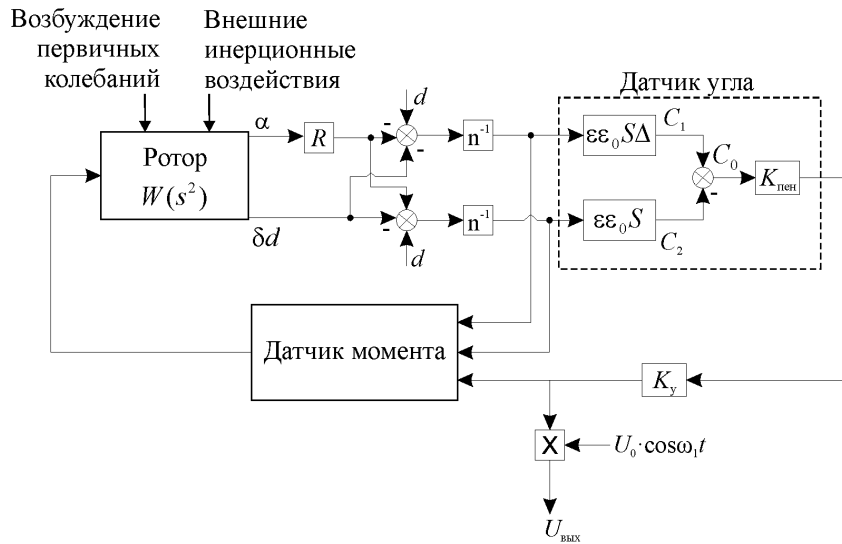


Рис. 3. Упрощенная блок-схема модели ММГ RR-типа компенсационного преобразования:  $n^{-1}$  – оператор преобразования;  $K_{пен}$  – коэффициент передачи преобразователя «емкость-напряжение»;  $K_y$  – коэффициент передачи блока формирования управляющего напряжения;  $U_0$  – опорное напряжение демодулирующего сигнала;  $U_{вых}$  – выходной сигнал

Полученная модель учитывает динамику инерционного тела, электро-механические нелинейные эффекты в емкостных преобразователях, асимметрию их параметров и включает систему управления компенсационного преобразования. Таким образом, составленная модель может быть использована для исследования режимов работы ММГ RR-типа компенсационного преобразования, в том числе и при воздействии поступательных вибраций.

### Результаты моделирования

Проведено исследование полученной модели в среде Simulink с целью изучения воздействия на нее вибрационного ускорения (рис. 4). Входное воздействие задавалось методом «качающейся частоты» в диапазоне от 20 до 2000 Гц при фиксированной амплитуде  $980 \text{ м/с}^2$  (10 g).

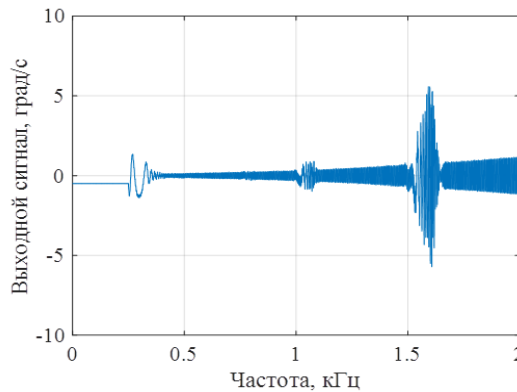


Рис. 4. Выходной сигнал модели ММГ при воздействии поступательной вибрации

При сравнении экспериментальных данных (рис. 2) и результатов моделирования (рис. 4) становится ясно, что выходной сигнал разработанной модели совпадает с выходным сигналом экспериментального образца. В выходном сигнале модели возникают резонансные усиления на субкратных частотах первичных колебаний. Анализ полученных результатов показал, что причина проявления резонансных усилений в ММГ компенсационного преобразования аналогична причине проявления схожих эффектов в ММГ прямого преобразования и обуславливается асимметрией и нелинейностью характеристик емкостных преобразователей. При этом нелинейности характеристик относительно симметричны и могут быть скомпенсированы при обеспечении работы дифференциального режима, который нарушается из-за неравенства ряда параметров. Следовательно, основная причина проявления резонансных усилений в выходном сигнале – это асимметрия характеристик емкостных преобразователей в составе датчиков угла и момента.

Проведены исследования влияния асимметрии характеристик емкостных преобразователей в составе датчиков угла и влияния асимметрии в датчике момента. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

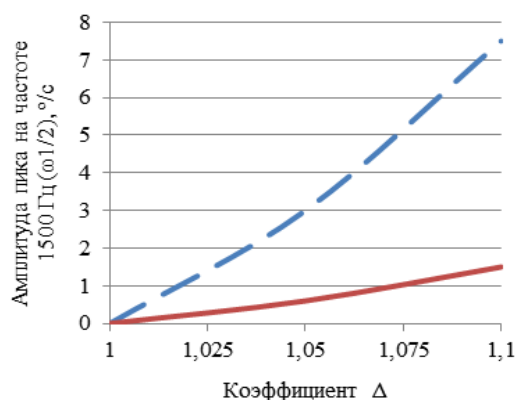


Рис. 5. Моделирование влияния асимметрии характеристик датчиков угла (штриховая линия) и момента (сплошная линия)

Из полученных результатов видно, что влияние на амплитуду резонансных пиков асимметрии емкостных характеристик датчика угла примерно в 5 раз выше, чем влияние аналогичной характеристики датчика момента. Другими словами, асимметрия емкостных характеристик влияет в значительно большей степени на систему управления ротором, чем на его динамику.

Во-первых, полученный результат объясняется тем, что при подаче управляющих напряжений на обкладки преобразователей датчика момента, обладающие неодинаковыми характеристиками, создается усилие, которое отклоняет ротор на фиксированную величину. Полученное отклонение детектируется системой управления и вычитается из выходного сигнала аналогично коэффициенту смещения нуля.

Во-вторых, для объяснения большего влияния асимметрии емкостных характеристик на систему управления необходимо рассмотреть ее математическую модель. Выходной сигнал ММГ  $U_{\text{вых}}$  формируется на основе напряжения, удерживающего ротор в неподвижном состоянии. Последнее получается преобразованием дифференциальной емкости датчика угла (2) в напряжение

при помощи блока с коэффициентом передачи  $K_{\text{пен}}$  и последующим его преобразованием в блоке формирования управляющего напряжения с коэффициентом  $K_y$ . В связи с тем что ММГ является вибрационным гироскопом, полученный сигнал модулирован собственной частотой  $\omega_1$  упругого подвеса, и для выделения сигнала, пропорционального внешней угловой скорости  $\Omega$ , необходимо провести демодуляцию и отфильтровать сигнал фильтром нижних частот [13]. Таким образом, выходной сигнал ММГ компенсационного преобразования можно записать в виде

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{пен}} \cdot K_y \cdot C_0 \cdot U_0 \cdot \cos \omega_1 t, \quad (3)$$

где  $U_0$  – опорное напряжение демодулирующего сигнала,  $t$  – время.

Выражение (2) с учетом колебательных составляющих слагаемых и асимметрии емкостных характеристик может быть представлено следующим образом:

$$C_0(\alpha, \delta d) = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot [(d - \alpha \cdot R \cdot \cos \omega_1 t + \delta d \cdot \cos \nu t)^{-1} - \Delta \cdot (d + \alpha \cdot R \cdot \cos \omega_1 t + \delta d \cdot \cos \nu t)^{-1}], \quad (4)$$

где  $\nu$  – частота действующей вибрации.

Принимая  $d^2 \gg (\alpha \cdot R \cdot \cos \omega_1 t + \delta d \cdot \cos \nu t)^2$ , выражение (4) можно переписать в соотношении

$$C_0(\alpha, \delta d) = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot d^{-2} \cdot [(1 + \Delta) \cdot \alpha \cdot R \cdot \cos \omega_1 t + (1 - \Delta) \cdot (d + \delta d \cdot \cos \nu t)]. \quad (5)$$

Тогда в соответствии с (3) выходной сигнал датчика после демодуляции определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = K_1 \cdot [(1 + \Delta) \cdot \alpha \cdot R \cdot 0,5(1 + \cos 2\omega_1 t) + (1 - \Delta) \cdot (d + \delta d \cdot 0,5\{\cos(\omega_1 - \nu)t + \cos(\omega_1 + \nu)t\})], \quad (6)$$

где  $K_1 = K_{\text{пен}} \cdot K_y \cdot U_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot d^{-2}$ .

Очевидно, что, пропуская сигнал вида (6) через фильтр нижних частот с частотой среза  $\omega_1$ , слагаемые, содержащие  $\cos 2\omega_1 t$  и  $\cos(\omega_1 + \nu)t$ , будут отфильтрованы, а выходной сигнал примет вид

$$U_{\text{вых}} = K_1 \cdot [0,5(1 + \Delta) \cdot \alpha \cdot R + (1 - \Delta) \cdot (d + 0,5\delta d \cdot \cos(\omega_1 - \nu)t)]. \quad (7)$$

В идеальной конструкции ММГ коэффициент  $\Delta = 1$ , в результате чего второе слагаемое в квадратных скобках выражения (7) равно нулю, а сам датчик нечувствителен к поступательной вибрации. В реальных конструкциях асимметрия характеристик может достигать 15% [10] (то есть коэффициент  $\Delta = 1,15$ ), что, согласно (7), приводит к снижению вибрационной устойчивости ММГ. Большее влияние асимметрии емкостных характеристик на систему управления, чем на динамику ротора, объясняется частотной характеристикой второго слагаемого, которая зависит от частоты внешней вибрации. Причем при воздействии вибрации на частоте  $\nu = \frac{\omega_1}{2}$  последняя

совпадет с собственной частотой выходного сигнала (7)  $\omega_1 - \frac{\omega_1}{2} = \frac{\omega_1}{2}$ ,

что и объясняет проявление резонансных усилений, полученных экспериментально и с помощью моделирования.

Результаты анализа реакции ММГ RR-типа компенсационного преобразования на поступательную вибрацию позволяют выделить основную причину проявления резонансных усилений в виде несовершенства системы управления датчика. Для повышения вибрационной устойчивости рассматриваемого датчика следует разработать новый алгоритм фильтрации выходного сигнала ММГ с учетом выражения (6). Новый алгоритм должен отфильтровывать не только высокочастотные компоненты сигнала, но и частоты, субкратные собственным частотам упругого подвеса ротора.

### Моделирование воздействия угловой скорости

Разработка экспериментального оборудования, позволяющего одновременно задавать и угловую скорость, и линейное ускорение, – достаточно сложная техническая задача [14, 15]. Известны некоторые решения этой задачи [16, 17], но массового практического применения они не получили. Тем не менее полученное качественное совпадение экспериментальных данных и результатов моделирования ММГ RR-типа с учетом электромеханических нелинейных эффектов в емкостных преобразователях позволяет исследовать виброустойчивость моделируемого датчика и определить влияние вибрационных воздействий на его характеристики. С этой целью проведено моделирование одновременного воздействия на ММГ RR-типа постоянной угловой скорости  $\Omega = 20$  °/с и поступательной вибрации в диапазоне частот от 200 до 2000 Гц с амплитудой ускорения от 2 до 10 g. На рис. 6 представлены выходные сигналы модели при указанных воздействиях. Прямая линия в начале представленных графиков соответствует воздействию только внешней угловой скорости без вибрации.

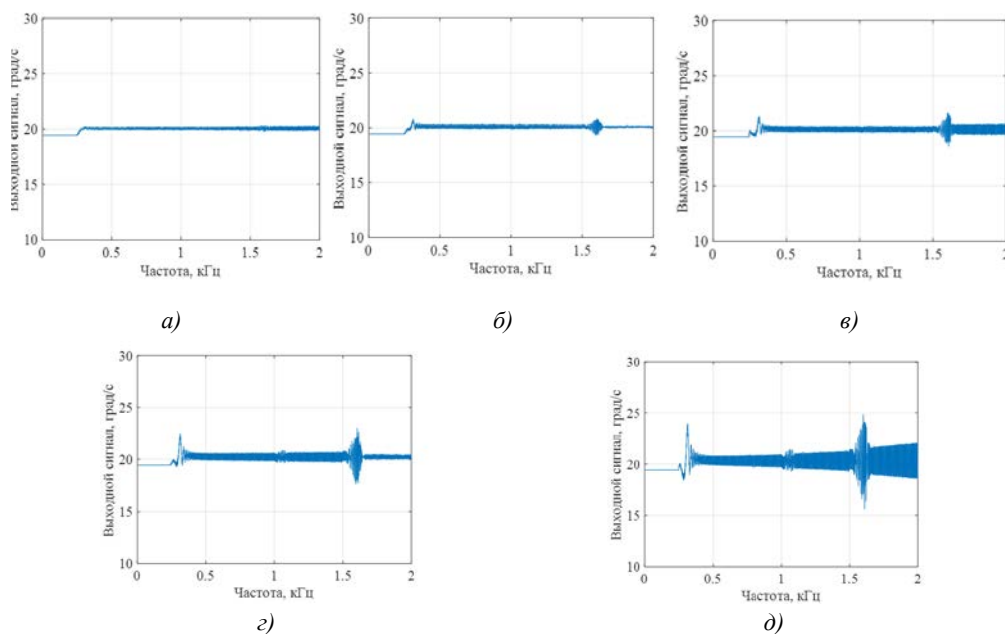


Рис. 6. Выходной сигнал модели ММГ RR-типа при воздействии угловой скорости  $\Omega = 20$  °/с и поступательной вибрации с амплитудой: а) 2 g, б) 4 g, в) 6 g, г) 8 g, д) 10 g



Видно, что резонансные усиления на субкратных частотах первичных колебаний в выходном сигнале гироскопа сохраняются при воздействии угловой скорости  $\Omega$ .

Рассчитано значение погрешности определения угловой скорости при воздействии вибрации по следующей формуле:

$$\delta\Omega = |\Omega - U_{cp}|, \quad (8)$$

где  $U_{cp}$  – среднее значение выходного сигнала модели ММГ.

Зависимость погрешности определения угловой скорости от амплитуды вибрации приведена на рис. 7.

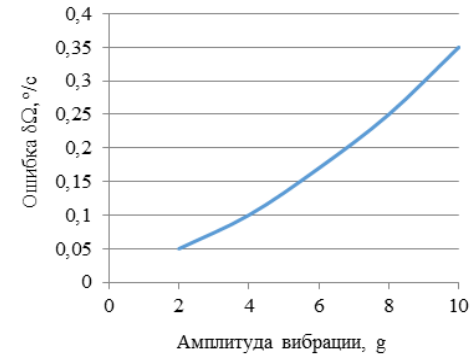


Рис. 7. Зависимость погрешности определения угловой скорости от амплитуды вибрации при действующей на основание угловой скорости  $\Omega$

По полученным данным видно, что эта зависимость имеет нелинейный характер. Тем не менее ее можно аппроксимировать полиномом, порядок которого определяется точностью решаемой задачи, а коэффициенты полученного полинома учесть при построении нового фильтра выходного сигнала.

### Заключение

В ходе работы разработана адекватная математическая модель ММГ RR-типа компенсационного преобразования, учитывающая динамику инерционного тела, электромеханические нелинейные эффекты в емкостных преобразователях и асимметрию их параметров. Составленная модель позволила исследовать реакцию рассматриваемого датчика на воздействие поступательных вибраций в среде Simulink и выделить основную причину проявления резонансных усилений в виде несовершенства системы управления датчика.

Для повышения вибрационной устойчивости рассматриваемого датчика следует разработать новый алгоритм фильтрации выходного сигнала ММГ, который должен отфильтровывать не только высокочастотные компоненты сигнала, но и частоты, субкратные собственным частотам упругого подвеса ротора.

Дальнейшие исследования авторов в этом направлении будут направлены на определение возможности возникновения резонансных явлений на частотах ниже резонансной в 4 и более раз при повышении собственных частот упругого подвеса инерционного тела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В. Г., Евстифеев М. И., Некрасов Я. А., Моисеев Н. В., Павлова С. В. Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. № 19. С. 108–114.
2. Peshekhonov V. G., Nekrasov Y. A., Pfluger P., Kergueris C., Haddara H., Elayed A. The results of an RR-type micromechanical gyroscope // IEEE Aerospace and electronic systems magazine. 2011. № 1. С. 14-21. DOI: 10.1109/MAES.2011.5719651.
3. Claire T., Guillaume G., Mike P. High-End Gyroscopes, Accelerometers and IMUs for Defense, Aerospace & Industrial [Электронный ресурс] // Yole Development. 2015.  
Режим доступа: <https://www.i-micronews.com/report/product/high-end-gyroscopes-accelerometers-and-imus-for-defense-aerospace-industrial.html>
4. Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». 2015. 316 с.
5. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие / Тула: Гриф и К. 2004. 476 с.
6. Acar C., Shkel A. MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness. Springer Science & Business Media, 2008.
7. Евстифеев М. И., Елисеев Д. П., Ковалев А. С., Розенцвейн Д. В. Исследование динамики микромеханического гироскопа при механических воздействиях // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. С. 49–58.
8. Ковалев А. С., Евстифеев М. И., Елисеев Д. П. Анализ электромеханической модели микромеханического гироскопа RR-типа // Рефераты докладов. Материалы XXVIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». 2012. 13 с.
9. Елисеев Д. П. Классификация методов повышения стойкости микромеханических гироскопов к инерционным воздействиям // Навигация и управление движением. Материалы XVII конференции молодых ученых. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». Под общей редакцией В.Г. Пешехонова. 2015. С. 569–577.
10. Елисеев Д. П. Повышение виброустойчивости микромеханического гироскопа RR-типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.03. СПб., 2015.
11. Некрасов Я. А., Моисеев Н. В., Беляев Я. В., Павлова С. В., Люкшонков Р. Г. Влияние поступательных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2016. № 2 (93). С. 59–60.
12. Моисеев Н. В. Микромеханический гироскоп компенсационного типа с расширенным диапазоном измерения: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.03 / СПб., 2015.
13. Ковалев А. С. Управление первичными и вторичными колебаниями микромеханического гироскопа: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.03 / Ковалев Андрей Сергеевич. СПб. 2008. 157 с.
14. Синельников А. Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. М.: Изд-во стандартов. 1979. 176 с., ил.
15. Унтилов А. А. Исследование и разработка упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического гироскопа: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.03 / СПб., 2005. 147 с.
16. Авторское свидетельство 398873 СССР, МПК G01P 21/00. Устройство для воспроизведения ускорения / А. Е. Синельников, И. Х. Ибрагимов. № 1728867/18–10; заявл. 24.07.1971; опубл. 27.09.1973, Бюл. № 38. 2 с., ил.
17. Патент 2526508 Российская Федерация, МПК G01P 21/00. Способ оценки динамических характеристик датчиков угловой скорости / Д. Г. Грязин, А. И. Скалон, О. О. Величко; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». № 2013119774/28; заявл. 22.04.2013; опубл. 20.08.2014; Бюл. № 23. 4 с., ил.

---

**E.A. Baranova** (ITMO University, St. Petersburg, Russia), **M.I. Evstifeev, D.P. Eliseev** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia).  
Simulation of translational vibrations effect on torque-to-balance RR-type MEMS gyroscope. *Гироскопия и Навигация*. 2017. Vol. 25. №3 (98). P.86-96.

**Abstract.** A mathematical model of torque-to balance MEMS gyroscope with a drive mode in plane is developed. The model considers compensational control loop, proof-mass dynamics, electromechanical nonlinear effects in capacitive transducers and the inequality

of their parameters. The response of the resulting system to translational vibrations is investigated. Qualitative coincidence of simulation results with experimental data is obtained. A way of increasing vibration reliability is highlighted.

**Key words:** MEMS gyroscope, vibrations, simulation, Simulink.

#### REFERENCES

1. **Peshekhonov, V.G., Evstifeev, M.I., Nekrasov, Ya.A., Moiseev, N.V., and Pavlova, S.V.**, Russian RR-type MEMS Gyro. Current Status and Prospects, *Informatsionnoe Protivodeistvie Ugrozam Terrorizmu*, 2012, No. 19, pp. 108–114.
2. **Peshekhonov V.G., Nekrasov Y.A., Pfluger P., Kergueris C., Haddara H., and Elayed A.** The results of an RR-type micromechanical gyroscope // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Journal*, 2011, No. 1, pp. 14–21. DOI: 10.1109/MAES.2011.5719651.
3. **Claire T., Guillaume G., and Mike P.** High-End Gyroscopes, Accelerometers and IMUs for Defense, Aerospace & Industrial [Online], Yole Development, 2015.  
Access: <https://www.i-micronews.com/report/product/high-end-gyroscopes-accelerometers-and-imus-for-defense-aerospace-industrial.html>
4. **Luk'yanov, D.P., Raspopov, V.Ya., and Filatov, Yu.V.**, *Prikladnaya teoriya giriskopov* (Applied Theory of Gyroscopes), Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 2015, 316 pages.
5. **Raspopov, V.Ya.**, *Mikromekhanicheskie pribory: Uchebnoe posobie* (MEMS Gyros: Tutorial), *Grif i K*, Tula, 2004, 476 pages.
6. **Acar C., and Shkel A.**, MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness, Springer Science & Business Media, 2008.
7. **Evstifeev, M.I., Eliseev, D.P., Kovalev, A.S., and Rozentsvein, D.V.**, *Issledovanie dinamiki mikromekhanicheskogo giroskopa pri mekhanicheskikh vozdeistviyakh* (Research of the MEMS Gyro Dynamics under the Mechanical Impacts), Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, 2011, pp. 49–58.
8. **Kovalev, A.S., Evstifeev, M.I., and Eliseev, D.P.**, Analysis of Electromechanical Model of RR-type MEMS Gyro, *Materialy XXVIII konferentsii pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* (Proceedings of the 28th Conference in Memory of N.N. Ostryakov), St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 2012.
9. **Eliseev, D.P.**, *Klassifikatsiya metodov povysheniya stoikosti mikromekhanicheskikh giroskopov k inertionnym vozeistviyam* (Classification of Methods for Enhancing MEMS Gyro Resistance to Inertial Effects), *Materialy XIV konferentsii molodykh uchenykh "Navigatsia i Upravlenie Dvizheniem"* (Proceedings of the 14th Conference of Young Scientists "Navigation and Motion Control"), Concern CSRI Elektropribor, 2015, pp. 569–577.
10. **Eliseev, D.P.**, *Povyshenie vibroustoichivosti mikromekhanicheskogo giroskopa RR-tipa. Dis. kand. tekhn. nauk.* (Increasing Vibration Resistance of RR-type Micromechanical Gyro, Cand. Eng. Sci. Dissertation), St. Petersburg, 2015.
11. **Nekrasov, Ya.A., Moiseev, N.V., Belyaev, Ya.V., Pavlova, S.V., and Lyukshonkov, R.G.**, Influence of Translational Vibrations, Shocks and Acoustic Noise on MEMS Gyro Performance, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, Vol. 8, No. 1, pp. 31–37.
12. **Moiseev, N.V.**, *Mikromekhanicheskii giroskop kompensatsionnogo tipa s rasshirenym diapazonom izmereniya* (Torque-to-balance MEMS Gyro with Expanded Range of Measurements), Diss. Cand. Eng. Sc. (2003), St. Petersburg, 2015.
13. **Kovalev, A.S.**, *Upravlenie pervichnymi i vtorichnymi kolebaniyami mekromekhanicheskogo giroskopa* (Control of Primary and Secondary Oscillations of MEMS Gyro), Diss. Cand. Eng. Sc. (2003), St. Petersburg, 2008, 157 pages.
14. **Sinel'nikov, A.E.**, *Nizkochastotnye lineinye akselerometry. Metody i sredstva poverki i graduirovki* (Low-frequency Linear Accelerometers. Methods and Means for Verification and Calibration), *Izdatel'stvo standartov*, Moscow, 1979, 176 pages.
15. **Untilov, A.A.**, *Issledovanie i razrabotka uprugogo podvesa chuvstvitel'nogo elementa mikromekhanicheskogo giroskopa* (Research and Development of Elastic suspension for MEMS Gyro Sensor), Diss. Cand. Eng. Sc. (2003), St. Petersburg, 2005, 147 pages.
16. **Sinel'nikov, A.E., and Ibragimov, I.Kh.**, *Ustroistvo dlya vosproizvedeniya uskoreniya* (Acceleration Simulation Device), Certificate of Authorship No. 398873, USSR, 1973.
17. **Gryazin, D.G., Skalon, A.I., and Velichko, O.O.**, *Sposob otsenki dinamicheskikh kharakteristik datchikov uglovoi skorosti* (Method to Estimate Dynamic Characteristics of Angular Rate Sensors), Patent RF 2526508, Concern CSRI Elektropribor, 2014.