

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМАССОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОСТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн

Рассмотрены особенности использования многомассовых систем микромеханических гироскопов. Проанализированы линейные и угловые осцилляторы с механической и электрической связями между осцилляторами. Приведены требования к параметрам конструкции, обеспечивающие повышение стойкости к вибрационным перегрузкам.

**Ключевые слова:** микромеханический гироскоп, связанные осцилляторы, упругий подвес.

### Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется расширению областей применения микромеханических гироскопов (ММГ), изготавливаемых на основе технологий микроэлектронной промышленности. Перспективно использование ММГ в системах автоматического управления движением высокодинамичных объектов, для которых характерны повышенные динамические перегрузки – высокочастотные вибрации в широких диапазонах (в том числе с частотами выше 2 кГц) и интенсивные удары (с уровнями выше 100g) [1].

Принцип работы большинства ММГ аналогичен принципу работы осцилляторных вибрационных гироскопов и основан на измерении перемещений под действием сил Кориолиса, возникающих при угловой скорости основания  $\Omega$  [2]. На рис. 1 изображен чувствительный элемент в виде осциллятора на упругом подвесе. Инерционное тело (диск) в упругом подвесе под действием электростатического привода в автоколебательном режиме совершает первичные угловые колебания в плоскости диска с постоянной частотой  $\omega_1$  и амплитудой  $A_1$ . При наличии угловой скорости основания под воздействием кориолисовых сил возникают вторичные угловые колебания инерционного тела на частоте первичных колебаний. Амплитуда вторичных колебаний пропорциональна угловой скорости основания и измеряется емкостными датчиками.

Для повышения коэффициента преобразования ММГ выгодно использовать резонансную настройку (сведение частот первичных  $\omega_1$  и вторичных  $\omega_2$  колебаний инерционного тела, диска), при этом используется высокая добротность по оси вторичных колебаний. Исходя из требования повышения коэффициента преобразования, желательно понижение собственной частоты [3]. В то же время минимальная чувствительность ММГ к вибрации основания имеет место при значениях собственных частот осциллятора выше верхней границы частотного спектра вибрации, что исключает возникновение резонансных явлений в конструкции прибора. Это приводит к противоречию между достижением максимальной чувствительности прибора и обеспечением нечувствительности к вибрации основания.

Один из путей снижения чувствительности ММГ к поступательной вибрации состоит в использовании только угловых колебаний (рис. 1). Для идеального прибора при отсутствии технологических погрешностей (статического и динамического дисбалансов) и при равножесткости упругого подвеса поступательная вибрация не оказывает влияния на показания прибора [4]. Тем не менее, ММГ с угловым осциллятором остается чувствительным к угловым вибрациям основания.

Следует отметить, что в технических требованиях, как правило, регламентируется воздействие линейной вибрации, при этом факт существования угловой вибрации игнорируется. Однако в действительности имеют место и линейные, и угловые колебания. По экспериментальным данным, спектральная плотность случайных вибраций для определенного класса объектов, на которых предполагается установка ММГ, имеет

следующий порядок величин: уровень случайной поступательной вибрации –  $0,1-10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$ , а уровень случайной угловой вибрации, коррелированной с поступательной, – около  $10 \text{ с}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$  [5]. На частотах, соответствующих значениям собственных частот первичных и вторичных колебаний порядка 3 кГц, амплитуды угловых вибраций могут составлять 0,3 угловых секунд.

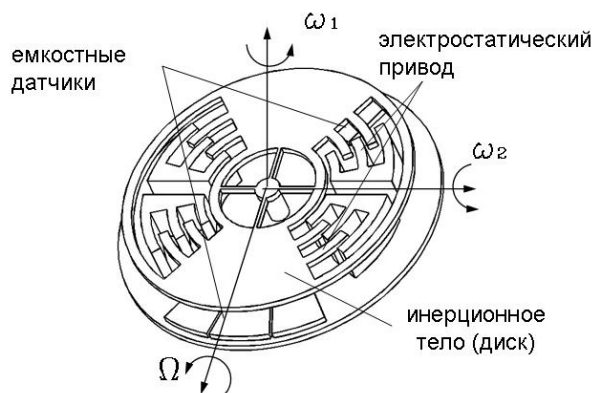


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента ММГ:  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – частоты первичных и вторичных колебаний;  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость основания

### Механически связанные осцилляторы

Устранение указанного противоречия между повышением чувствительности к измеряемой угловой скорости и снижением чувствительности к инерционным воздействиям основания вследствие угловых колебаний последнего может быть достигнуто использованием многомассовых систем ММГ. Известные технические решения в основном относятся к линейным осцилляторам, которые содержат два противофазно колеблющихся инерционных тела в собственных упругих подвесах с идентичными частотными характеристиками. Связь между телами может осуществляться с использованием дополнительных упругих элементов, как в приборе компании Litef (Германия) [6], либо с использованием электрических контуров синхронизации, как в гироскопах ADXRS фирмы Analog Devices (США) [7].

Известна конструкция ММГ с двумя угловыми осцилляторами, связанными дополнительным упругим элементом [8]. Здесь два угловых осциллятора (рис. 2) совершают противофазные первичные угловые колебания. При движении основания с угловой скоростью, вектор которой направлен по оси чувствительности прибора, инерционные тела совершают противофазные вторичные колебания, а при угловых вибрациях основания вторичные колебания осцилляторов будут синфазными. Авторами показано, что дополнительный (соединительный) упругий элемент должен иметь минимальную жесткость в противофазном движении и значительную жесткость в синфазном движении. Это позволяет при определенном включении электродов емкостных датчиков измерения вторичных колебаний (рис. 2) получить нечувствительность ММГ к угловым ускорениям основания.

Преимущества такой конструкции заключаются в том, что механическое соединение осцилляторов с помощью соединительного упругого элемента позволяет создать связанную колебательную систему. Желательно, чтобы в рабочем автоколебательном режиме при противофазных первичных угловых колебаниях амплитуды обоих инерционных тел были равны, только при этом будет иметь место полная компенсация по отношению к угловым колебаниям основания. Однако неизбежное различие параметров упругих подвесов приводит к различиям амплитуд в связанной механической системе. Авторами получено, что при несовпадении парциальных собственных частот  $\omega_1^{(1)}$  и

$\omega_1^{(2)}$  двух инерционных тел относительная разность  $(\Delta A/A)$  амплитуд  $A_1^{(1)}$  и  $A_1^{(2)}$  свободных противофазных колебаний определяется формулой

$$\Delta A/A = k [(\omega_1^{(1)})^2 - (\omega_1^{(2)})^2] / \omega_c^2,$$

где  $k$  – безразмерный параметр порядка единицы, а  $\omega_c$  – собственная частота синфазных связанных колебаний (эти колебания не реализуются в рабочем режиме, а только могут быть рассчитаны).

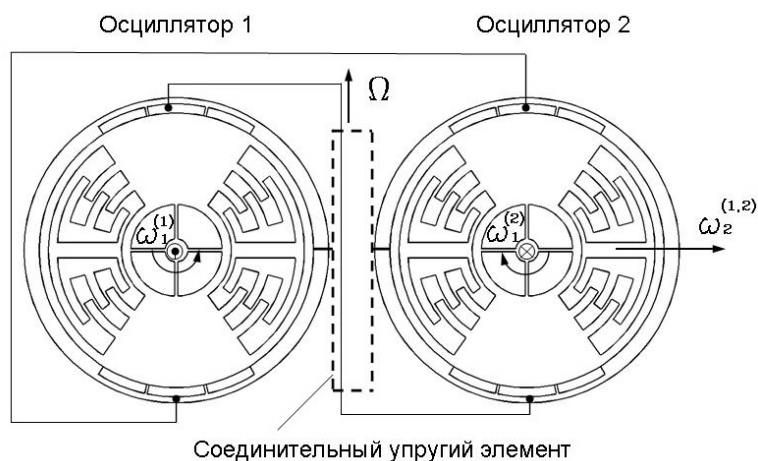


Рис. 2. Конструкция ММГ с двумя угловыми осцилляторами

Из этого следует, что при очевидности требования близости парциальных частот целесообразно выбирать такие формы соединительного упругого элемента, чтобы он имел возможно большую жесткость при синфазных колебаниях при ограниченной жесткости в противофазных. Таким образом, соединительный элемент, как указано выше, должен обладать определенными упругими характеристиками и, кроме того, обеспечивать требуемые упругие свойства в синфазных и противофазных первичных и вторичных колебаниях.

Представленный подход имеет существенные ограничения в настройке и обеспечении требуемых свойств чувствительного элемента ММГ. Для обеспечения равенства амплитуд противофазных первичных колебаний при наличии неравенства парциальных частот первичных колебаний отдельных осцилляторов необходимы другие, специальные средства.

### Механически не связанные осцилляторы

Одним из вариантов, расширяющих возможности настройки, является построение ММГ на основе механически не связанных угловых осцилляторов. При этом связь между осцилляторами осуществляется только электрически. Для реализации такой схемы необходимо обеспечить точную настройку первичных частот осцилляторов и оценить, в каком диапазоне может существовать разброс частот первичных колебаний осцилляторов.

Оценка значимости технологических погрешностей изготовления различных упругих подвесов показывает, что основное влияние на частоты первичных колебаний оказывает ширина упругих элементов, и это влияние на собственную частоту оценивается величиной порядка 300–500 Гц/мкм [9]. При достижимой точности изготовления на уровне 0,2 мкм разброс частот составит порядка 60–100 Гц. Для компенсации технологических погрешностей изготовления, приводящих к разбросу собственных частот,

могут быть использованы различные устройства, создающие электрическую жесткость по оси первичных колебаний, в том числе:

- электростатические двигатели первичных колебаний, у которых зубцы выполнены с определенным наклоном по отношению друг к другу. Это позволяет создавать дополнительные силы для регулирования частоты первичных колебаний;
- несоосные электроды, центр которых не совпадает с центром вращения инерционного тела в упругом подвесе;
- дополнительные плоские электроды, расположенные, например, вдоль упругих элементов подвеса для создания дополнительной электрической жесткости вокруг оси первичных колебаний (рис. 3). Такая система аналогична системе электрической жесткости для регулировки частоты вторичных колебаний [3].

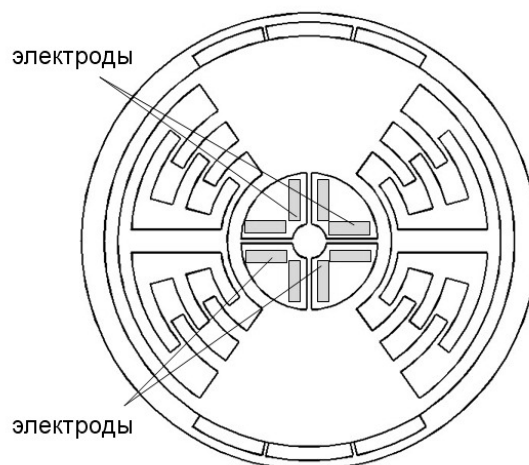


Рис. 3. Электроды для создания электрической жесткости по оси первичных колебаний

Оценим эффективность последнего решения. Создаваемая дополнительная электрическая жесткость описывается выражением [3]

$$C_{\text{эл}} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 r^2 S U^2}{d_0^3} = K U^2,$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $r$  – расстояние от центра инерционного тела до центра электрода;  $S$  – площадь электрода;  $U$  – электрическое напряжение;  $d_0$  – зазор в датчике.

Требуемое напряжение для создания изменения частоты на  $\Delta\omega_{\text{эл}}$  составит

$$U = 2\pi \sqrt{\frac{2J\Delta\omega_{\text{эл}}\omega_1}{K}},$$

где  $J$  – момент инерции диска по оси первичных колебаний. На основании последней формулы для 8 электродов при параметрах гироскопа  $\varepsilon = 1$  (вакуум);  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $r = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $S = 1,8 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>;  $d_0 = 3 \cdot 10^{-6}$  м;  $J = 7,8 \cdot 10^{-13}$  кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_1 = 3000$  Гц для компенсации  $\Delta\omega_{\text{эл}} = 60$  Гц в системе подстройки частоты требуется создать электрическое напряжение  $U = 21$  В. Требование к относительной величине совпадения частот вторичных колебаний  $\delta_{\omega_2}$  для обеспечения нечувствительности к угловой вибрации основания может быть оценено с использованием следующего выражения:

$$\delta_{\omega_2} = \delta\Omega / \omega_2 \alpha_{\text{в}},$$

где  $\delta\Omega$  – погрешность измерения угловой скорости основания,  $\alpha_{\text{в}}$  – амплитуда угловой вибрации. При  $\delta\Omega = 1,75 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> (0,01 град/с),  $\omega_2 = 18850$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha_{\text{в}} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  рад (0,3 угловых секунды) имеем  $\delta_{\omega_2} = 0,6\%$ , т.е. в абсолютных единицах разность частот не должна превосходить 18 Гц. Как показано в работе [9], совпадение частот с требуемой точно-

стью может быть обеспечено системой электрической жесткости с использованием электродов, расположенных под диском.

### Заключение

Использование многомассовых систем позволяет повысить вибростойкость ММГ для применения их в качестве датчиков угловой скорости высокочастотных объектов. Подобные ММГ допускается использовать в частотном диапазоне вибраций, включающем частоты собственных колебаний осцилляторов. Такое решение требует точной настройки собственных частот осцилляторов. Для этого могут быть использованы системы электрической жесткости, позволяющие компенсировать технологические разбросы частот вследствие погрешностей изготовления элементов конструкции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 07-08-00699.

### Литература

1. Пешехонов В.Г. и др. Микромеханический гироскоп для высокочастотных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2007. Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2007. – С. 442–444.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
3. Кучерков С.Г., Шадрин Ю.В. К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа // Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – С. 94–101.
4. Евстифеев М.И. Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 2. – С. 19–25.
5. Geen J. Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine. – November, 2004. – P. 12–17.
6. Geiger W. et al. Test Results of the Micromechanical Coriolis Rate Sensor  $\mu$ CORS II // Symposium Gyro Technology. – 2004, Stuttgart, Germany.
7. Geen J., Krakauer D. New iMEMS<sup>®</sup> Angular-Rate-Sensing Gyroscope // Analog Dialogue. – March 2003. – Volume 37. – № 3. – P.12–14.
8. U.S. Patent 5635640. Micromachined Device with Rotationally Vibrated Masses / Geen J.; Analog Devices, Inc. – Jun. 3, 1997. – 16 p.
9. Евстифеев М.И., Унтилов А.А. Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2003. – № 2. – С. 24–31.

- Евстифеев Михаил Илларионович* – ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», начальник отдела, доктор технических наук, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru
- Розенцвейн Дмитрий Владимирович* – ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», инженер, аспирант, rosenzwein@mail.ru