

УДК 621.3.049.779

А. А. Тыртычный, А. И. Скалон

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Выбор подвеса чувствительных элементов инерциальных микромеханических датчиков для систем управления малых космических аппаратов

Статья содержит результаты исследований влияния конструктивных особенностей упругого подвеса инерционной массы микромеханического гироскопа, работающего в режиме автоколебаний, на характеристики прибора, в частности на амплитуды колебаний по оси возбуждения и выходной оси. Описан способ определения угла подвеса, обеспечивающего резонанс, что даёт возможность существенно повысить амплитуду колебаний и, соответственно, чувствительность датчика.

Ключевые слова: микромеханика, датчик угловой скорости, гироскоп, автоколебания, упругий подвес, жёсткость, резонанс, чувствительность.

1. Введение

Разработки прецизионных и высокочувствительных микромеханических инерциальных датчиков с цифровым выходом [1], анализ их текущего состояния и перспектив [2] показывают, что добиться значительных успехов в этом направлении позволяет использование в электромеханических приборах компенсационного типа режима автоколебаний.

В этом случае прибор, например акселерометр или датчик угловой скорости (микромеханический гироскоп), работающий в режиме автоколебаний, представляет собой измерительное устройство, в котором подвижный узел прибора – инерционная масса (ИМ) – совершает колебания с некоторыми постоянными амплитудой и частотой, величины которых зависят от параметров системы. При этом наличие входного воздействия приводит к смещению центра колебаний ИМ и соответствующей временной (частотной) модуляции управляющего сигнала. Глубина модуляции пропорциональна измеряемому воздействию.

Конструкция автоколебательного микромеханического гироскопа (АММГ) описана в работе [3].

Одним из важнейших элементов микромеханических датчиков (ММД) является подвес инерционных масс, представляющий собой упругие элементы, параметры которых существенным образом влияют на метрологические характеристики приборов. Среди основных требований к упругим элементам подвеса ИМ ММД можно выделить следующие:

- 1) отсутствие перекрестных связей между различными поступательными и вращательными движениями ИМ;
- 2) обеспечение определенной анизотропии упругих свойств подвеса для получения заданных собственных частот и форм собственных колебаний ИМ в подвесе;
- 3) линейность упругих характеристик, малость нелинейных эффектов при всех перемещениях ИМ [4].

2. Системы координат

Для анализа характеристик подвеса ИМ целесообразно принять основание прибора и жёстко связанную с ним несущую раму неподвижными в абсолютной системе координат.

Система координат $OXYZ$ жёстко связана с основанием, система $0^T X^T Y^T Z^T$ – с ИМ таким образом, что её начало находится в центре масс ИМ, как это показано на рис. 1.

При этом ИМ рассматривается как недеформируемое абсолютно жёсткое тело, имеющее шесть степеней свободы относительно системы координат $0XYZ$. Её положение, определяемое положением системы $0^T X^T Y^T Z^T$ относительно системы $0XYZ$, задается шестью независимыми обобщенными координатами: радиус-вектором \vec{R} и матрицей направляющих косинусов K размерности 3×3 . Исходное (невозмущенное) положение ИМ характеризуется радиус-вектором \vec{R}_0 и матрицей K_0 . В произвольном (возмущенном) положении имеем радиус-вектор \vec{R} и матрицу K , при этом переход от системы координат $0^T X^T Y^T Z^T$ к системе $0XYZ$ задается вектором смещения $\vec{\rho}$ и матрицей направляющих косинусов Θ . Схема расположения систем координат приведена на рис. 1.

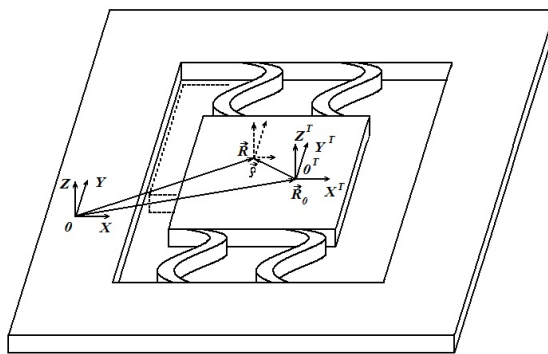


Рис. 1. Схема расположения систем координат

Параметры смещённого положения ИМ можно определить по формулам

$$\vec{R} = \vec{R}_0 + \vec{\rho}; \quad K = \Theta K_0. \quad (1)$$

3. Матрица жёсткости подвеса

В общем виде матрица жёсткости подвеса C размерности 6×6 , содержащая элементы c_{ij} , симметрична ($c_{ij} = c_{ji}$) и определяет зависимость сил и моментов от линейных перемещений и углов поворота ИМ относительно положения равновесия $[\vec{F}, \vec{M}]^T = C * [\vec{\rho}, \vec{\theta}]^T$, где матрица жёсткости C имеет вид

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Верхнюю левую четверть матрицы составляют коэффициенты поступательной жёсткости ($c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{12}, c_{13}, c_{23}$), нижнюю правую четверть составляют коэффициенты поворотной жёсткости ($c_{44}, c_{55}, c_{66}, c_{45}, c_{46}, c_{56}$). Остальные коэффициенты могут быть названы коэффициентами перекрестной, поворотно-поступательной жёсткости ($c_{14}, c_{15}, c_{16}, c_{24}, c_{25}, c_{26}, c_{34}, c_{35}, c_{36}$).

Для дальнейшего анализа сделаем ряд предположений:

- упругие элементы подвеса выполнены без технологических погрешностей и перекрестные связи между различными поступательными и вращательными движениями ИМ отсутствуют,
- расположение упругих элементов подвеса ИМ и их форма, обеспечивающая коэффициент жёсткости c_{33} , значительно больший, чем c_{11} и c_{22} , приводит к тому, что ИМ будет иметь лишь две поступательные степени свободы и одну вращательную,

- полное совпадение упругих свойств элементов подвеса и их симметричное расположение относительно центра масс ИМ приводит к отсутствию вращения ИМ относительно указанной ранее степени свободы.

При принятых допущениях матрица жёсткости подвеса C будет иметь вид

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Упругие элементы подвеса АММГ должны обеспечивать линейное перемещение ИМ по двум осям (OX и OY) и препятствовать перемещению по оси OZ , а также её вращательному движению.

Матрица податливости кремния имеет следующий вид:

$$S' = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0,762 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $S_{12} = S_{13} = S_{23} = S_{21} = S_{31} = S_{32} = -0,214 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $S_{44} = S_{55} = S_{66} = 1,255 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, $S_{14} = S_{15} = S_{16} = S_{24} = S_{25} = S_{26} = S_{34} = S_{35} = S_{36} = S_{45} = S_{46} = S_{56} = S_{41} = S_{51} = S_{61} = S_{42} = S_{52} = S_{62} = S_{43} = S_{53} = S_{63} = S_{54} = S_{64} = S_{65} = 0$ [5].

Для направления, заданного направляющими косинусами l , m и n , модуль упругости кремния равен [5]

$$E = \frac{1}{l^2(l^2 S_{11} + m^2 S_{12} + n^2 S_{13}) + m^2(l^2 S_{21} + m^2 S_{22} + n^2 S_{23}) + n^2(l^2 S_{31} + m^2 S_{32} + n^2 S_{33}) + m^2 n^2 S_{44} + n^2 l^2 S_{55} + l^2 m^2 S_{66}}.$$

Для направления, заданного направляющими косинусами $l = 1$, $m = 1$ и $n = 1$, модуль упругости кремния $= 2,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. Матрица направляющих косинусов имеет вид

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Тогда константа упругости S'_{12} равна компоненте тензора упругости четвёртого порядка S'_{1122} и равна с учётом нулевых элементов матрицы направляющих косинусов: $S'_{12} = S'_{1122} = a_{11}^2 \cdot a_{22}^2 \cdot S_{12} = -0,214 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$. Коэффициент Пуассона $\mu' = -S'_{12} \cdot E = 0,0449$, модуль сдвига равен: $G = \frac{E}{2(1+\mu')} = 1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ [5].

4. Жёсткость криволинейного элемента подвеса

Из физических соображений понятно, что для обеспечения возможности перемещения ИМ по осям OX и OY необходимо использовать криволинейные подвесы, пример которых приведён на рис. 2 [4].

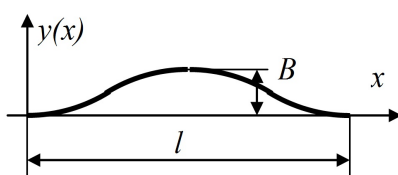


Рис. 2. Общий вид криволинейного подвеса

Для такой формы подвеса коэффициент жёсткости при деформации изгиба будет равен

$$c_{\text{пр.изг.}} = \frac{2Ehb^3}{9lB^2}. \quad (6)$$

Чтобы обеспечить равножёсткость подвеса, целесообразно использовать S -образный упругий элемент подвеса ИМ, приведённый на рис. 3, как совокупность двух криволинейных подвесов с коэффициентами жёсткости при деформации изгиба $c_{\text{пр.изг.1}} = c_{\text{пр.изг.2}} = c_{\text{пр.изг.3}}$. В этом случае коэффициент жёсткости такого подвеса будет равен [4]

$$c_2(k) = \frac{c_{\text{пр.изг.1}} \cdot c_{\text{пр.изг.2}}}{c_{\text{пр.изг.1}} + c_{\text{пр.изг.2}}} = \frac{2Ehb^3}{9lB^2}. \quad (7)$$

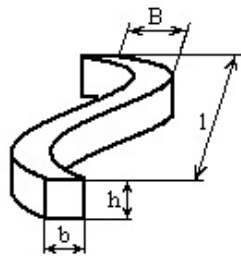


Рис. 3. S -образный упругий элемент подвеса ИМ

При перемещении ИМ вдоль оси OY коэффициент матрицы жёсткости c_{22} в соответствии с принципом суперпозиции будет равен сумме n коэффициентов жёсткости упругих элементов подвеса ИМ:

$$c_{22} = \sum_{k=1}^n c_2(k) = \frac{8Ehb^3}{9lB^2}. \quad (8)$$

Тогда при $b = 10^{-5}$ м, $h = 2 \cdot 10^{-4}$ м, $l = 10^{-3}$ м, $B = 5 \cdot 10^{-4}$ м $c_{22} = 15$ Н/м.

При перемещении ИМ вдоль оси OX деформация изгиба будет иметь вид, показанный на рис. 4.

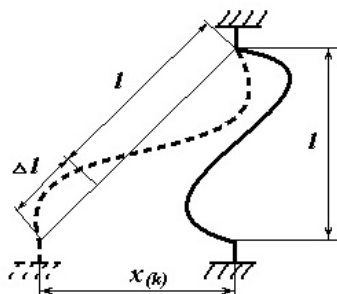


Рис. 4. Деформация изгиба упругого элемента подвеса ИМ при перемещении ИМ вдоль оси OX

В этом случае сила упругости изгиба $F_{\text{упр}(k)}$, действующая на ИМ при перемещении заделки к ИМ k -го упругого элемента подвеса вдоль оси OX на расстояние $x(k)$, будет равна

$$F_{\text{упр}(k)} = c_2(k) \cdot \Delta l. \quad (9)$$

При перемещении ИМ вдоль оси OX сумма проекций этих сил упругости на ось OY для всех четырёх упругих элементов подвеса ИМ будет равна нулю, а проекция этой силы

упругости на ось OX для k -го упругого элемента подвеса ИМ будет равна

$$F_{\text{упр } x(k)} = \frac{c_2(k) \cdot \Delta l_{x(k)} \cdot x(k)}{\sqrt{l^2 + x_{(k)}^2}} = \frac{2Ehb^3}{9lB^2} \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + x_{(k)}^2}}\right) \cdot x(k), \quad (10)$$

где $\Delta l_{x(k)}$ — увеличение длины k -го упругого элемента подвеса ИМ при перемещении его заделки к ИМ вдоль оси OX на расстояние $x(k)$.

Общая сила упругости, действующая на ИМ со стороны упругих элементов подвеса при её перемещении вдоль оси OX , по принципу суперпозиции будет равна

$$F_{\text{упр } x} = \sum_{k=1}^n F_{\text{упр } x(k)} = \frac{8Ehb^3}{9lB^2} \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + x_{(k)}^2}}\right) \cdot x(k). \quad (11)$$

Коэффициент c_{11} будет нелинейным.

Аналогично рассмотренному ранее случаю использования прямоугольного прямого подвеса c_{33} будет существенно превышать c_{11} , что позволяет сделать предположение об отсутствии у ИМ степени свободы на линейное перемещение вдоль оси OX .

5. Жёсткость криволинейного элемента подвеса, расположенного под углом

В случае крепления упругих S -образных элементов подвеса по углам ИМ под углом $\alpha = \frac{\pi}{4}$ к оси OX^T (рис. 5) уравнение силы упругости изгиба $F_{\text{упр } (k)}$, действующей на ИМ при перемещении заделки к ИМ k -го упругого элемента подвеса вдоль оси OX на расстояние $x(k)$, будет также определяться соотношением (10). Деформация упругого элемента подвеса приведена на рис. 6.

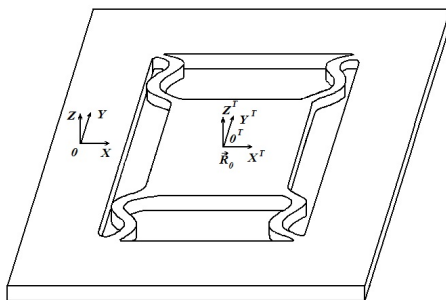


Рис. 5. Вариант расположения упругих элементов подвеса по углам ИМ

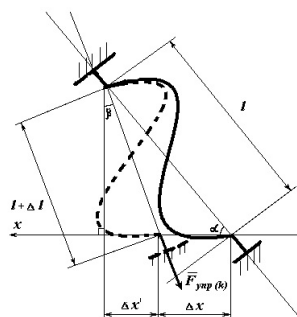


Рис. 6. Деформация изгиба упругого элемента подвеса ИМ при перемещении ИМ вдоль оси OX при расположении упругих элементов подвеса по углам ИМ

При перемещении ИМ вдоль оси OX на расстояние Δx (Δx не превышает значения $l \cdot \cos \alpha$) проекция силы упругости изгиба подвеса $F_{\text{упр } x(k)}$ на ось OX будет равна [6]

$$F_{\text{упр } x(k)} = -\frac{2Ehb^3}{9lB^2} \cdot \left(1 - \frac{l}{\sqrt{\Delta x^2 + l^2 - 2 \cdot \Delta x \cdot l \cdot \cos \alpha}}\right) \cdot (l \cdot \cos \alpha \pm \Delta x). \quad (12)$$

Общая сила упругости, действующая на ИМ со стороны упругих элементов подвеса при её перемещении вдоль оси OX , по принципу суперпозиции будет равна

$$F_{\text{упр } x} = \frac{4Ehb^3}{9lB^2} \cdot \left(2 \cdot \Delta x + \frac{l \cdot (l \cdot \cos \alpha - \Delta x)}{\sqrt{\Delta x^2 + l^2 - 2 \cdot \Delta x \cdot l \cdot \cos \alpha}} - \frac{l \cdot (l \cdot \cos \alpha + \Delta x)}{\sqrt{\Delta x^2 + l^2 + 2 \cdot \Delta x \cdot l \cdot \cos \alpha}}\right). \quad (13)$$

Аналогичным образом общая сила упругости, действующая на ИМ со стороны упругих элементов подвеса при её перемещении вдоль оси OY , по принципу суперпозиции будет равна

$$F_{\text{упр } y} = \frac{4Ehb^3}{9lB^2} \cdot \left(2 \cdot \Delta y + \frac{l \cdot (l \cdot \sin \alpha - \Delta y)}{\sqrt{\Delta y^2 + l^2 - 2 \cdot \Delta y \cdot l \cdot \sin \alpha}} - \frac{l \cdot (l \cdot \sin \alpha + \Delta y)}{\sqrt{\Delta y^2 + l^2 + 2 \cdot \Delta y \cdot l \cdot \sin \alpha}}\right). \quad (14)$$

Как и ранее, жесткость c_{33} по оси OZ будет существенно превышать c_{11} и c_{22} , что позволяет сделать предположение об отсутствии у ИМ линейного перемещения вдоль этой оси.

6. Моделирование динамики ИМ АММГ

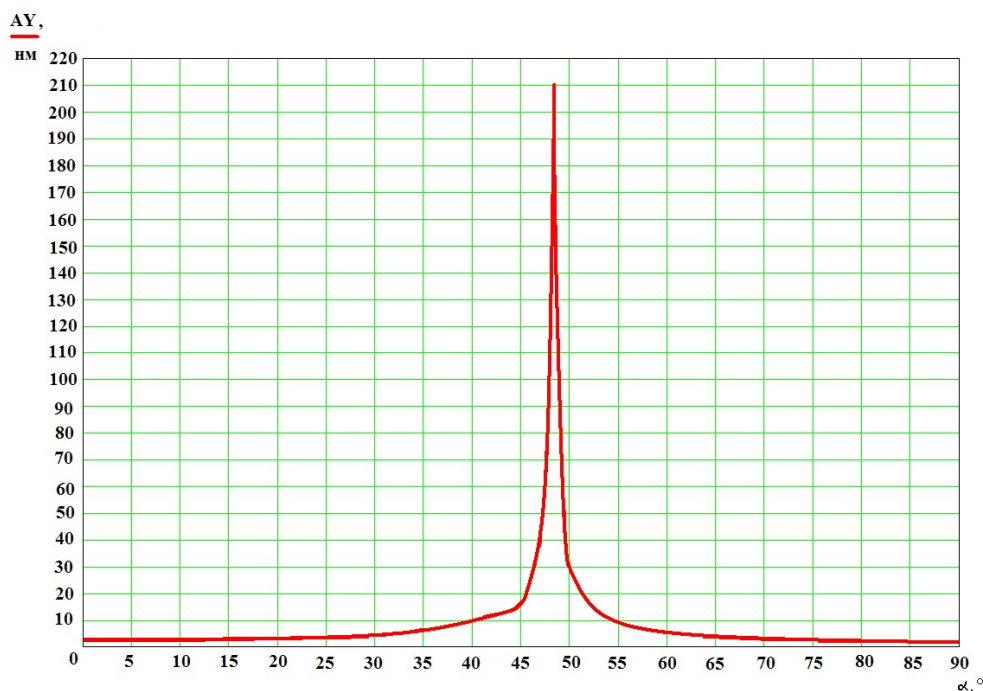


Рис. 7. График зависимости амплитуды колебаний ИМ OY вдоль выходной оси от угла расположения упругих элементов ее подвеса α .

Было проведено моделирование динамики ИМ АММГ с расположением S -образных упругих элементов подвеса по углам ИМ в программной среде Simulink [7]. При моделировании были использованы следующие значения параметров:

масса $m = 2 \cdot 10^{-6}$ кг (ИМ);

коэффициенты демпфирования по осям x и y соответственно $\mu_x = \mu_y = 5 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м;

угловая скорость вращения АММГ вокруг оси чувствительности $\omega_z = 1^\circ/\text{с}$;
сила, создаваемая датчиком силы (ДС) $F_a = 150 \cdot 10^{-6}$ Н;
расстояние от начального положения ИМ, на котором расположены датчики положения (ДП) $x_m = 10 \cdot 10^{-6}$ м;
входное напряжение ДС $U_{\text{пДС}} = 5$ В;
коэффициент преобразования ДС $k_{\text{ДС}} = 30 \cdot 10^{-6}$ Н/В;
коэффициент преобразования ДП $k_{\text{ДП}} = 900$ В/м;
коэффициент преобразования оптического преобразователя $k_{\text{ОП}} = 100$;
постоянная времени ДС $T_2 = 10^{-8}$ с.

На рис. 7 представлен график зависимости амплитуды колебаний ИМ вдоль выходной оси OY от угла расположения упругих элементов подвеса.

Амплитуда колебаний ИМ OY вдоль выходной оси достигает своего максимума при угле $\alpha = 48^\circ 24'$.

7. Выводы

Проведенные исследования и разработанная методика расчета показали, что выбор угла расположения элементов подвеса позволяет осуществить оптимизацию жесткостных характеристик подвеса, существенным образом влияющих на параметры и характер движения ИМ. Особенно важным представляется результат, показывающий наличие области значительного возрастания амплитуды колебаний по выходной оси (оси OY) при угле $\alpha \approx 48^\circ$. Амплитуда колебаний 210 нм обеспечивает высокую чувствительность прибора и хороший динамический диапазон измерения. Таким образом, использование данной методики даёт возможность целенаправленно проводить процесс проектирования подвеса ИМ микромеханических приборов.

Работа, отраженная в данной статье, признана лучшей на Всероссийском конкурсе научных и инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых (МФТИ-2012).

Литература

1. Скалон А.И. Создание микромеханических инерциальных датчиков нового поколения на основе автоколебательных электромеханических систем динамического уравновешивания // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. — 2011. — СПб.; ГУАП.
2. Тыртычный А., Скалон А. Микромеханические гироскопы: состояние разработок и перспективы развития // Датчики и системы. — 2012. — № 2. — С. 59–68.
3. Тыртычный А.А. Анализ характеристик автоколебательного микромеханического гироскопа // Приборы. — 2010. — № 4. — С. 37–44.
4. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1983.
5. Степин П.А. Сопротивление материалов. — М.: Интеграл-Пресс, 1997.
6. Tirtichny A. Choise of suspension's elements of autooscillating micromechanical gyroscope's inertial masses // Modern Information Society Formation — Problems, Perspectives, Innovation Approaches. — 2012. — P. 53–59.
7. Тыртычный А.А. Выбор элементов конструкции микромеханических автоколебательных инерциальных датчиков // Труды МАИ: электронный журнал. — 2010. — № 38.

Поступила в редакцию 10.04.2013.