

УДК 531.383

**А. В. Збруцкий, В. А. Апостолок**

## ДИНАМИКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ РАМКОЙ

### **Аннотация**

*В статье приводятся результаты исследований динамики чувствительного элемента одномассового микромеханического вибрационного гироскопа с дополнительной рамкой. Исследована базовая математическая модель чувствительного элемента и модель его основных погрешностей. Получены аналитические зависимости для погрешностей от поступательных ускорений, поступательной и угловой вибрации. Проанализирована погрешность от нелинейности коэффициента передачи по измеряемой угловой скорости. Получены формулы для оптимального выбора парциальных частот, обеспечивающих необходимую ширину диапазона линейности измерения переносной угловой скорости. Предложены способы устранения основных погрешностей чувствительного элемента.*

### **Введение**

Вибрационные планарные микромеханические гироскопы обладают большим потенциалом в качестве датчиков первичной информации в различных областях применения: виртуальная реальность, индивидуальная навигация, робототехника и многие другие. Благодаря развитию микроэлектронных технологий массового производства стало возможным использование последних для создания недорогих миниатюрных гироскопов. В процессе разработки гироскопа возникают различные задачи, связанные с особенностями динамики его чувствительного элемента. В настоящей статье рассмотрены наиболее важные аспекты динамики чувствительного элемента микромеханического гироскопа с дополнительной рамкой, а также анализ основных источников погрешностей и методы их устранения.

Одной из наиболее ранних конструкций микромеханических гироскопов является карданный микромеханический гироскоп, разработанный специалистами фирмы The Charles Stark Draper Laboratory [1]. Эта конструкция состоит из внешней и внутренней карданных рамок, соединенных посредством упругих торсионов. Входными являются угловые колебания наружной рамки, а выходными - угловые колебания внутренней кардановой рамки. Использование в чувствительном элементе угловых перемещений ограничивает чувствительность инерционных элементов к переносной угловой скорости и снижает добротность такой колебательной системы. Поэтому в конструкциях современных чувствительных элементов микромеханических гироскопов используется поступательное движение инерционных элементов. С другой стороны, преимущества использования конструктивного разделения входного и выходного движения при помощи рамки были использованы во множестве последующих приборов [2,3].

### **Конструкция чувствительного элемента микромеханического гироскопа**

Чувствительный элемент представляет собой конструкцию, изображенную на рис. 1. Он состоит из рамки (2), которая крепится к основанию (6) при помощи четырех одинаковых упругих элементов (5).

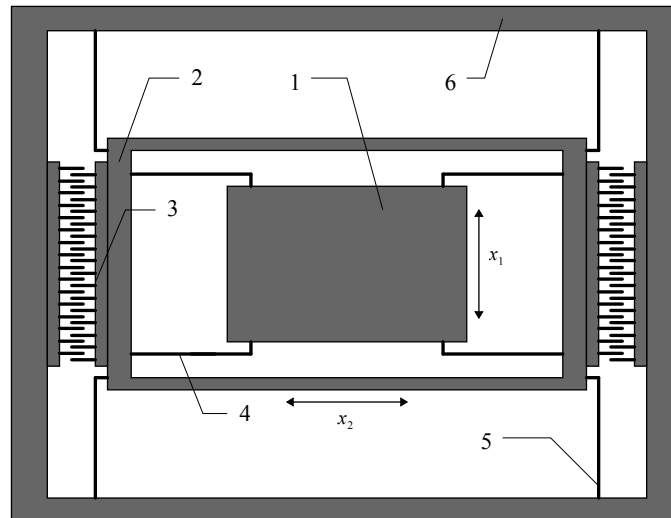


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента гироскопа

На рамке расположена гребенчатая структура (3) двигателя системы возбуждения. Внутри рамки расположена инерционная масса (1), которая соединена с рамкой посредством других четырех упругих элементов (4). Микромеханический вибрационный гироскоп построенный с использованием одномассовой схемы с дополнительной рамкой не имеет вращающихся частей, а вместо этого используется только поступательная вибрация рамки и инерционной массы в направлении взаимно перпендикулярных осей. Колебания рамки и инерционной массы (горизонтальные стрелки на рис.1) возбуждаются электростатически при помощи гребенчатого двигателя. При вращении основания вокруг оси, перпендикулярной плоскости чувствительного элемента, силы Кориолиса вызывают колебания инерционной массы (вертикальные стрелки на рис.1), пропорциональные переносной угловой скорости. Выходные колебания инерционной массы регистрируются емкостной системой съема, и после этого обрабатываются сервисной электроникой прибора.

#### Кинематическая схема и уравнения движения чувствительного элемента

Рассмотренную выше конструкцию чувствительного элемента микромеханического гироскопа с дополнительной рамкой можно представить эквивалентной ей динамической схемой, изображенной на рис. 2. Возбуждение гармонических поступательных колебаний рамки и инерционной массы происходит в направлении оси  $X_2$ .

При вращении чувствительного элемента вокруг оси  $X_3$  на инерционную массу действует Кориолисова сила, которая вызывает поступательную вибрацию инерционной массы в направлении оси  $x_2$ .

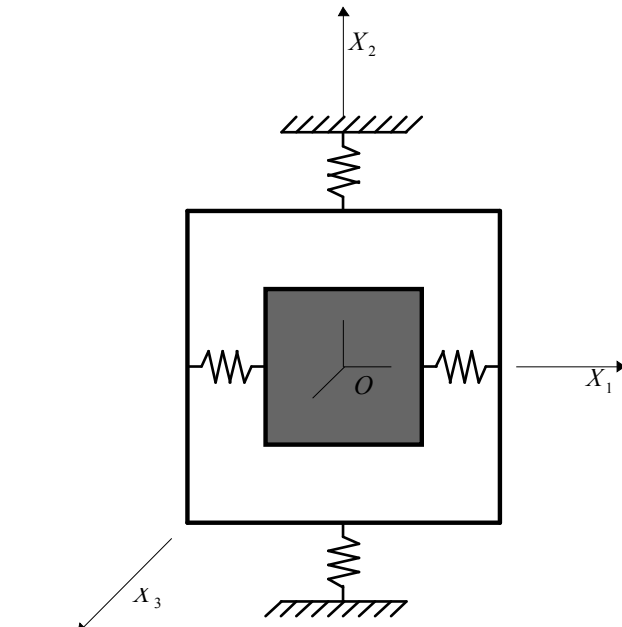


Рис. 2. Кинематическая схема чувствительного элемента

Для анализа движения чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа с дополнительной рамкой на вращающемся основании введем обобщенные координаты:  $x_2$  - смещение рамки и инерционной массы вдоль оси  $X_2$ ,  $x_1$  - смещение инерционной массы относительно рамки в направлении оси  $X_1$  (рис.2). Переносную угловую скорость вращения основания зададим произвольным вектором  $\vec{\Omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3\}$ . Тогда дифференциальные уравнения движения чувствительного элемента могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2h_1\dot{x}_1 + (k_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2)x_1 - 2\Omega_3\dot{x}_2 + (\Omega_1\Omega_2 - \dot{\Omega}_3)x_2 = q_1, \\ \ddot{x}_2 + 2h_2\dot{x}_2 + (k_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2)x_2 + 2d\Omega_3\dot{x}_1 + d(\Omega_1\Omega_2 + \dot{\Omega}_3)x_1 = q_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_1^2 = c_1/m_1$  - парциальная частота системы, соответствующая координате  $x_1$ ;  $k_2^2 = c_2/(m_1 + m_2)$  - парциальная частота системы, которая соответствует координате  $x_2$ ;  $m_1$  и  $m_2$  - массы инерционной массы и рамки;  $d = m_1/(m_1 + m_2)$  - безразмерный коэффициент инерционной асимметрии чувствительного элемента;  $q_1, q_2$  - ускорения, соответствующие внешним обобщенным силам, которые действуют на чувствительный элемент в направлении координат  $x_1$  и  $x_2$ ;  $h_1$  и  $h_2$  - коэффициенты демпфирования инерционной массы и рамки.

Из анализа полученной системы дифференциальных уравнений (1) видно, что движения тел системы в направлении выбранных обобщенных координат при идеальном упругом подвесе связаны между собой только членами, зависящими от измеряемой переносной угловой скорости. Это означает, что в отсутствии внешних сил, действующих на инерционную массу в направлении обобщенной координаты  $x_1$  ( $q_1 = 0$ ), вынужденное движение инерционной массы будет пропорционально переносной угловой скорости.

Характерной особенностью рассматриваемых уравнений движения чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа является то,

что измеряемая переносная угловая скорость входит в них параметрически. Это приводит к тому что для произвольной угловой скорости мы получаем систему линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

### Движение чувствительного элемента на вращающемся основании

Рассмотрим поведение чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа с рамкой на вращающемся с постоянной угловой скоростью основании. Решение системы дифференциальных уравнений (1), соответствующее собственным колебаниям чувствительного элемента очевидно и не представляет интереса с точки зрения измерения переносной угловой скорости.

При гармоническом возбуждении колебаний рамки с круговой частотой  $\omega$  и нулевой фазой ускорение от силы, действующей на нее, может быть задано в виде

$$q_2(t) = \text{Re}\{q_2 e^{i\omega t}\}.$$

Амплитуды и фазы вынужденных колебаний инерционной массы и рамки в направлении выбранных обобщенных координат, найденные по методу комплексных амплитуд, для  $\vec{\Omega} = \{0, 0, \Omega\}$  будут определяются по формулам:

$$A_1 = \frac{2q_2\omega}{\sqrt{\Delta^2}} \Omega, \tag{2}$$

$$A_2 = \frac{q_2 \sqrt{(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2)^2 + 4h_1^2\omega^2}}{\sqrt{\Delta^2}},$$

$$\Delta^2 = \left[ (k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) - 4\omega^2(h_1h_2 + d\Omega^2) \right]^2 + 4\omega^2 \left[ h_1(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) + h_2(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \right]^2,$$

$$\text{tg}(\varphi_1) = - \frac{2\omega \left[ h_1(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) + h_2(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \right]}{(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) - 4(h_1h_2 + d\Omega^2)\omega^2}, \tag{3}$$

$$\text{tg}(\varphi_2) = \frac{b_1 + b_2}{b_3 - b_4},$$

$$b_1 = 2\omega(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \left[ h_1(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) + h_2(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \right],$$

$$b_2 = 2\omega h_1 \left[ (k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) - 4\omega^2(h_1h_2 + d\Omega^2) \right],$$

$$b_3 = (k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \left[ (k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) - 4\omega^2(h_1h_2 + d\Omega^2) \right],$$

$$b_4 = 4h_1\omega^2 \left[ h_1(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) + h_2(k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \right].$$

Полученные выражения позволяют анализировать зависимость амплитуды и фазы колебаний инерционной массы и рамки от измеряемой переносной угловой скорости. График зависимости амплитуды колебаний инерционной массы от угловой скорости при частоте возбуждения, равной меньшей из парциальных частот системы, представлен на рис. 3. Из анализа графика на рис. 3 следует, что необходимый диапазон линейности измерения переносной угловой скорости обеспечивается только для малых значений угловой скорости - численно на порядок меньших значения нижней

парциальной частоты. Следует отметить, что на практике ширины линейного участка достаточно для обеспечения необходимого диапазона измерения.

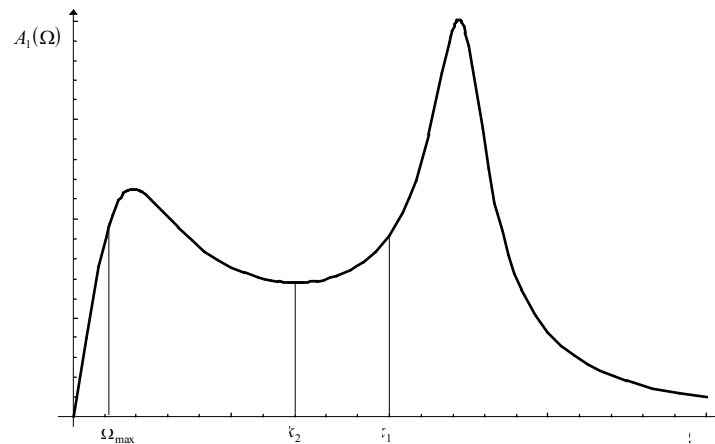


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний инерционной массы от переносной угловой скорости

Для повышения чувствительности инерционной массы к угловой скорости возбуждение колебаний рамки следует производить на частоте, равной одной из собственных частот чувствительного элемента.

Из анализа полученных выражений (2) и (3) следует, что собственные частоты чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа зависят от измеряемой переносной угловой скорости. Такая зависимость приводит к изменению собственных частот системы и, следовательно, к смещению пиков амплитудно-частотной характеристики при изменении величины переносной угловой скорости. Собственные частоты чувствительного элемента определяются выражениями

$$\omega_{j0}^2 = \frac{1}{2} \left[ k_1^2 + k_2^2 + 2(2d-1)\Omega^2 \right] - \frac{(-1)^j}{2} \sqrt{\left[ k_1^2 + k_2^2 + 2(2d-1)\Omega^2 \right]^2 - 4(k_1^2 - \Omega^2)(k_2^2 - \Omega^2)}, \quad (4)$$

$$j = 1, 2; \quad \omega_{10} > \omega_{20}.$$

Качественный график зависимости собственных частот от измеряемой угловой скорости ( $\Omega \ll k_1, k_2$ ) представлен на рис.4.

Из анализа этого графика следует, что эта зависимость близка к квадратичной. Такой вывод подтверждается анализом зависимости для первой производной от собственной частоты по угловой скорости, которая достаточно близка к линейной.

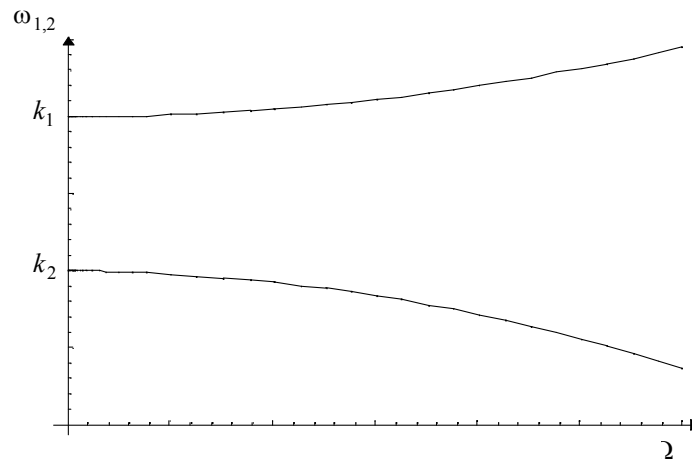


Рис. 4. Зависимость собственных частот от переносной угловой скорости

Зависимость собственных частот чувствительного элемента гироскопа от измеряемой угловой скорости может быть описана формулой

$$\omega_j(\Omega) = k_j + q_j \frac{\Omega^2}{2}, \quad j = 1, 2, \quad (5)$$

$$q_j = \left( \frac{s_3}{2} + \frac{(-1)^j}{2} \frac{2s_2 - s_1 s_3}{\sqrt{s_1^2 - 4s_0}} \right) / \sqrt{2s_1 - (-1)^j 2\sqrt{s_1^2 - 4s_0}},$$

$$s_0 = (k_1^2 - 1)(k_2^2 - 1),$$

$$s_1 = k_1^2 + k_2^2 + 2(2d - 1),$$

$$s_2 = 2(2 - k_2^2 - k_1^2),$$

$$s_3 = 4(2d - 1).$$

Представление собственных частот в виде (5) позволяет более просто реализовать систему поддержания резонансного режима работы прибора. С другой стороны, из анализа зависимости (5) следует, что для малых угловых скоростей этим смещением собственных частот можно пренебрегать.

#### Диапазон линейности измерения угловой скорости

Одной из основных характеристик гироскопа является коэффициент передачи по измеряемой переносной угловой скорости, который должен быть константой. Примем в качестве идеальной характеристики датчика касательную к реальной, изображенной на рис. 3, в точке  $\Omega = 0$ . Выражение для желаемой амплитуды колебаний инерционной массы  $A_1^*$  имеет вид

$$A_1^* = K_1^* \Omega,$$

где  $K_1^*$  - не зависящий от угловой скорости  $\Omega$  коэффициент, который определяется формулой:

$$K_1^* = \left. \frac{dA_1}{d\Omega} \right|_{\Omega=0} = \frac{2\omega}{\sqrt{\left[4h_1^2\omega^2 + (k_1^2 - \omega^2)^2\right] \left[4h_2^2\omega^2 + (k_2^2 - \omega^2)^2\right]}}. \quad (6)$$

Здесь  $A_1$  определяется соотношением (2).

Реальный коэффициент передачи отличается от идеального на величину  $\Delta K_1$

$$\Delta K_1 = K_1 - K_1^*,$$

Здесь  $K_1$  - реальный коэффициент передачи, определяемый из соотношений (2).

Для решения задач проектирования чувствительного элемента для гироскопа с заданным диапазоном измерения и точностью необходимо иметь выражение для зависимости парциальной частоты от ширины диапазона линейности измерения угловой скорости при заданной точности. Такая необходимость диктуется потребностью в максимальном увеличении добротности колебательной системы, что влечет за собой необходимость снижения величин собственных частот. В то же время, уменьшение величин собственных частот приводит к снижению диапазона линейности измерения угловой скорости.

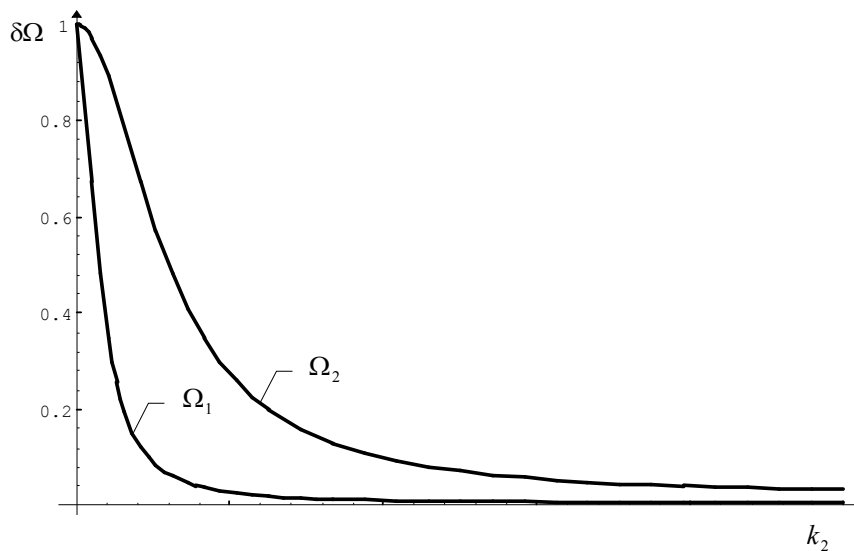


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от меньшей из парциальных частот

Относительная погрешность определения переносной угловой скорости будет определяться по формуле

$$\delta\Omega = \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = \frac{\Delta K_1}{K_1^*}.$$

Примем упругий подвес чувствительного элемента равножестким ( $k_1^2 = k_2^2/d$ ) и равные относительные коэффициенты демпфирования для рамки и инерционной массы. В этом случае, если принять частоту возбуждения равной меньшей из парциальных частот, то график зависимости относительной погрешности  $\delta\Omega$  от парциальной частоты  $k_2$  для разных максимальных угловых скоростей будет иметь вид, приведенный на рис. 5. На этом графике  $\Omega_2 = 2\Omega_1$ , а  $d = 0,5$ .

Если задаться уровнем относительной погрешности  $\delta\Omega_{\max}$  и желаемым значением максимально измеряемой угловой скорости  $\Omega_{\max}$ , то решая уравнение

$$\delta K_1(\Omega_{\max}, k_1, k_2, \omega) = \delta \Omega_{\max} \quad (7)$$

относительно одной из переменных, можно получить минимальное необходимое значение таковой.

Например, для относительной погрешности  $\delta \Omega = 0,0001$  и  $\Omega_{\max} = 10$  рад/с минимальное необходимое значение нижней парциальной частоты составляет 1392,4 рад/с.

Анализ численных решений уравнения (7) позволяет отметить, что при возбуждении системы на нижней парциальной частоте уровень погрешности от неустойчивости углового коэффициента не является значительным. Выбор рабочей частоты с точки зрения виброзащитности (рабочая частота должна быть больше максимальной частоты виброшумов) автоматически приведет к обеспечению приемлемой относительной погрешности в измеренной угловой скорости.

### Смещение парциальных частот

Собственные частоты чувствительного элемента являются функциями переносной угловой скорости. Это приводит к нестационарному изменению собственных частот, которое вызывает появление мультипликативной погрешности в измерении угловой скорости. Кроме этого, причиной изменения собственных частот могут быть как изменения температуры, так и другие факторы. Исследуем погрешность, вызванную изменением собственных частот чувствительного элемента, которое в основном связано с изменениями парциальных частот. Представим парциальные частоты чувствительного элемента в виде

$$k_1 = k_{10} + \Delta k_1,$$

$$k_2 = k_{20} + \Delta k_2,$$

где  $k_{10}$  и  $k_{20}$  - невозмущенные значения парциальных частот;  $\Delta k_1$  и  $\Delta k_2$  - некоторые малые добавки, а амплитуду выходных колебаний  $A_1$  по координате  $x_1$  представим в виде

$$A_1 \approx A_{10} + \Delta A_1,$$

где  $A_{10}$  - амплитуда колебаний инерционной массы при отсутствии смещения парциальных частот, а абсолютная погрешность  $\Delta A_1$  определяется по формуле

$$\Delta A_1 = -\frac{A_{10} \delta(\Delta k_1, \Delta k_2)}{2\Delta_0^2} \quad (8)$$

где

$$\Delta_0^2 = \left[ s_1 s_2 - 4\omega^2 (h_1 h_2 + d\Omega^2) \right]^2 + 4\omega^2 [h_1 s_2 + h_2 s_1]^2,$$

$$s_j = k_{j0}^2 - \Omega^2 - \omega^2, \quad j = 1, 2.$$

$$\begin{aligned} \delta(\Delta k_1, \Delta k_2) = & 4k_{10} \left[ s_2 \left[ s_1 s_2 - 4\omega^2 (h_1 h_2 + d\Omega^2) \right] + 4h_2 \omega^2 (s_1 h_2 + s_2 h_1) \right] \Delta k_1 + \\ & + 4k_{20} \left[ s_1 \left[ s_1 s_2 - 4\omega^2 (h_1 h_2 + d\Omega^2) \right] + 4h_1 \omega^2 (s_1 h_2 + s_2 h_1) \right] \Delta k_2. \end{aligned}$$

Из формулы (8) получается следующее выражение для относительной погрешности:

$$\delta A_1 = \frac{\Delta A_1}{A_{10}} = -\frac{\delta(\Delta k_1, \Delta k_2)}{2\Delta_0^2}.$$



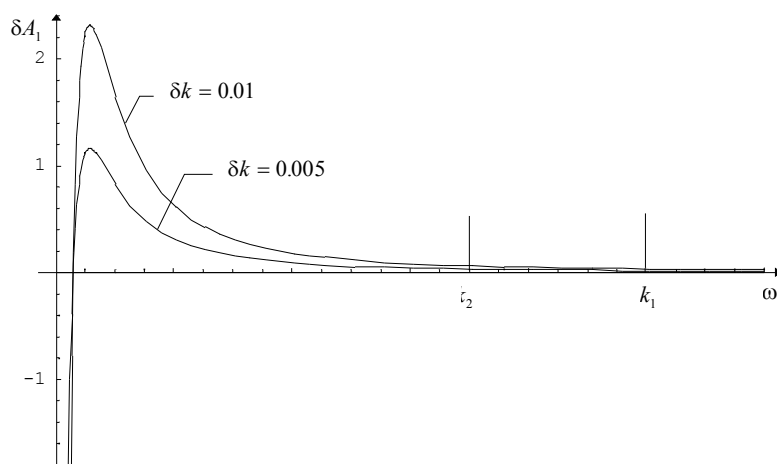


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности  $\delta A$  от частоты возбуждения для различных значений относительного смещения парциальных частот

При равных относительных смещениях по обеим парциальным частотам

$$\delta k = \frac{\Delta k_1}{k_{10}} = \frac{\Delta k_2}{k_{20}}$$

график зависимости величины относительной погрешности  $\delta A_1$  от частоты возбуждения  $\omega$  для различных значений  $\delta k$  представлен на рис. 6. Величина относительной погрешности  $\delta A_1$ , вызванной смещением парциальных частот, слабо зависит от переносной угловой скорости, которая находится в диапазоне устойчивых колебаний чувствительного элемента ( $\Omega \ll k_i$ ). Кроме этого, анализ графика на рис. 6 показывает, что с увеличением частоты возбуждения уровень относительной погрешности асимптотически стремится к нулю. Это позволяет для любого наперед заданного допустимого уровня погрешности  $\delta A_1$  и вероятного уровня относительного смещения парциальных частот определить минимально допустимое значение частоты возбуждения. Если учесть, что рекомендуется выбирать  $\omega = k_2$ , то, таким образом, можно определить минимально допустимые значения меньшей парциальной частоты  $k_2$ . Например, если положить относительное изменение парциальных частот равным  $\delta k = 0,01$ , а допустимый уровень относительной погрешности  $\delta A_1 = 0,01$ , то минимально необходимое значение нижней парциальной частоты составляет 4227,7 рад/с.

Выполненные численные расчеты показывают, что смещение парциальных частот от различных факторов необходимо учитывать при проектировании прибора, и, следовательно, проводить соответствующий выбор таковых.

#### **Влияние поступательных ускорений и вибраций на динамику чувствительного элемента**

Исследуем движение чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа с промежуточной рамкой на основании, которое совершает угловое движение с постоянной скоростью  $\vec{\Omega} = \{0, 0, \Omega\}$  и поступательное с постоянным ускорением  $\vec{w} = \{w_1, w_2, 0\}$ . Уравнения движения чувствительного элемента в этом случае имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2h_1\dot{x}_1 + (k_1^2 - \Omega^2)x_1 - 2\Omega\dot{x}_2 = -w_1, \\ \ddot{x}_2 + 2h_2\dot{x}_2 + (k_2^2 - \Omega^2)x_2 + 2d\Omega\dot{x}_1 = q_2 - w_2. \end{cases} \quad (9)$$

Решения системы (9) для смещений инерционной массы и рамки от постоянного ускорения имеют вид

$$x_{j0} = -\frac{w_j}{k_j^2 - \Omega^2}, \quad j = 1, 2, \quad (10)$$

или для малых угловых скоростей ( $\Omega \ll k_{1,2}$ )

$$x_{j0} = -\frac{w_j}{k_j^2}.$$

Постоянная составляющая (10) в выходных колебаниях инерционной массы может быть устранена фильтрацией сигнала с датчика перемещений на рабочей частоте.

В случае поступательной вибрации основания в уравнениях (9)

$$w_1 = w_{10} \cos(\lambda t),$$

$$w_2 = w_{20} \cos(\lambda t).$$

Выражения для амплитуд колебаний чувствительного элемента, обусловленных поступательной вибрацией, будут:

$$A_{\lambda 1} = \left[ \frac{w_{10}^2 (k_2^2 - \Omega^2 - \lambda^2)^2 + 4\lambda^2 (h_2 w_{10} + \Omega w_{20})^2}{\Delta^2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$A_{\lambda 2} = \left[ \frac{w_{20}^2 (k_1^2 - \Omega^2 - \lambda^2)^2 + 4\lambda^2 (h_1 w_{20} + d\Omega w_{10})^2}{\Delta^2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\Delta^2 = \left[ (k_1^2 - \Omega^2 - \lambda^2)(k_2^2 - \Omega^2 - \lambda^2) - 4\lambda^2 (h_1 h_2 + d\Omega^2) \right]^2 +$$

$$+ 4\lambda^2 \left[ h_1 (k_2^2 - \Omega^2 - \lambda^2) + h_2 (k_1^2 - \Omega^2 - \lambda^2) \right]^2$$

Колебания чувствительного элемента, вызванные поступательной вибрацией, будут происходить на частоте вибрации основания. Если частота вибрации  $\omega$  основания не совпадает с рабочей частотой  $\lambda$  прибора, то при фильтрации выходного сигнала датчика на рабочей частоте колебания, вызванные вибрацией, будут отфильтрованы. Если частота вибрации основания совпадает с частотой возбуждения ( $\lambda = \omega$ ), то амплитуда выходных колебаний инерционной массы будет определяться выражением

$$A_1 = \frac{2\omega q_2 \Omega + \sqrt{w_{10}^2 (k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 (h_2 w_{10} + \Omega w_{20})^2}}{\sqrt{\Delta^2}},$$

$$\Delta^2 = \left[ (k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2)(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) - 4\omega^2 (h_1 h_2 + d\Omega^2) \right]^2 +$$

$$+ 4\omega^2 \left[ h_1 (k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2) + h_2 (k_1^2 - \Omega^2 - \omega^2) \right]^2$$

Отношение амплитуды колебаний  $A_{\lambda 1}$  к амплитуде полезных колебаний  $A_{01}$  обозначим

$$\delta A_1 = \frac{A_{\lambda 1}}{A_{01}} = \frac{\sqrt{w_{10}^2(k_2^2 - \Omega^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2(h_2 w_{10} + \Omega w_{20})^2}}{2\omega q_2 \Omega}.$$

График зависимости относительной погрешности  $\delta A_1$  от частоты возбуждения представлен на рис.7.

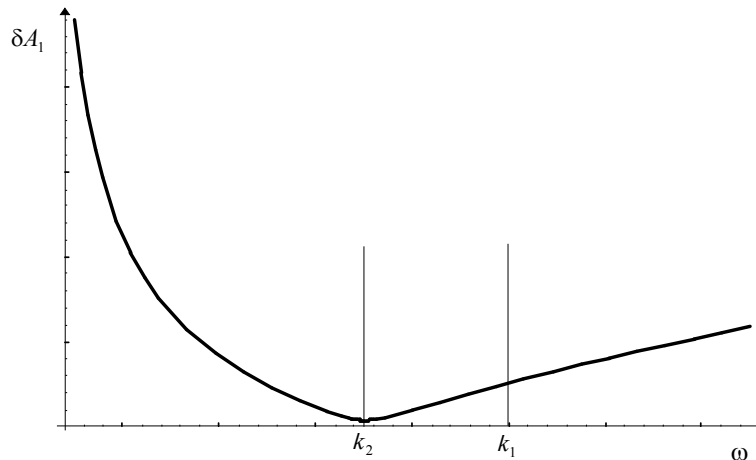


Рис. 7. Зависимость погрешности  $\delta A_1$  от частоты возбуждения

Из графика на рис.7 следует, что относительная погрешность имеет минимум на частоте

$$\omega_{\lambda 1} = \sqrt{k_2^2 - \Omega^2} \approx k_2.$$

Например, для гироскопа, в котором амплитуда вибраций численно равна амплитуде сил возбуждения ( $w_{10} = q_2$ ,  $w_{20} = 0$ ), а частота возбуждения равна меньшей из парциальных частот ( $\omega = k_2$ ) и  $\Omega = 1$  рад/с, то  $\delta A_1 \approx 35$ . Такое значение отношения "погрешность/полезный сигнал" достаточно велико, хотя и меньше приблизительно на порядок значения  $\delta A_1$  при возбуждении на частоте  $\omega = k_1$ .

Более эффективным методом исключения погрешности от поступательной вибрации могут стать алгоритмические методы компенсации с использованием дополнительной информации от других датчиков (гироскопов и акселерометров).

Одним из основных источников поступательной вибрации являются акустические шумы. Диапазоны акустических шумов в месте установки датчика могут быть предварительно изучены и учтены при выборе рабочей частоты и параметров выходного фильтра.

### Погрешность от угловой вибрации

Рассмотрим движение чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа с дополнительной рамкой на основании, которое совершает угловую вибрацию вокруг измерительной оси  $X_3$  с частотой  $\lambda$  и амплитудой  $\Omega_0$ . Движение чувствительного элемента будет определяться системой дифференциальных уравнений (2), где  $\Omega = \Omega_0 \cos(\lambda t) = \text{Re}\{\Omega_0 e^{i\lambda t}\}$ . Если амплитуда угловых вибраций много меньше нижней парциальной частоты ( $\Omega_0 \ll k_2$ ) и влиянием колебаний по

координате  $x_1$  на колебания чувствительного элемента по координате  $x_2$  пренебречь по сравнению с силами от системы возбуждения (что имеет место на практике), то система (1) примет вид

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2h_1\dot{x}_1 + k_1^2 x_1 = 2\Omega\dot{x}_2 + \dot{\Omega}x_2, \\ \ddot{x}_2 + 2h_2\dot{x}_2 + k_2^2 x_2 = q_2 \cos(\omega t). \end{cases}$$

Амплитуда колебаний чувствительного элемента по координате  $x_1$  будет иметь вид

$$A_{v1} = \frac{\Omega_0 q_2 (2\omega + \lambda)}{\sqrt{\left\{ \left[ k_1^2 - (\omega + \lambda)^2 \right]^2 + 4h_1(\omega + \lambda)^2 \right\} \left\{ \left( k_2^2 - \omega^2 \right)^2 + 4h_2\omega^2 \right\}}}.$$

Колебания инерционной массы по координате  $x_1$ , вызванные угловой вибрацией с частотой  $\lambda$ , будут происходить на частоте  $\nu = \omega + \lambda$  и иметь амплитуду  $A_{v1}$ .

Таким образом, угловая вибрация вокруг оси чувствительности не вносит существенных погрешностей в процесс измерения угловой скорости. Устранение влияния угловой вибрации является задачей фильтрации выходного сигнала.

### Выводы

Приведенный выше анализ динамики чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа с дополнительной рамкой на вращающемся основании показал следующее:

- собственные частоты чувствительного элемента зависят от измеряемой переносной угловой скорости, и эта зависимость близка к квадратичной;
- максимальный коэффициент передачи по измеряемой угловой скорости достигается при возбуждении колебаний чувствительного элемента на нижней из собственных частот;
- диапазон линейности измерения угловой скорости является ограниченным и пропорционален величине меньшей парциальной или собственной частоты;
- максимальное снижение чувствительности датчика к поступательной вибрации достигается при возбуждении его на меньшей из парциальных частот;
- устранение влияний медленно меняющегося поступательного ускорения и угловой вибрации на точность прибора достигается фильтрацией выходного сигнала на частоте возбуждения.

### Список литературы

1. Boxenhorn B. *Planar inertial sensor*. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge, Mass., U.S. Patent N 4598585. Çàÿâë. 19.03.84., ñóáë. 8.07.86.
2. M.S. Kranz, G.K. Fedder. *Micromechanical Vibratory Rate Gyroscopes Fabricated in Conventional CMOS*. Symposium Gyro Technology 1997, Stuttgart, Germany, September 16/17, 1997.
3. W. Geiger, B. Folkmer, H. Sandmaier, W. Lang. *Improved Rate Gyroscope Designs Designated for fabrication by Modern Deep Silicon Etching*. Symposium Gyro Technology 1997, Stuttgart, Germany, September 16/17, 1997.