

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

**А. В. Збруцкий, В. А. Апостолюк**

Основные проблемы современного навигационного приборостроения связаны с разработкой инерциальных датчиков, обладающих малыми массой и габаритами, низкими себестоимостью и энергопотреблением, и достаточно высокой надежностью. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяют микромеханические гироскопы, производство которых осуществляется с использованием технологий, развитых в последние десятилетия в твердотельной микроэлектронике. Современные микромеханические гироскопы значительно уступают по точности гироскопам других типов и относятся к приборам низкого класса точности, но они существенно превосходят гироскопы высокого и среднего классов точности по массо-габаритным характеристикам, показателям себестоимости и энергопотребления.

Область применения микромеханических гироскопов необычайно широка. Они позволяют создавать малогабаритные инерциальные навигационные системы, интегрированные со спутниковыми навигационными системами, обеспечивающими необходимую точность определения параметров ориентации и координат подвижных объектов: аэрокосмических летательных аппаратов, морских судов, наземных транспортных средств. Другими областями применения микромеханических датчиков угловой скорости могут быть робототехнические комплексы, системы виртуальной реальности.

В конструкциях современных чувствительных элементов одномассовых микромеханических гироскопов используется поступательное движение инерционных элементов [1,2]. Одними из наиболее важных являются задачи, связанные с особенностями динамики чувствительного элемента датчика. Основные вопросы динамики карданового микромеханического гироскопа [3] рассмотрены в статье [4]. В докладе рассматриваются наиболее важные аспекты динамики чувствительного элемента одномассового микромеханического гироскопа. Анализ динамики

чувствительного элемента на вращающемся основании проводится при помощи системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2h_1\dot{x}_1 + (k_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2)x_1 - 2\Omega_3\dot{x}_2 + (\Omega_1\Omega_2 - \dot{\Omega}_3)x_2 = 0, \\ \ddot{x}_2 + 2h_2\dot{x}_2 + (k_2^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2)x_2 + 2d\Omega_3\dot{x}_1 + d(\Omega_1\Omega_2 + \dot{\Omega}_3)x_1 = q_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_1^2 = c_1/m_1$  - парциальная частота системы, соответствующая измеряемой выходной координате  $x_1$ ;  $k_2^2 = c_2/(m_1 + m_2)$  - парциальная частота системы, которая соответствует возбуждаемой входной 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;  $q_2(t)$  - ускорение, соответствующее силе возбуждения, которая действует на чувствительный элемент в направлении координаты  $x_2$ ;  $h_1$  и  $h_2$  - коэффициенты демпфирования в направлении координат  $x_1$  и  $x_2$  соответственно;  $\vec{\Omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3\}$  - вектор измеряемой угловой скорости. Динамика чувствительного элемента без дополнительной рамки будет описываться системой уравнений (1) при  $d = 1$ .

Амплитуда колебаний инерционной массы по координате  $x_1$  в линейном приближении пропорциональна компоненте угловой скорости  $\Omega_3$ , которая перпендикулярна направлениям координат  $x_1$  и  $x_2$ . Отклонение функции преобразования датчика от линейной незначительны для значений  $\Omega_3$  из диапазона устойчивых колебаний чувствительного элемента ( $\Omega_3 \ll k_1, k_2$ ).

Собственные частоты колебаний чувствительного элемента являются функциями измеряемой угловой скорости. Зависимость собственных частот от угловой скорости для различных парциальных частот ( $k_1 \neq k_2$ ) хорошо аппроксимируется квадратичной функцией, а для равных ( $k_1 = k_2$ ) - линейной. При этом, с увеличением переносной угловой скорости меньшая из собственных частот уменьшается, а большая возрастает.

Другим источником погрешностей измерения угловой скорости может стать смещение парциальных частот под влиянием изменений температуры или других факторов. Чувствительность точности измерения угловой скорости к изменению парциальных частот может быть значительно понижена при увеличении рабочей частоты датчика. Например, если положить относительное изменение парциальных

частот одинаковым и равным 1%, частоту возбуждения принять равной меньшей из парциальных частот, а допустимый уровень относительной погрешности измерения угловой скорости равным 1%, то минимальное необходимое значение нижней парциальной частоты, рассчитанное для реального прибора, 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.

Поступательные ускорения, действующие на чувствительный элемент микромеханического вибрационного гироскопа приводят к постоянной составляющей по координате  $x_1$ , и устраняются фильтрацией выходного сигнала на рабочей частоте. Поступательная вибрация основания в плоскости координат  $x_1$  и  $x_2$  приводит к колебаниям чувствительного элемента на частоте этой вибрации. Если частота вибрации основания  $\lambda$  не совпадает с рабочей частотой прибора  $\omega$ , то при фильтрации выходного сигнала датчика на рабочей частоте колебания, вызванные вибрацией, будут отфильтрованы. При равных частоте вибрации основания и рабочей частоте ( $\lambda = \omega$ ) относительная погрешность измерения угловой скорости имеет минимум на частоте

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

Более эффективным способом исключения погрешности от поступательной вибрации может стать применение алгоритмических методов 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 должны быть предварительно изучены и учтены при выборе рабочей частоты и параметров выходного фильтра.

Колебания инерционной массы по координате  $x_1$ , вызванные угловой вибрацией основания вокруг измерительной оси с частотой  $\lambda$ , будут происходить на частоте  $\nu = \omega + \lambda$ . Устранение влияния угловой вибрации является задачей фильтрации выходного сигнала.

При использовании микромеханических гироскопов в комплексированных спутниковых навигационных системах возникает необходимость создания пространственного измерителя угловой скорости. Проведенное исследование перекрестной чувствительности одномассовых гироскопов позволило создать схему комбинирования информации с двух одинаковых датчиков для выделения информации об одной компоненте измеряемой угловой скорости. С другой стороны, выбор ориентации координатных осей  $x_1$  и  $x_2$  посредством ориентирования соответствующих сечений упругих элементов подвеса датчика позволяет использовать однотипные датчики, лежащие в одной плоскости, для измерения трех компонент вектора переносной угловой скорости.

Проведенное исследование позволяет надеяться, что дальнейшее развитие микроэлектронных технологий изготовления чувствительных элементов в сочетании с использованием методов устранения погрешностей, основанное на анализе динамики этих элементов, даст возможность в недалеком будущем значительно повысить точностные характеристики микромеханических гироскопов.

## **Литература**

1. M.S. Kranz, G.K. Fedder. *Micromechanical Vibratory Rate Gyroscopes Fabricated in Conventional CMOS*. Symposium Gyro Technology 1997, Stuttgart, Germany, September 16/17, 1997.
2. 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.
3. Boxenhorn B. *Planar inertial sensor*. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge, Mass., U.S. Patent N 4598585. Заявл. 19.03.84., опубл. 8.07.86.
4. Apostolyuk V. A., Zbrutsky A. V. *Investigation of micromechanical inertial devices*. 4-th St. Petersburg International conference on integrated navigation systems, May 1997, p. 330-336.