

М. В. САЛОГУБ, М. В. ФЕДОРОВ  
АО «ГИРООПТИКА»; СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

*В статье представлены результаты исследования математической модели микромеханического преобразователя угловой скорости. Основой математического описания работы чувствительного элемента является система дифференциальных уравнений и цифровая обработка сигналов, имитирующая работу микроэлектромеханического преобразователя угловой скорости. Проводится оценка времени установившегося режима первичных колебаний инерционной массы (скорости выхода на режим) и изменение амплитуды вторичных колебаний при различных величинах инерционных масс.*

*Приводится краткий вывод на основе возможной реализации математической модели показаний и погрешностей блока инерциальных микромеханических чувствительных элементов, состоящий из триады микроэлектромеханических преобразователей угловой скорости.*

**Введение.** В настоящее время растет потребность применения микроэлектромеханических преобразователей угловой скорости (МПУС) в различных задачах, например, в составе блока инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ). Возникает необходимость в создании функциональных алгоритмов, по которым на этапе разработки чувствительного элемента можно быстро производить оценку правильности работы МПУС на основе выходных параметров математической модели МПУС при заданных конструктивных и электрических параметрах МПУС [1–2]. Так же важно иметь возможность задавать показания и погрешности БИЧЭ в соответствии с реальными показаниями инерциальных блоков.

Целью статьи является моделирование алгоритма функционирования МПУС в пакете Matlab (Simulink), в состав которого входит чувствительный элемент микромеханического гироскопа (ММГ) LL-типа с заданными конструктивными и электрическими параметрами и алгоритм цифровой обработки сигналов. Анализ следующих выходных данных МПУС, а также встраивание алгоритма МПУС в состав математической модели алгоритма погрешностей БИЧЭ:

- время установившегося режима первичных колебаний (скорость выхода на режим) в зависимости от величины инерционной массы (ИМ);
- установившееся значение амплитуды вторичных колебаний в зависимости от величины ИМ;
- на основе полученных вариациях Аллана (ВА) произвести проверку адекватности полученных погрешностей МПУС в БИЧЭ в соответствии с реальными данными.

**Математическая модель.** Задана система уравнений, описывающая движение чувствительного элемента четырехмассового ММГ LL-типа по осям первичных и вторичных колебаний. Система дифференциальных уравнений, описывающая первичные колебания (1) представлена ниже [3–5]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + \mu_{y1} \dot{y}_1 + C_{y1} y_1 + C_{y1x3} (y_1 - x_3) + C_{y1x4} (y_1 + x_4) + m_1 \dot{V}_{oy} = Q_{y1} \\ m_2 \ddot{y}_2 + \mu_{y2} \dot{y}_2 + C_{y2} y_2 + C_{y2x3} (y_2 + x_3) + C_{y2x4} (y_2 - x_4) + m_2 \dot{V}_{oy} = Q_{y2} \\ m_3 \ddot{x}_3 + \mu_{x3} \dot{x}_3 + C_{x3} x_3 + C_{x3y1} (x_3 - y_1) + C_{x3y2} (x_3 + y_2) + m_3 \dot{V}_{ox} = Q_{x3} \\ m_4 \ddot{x}_4 + \mu_{x4} \dot{x}_4 + C_{x4} x_4 + C_{x4y1} (x_4 + y_1) + C_{x4y2} (x_4 - y_2) + m_4 \dot{V}_{ox} = Q_{x4} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mu_{yxi}$  – коэффициент сил вязкого трения;  $C_{xyi}$  – коэффициент жесткости;  $C_{xyik} (y_i \pm x_i)$  – коэффициент связи осей ММГ;  $Q_{xyi}$  – электростатическая сила (привод);  $m$  – величина ИМ;  $x_i, y_i$  – оси движения ИМ (первичные колебания),  $i = 1, 2, 3, 4$  – индексы (номера) ИМ [1–3].

Система дифференциальных уравнений вторичных колебаний (2) представлена ниже:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + \mu_{z1} \dot{z}_1 + C_{z1} z_1 = -2m_1 \dot{y}_1 \Omega_x + Q_{z1} \\ m_2 \ddot{z}_2 + \mu_{z2} \dot{z}_2 + C_{z2} z_2 = -2m_2 \dot{y}_2 \Omega_x + Q_{z2} \\ m_3 \ddot{z}_3 + \mu_{z3} \dot{z}_3 + C_{z3} z_3 = -2m_3 \dot{x}_3 \Omega_y + Q_{z3} \\ m_4 \ddot{z}_4 + \mu_{z4} \dot{z}_4 + C_{z4} z_4 = -2m_4 \dot{x}_4 \Omega_y + Q_{z4} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu_{zi}$  – коэффициент сил вязкого трения;  $C_{zi}$  – коэффициент жесткости;  $k_{zi}$  – коэффициент связи осей ММГ;  $2m_i \dot{y}_i \Omega_{xy}$  – сила Кориолиса;  $z_i$  – оси движения ИМ (вторичные колебания);  $Q_{zi}$  – электростатическая сила (съем) [1–3].

Исходные конструктивные и электрические параметры для проведения моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры математической модели

Обозначение	Название	Значение
$\Omega, \text{ }^\circ/\text{с}$	Входная угловая скорость, внешнее воздействие	300
$C_{x,y}, \text{ Н/м}$	Жесткость подвеса	10461
$C_z, \text{ Н/м}$	Жесткость подвеса	10063
$m, \text{ мкг}$	Инерционная масса	0.392; 0.25; 0.15; 0.09; 0.08; 0.07; 0.06
$U_0, \text{ В}$	Основное напряжение электростатического привода	24, 27
$U_{оп}, \text{ В}$	Опорное напряжение	1.6
$D_{ш}, \text{ Гц}^2$	Дисперсия шума	$3.6 \cdot 10^{-8}$
$d_{2, \text{ м}}$	Торцевые зазоры (первичные колебания)	$15 \cdot 10^{-6}$
$d_{3, \text{ м}}$	Боковые зазор (для вторичных колебаний)	$2 \cdot 10^{-6}$

Модель МПУС позволяет смоделировать и оценить амплитуду установившегося режима вторичных колебаний в зависимости от величины ИМ (рис. 1), с учетом данных табл. 1.

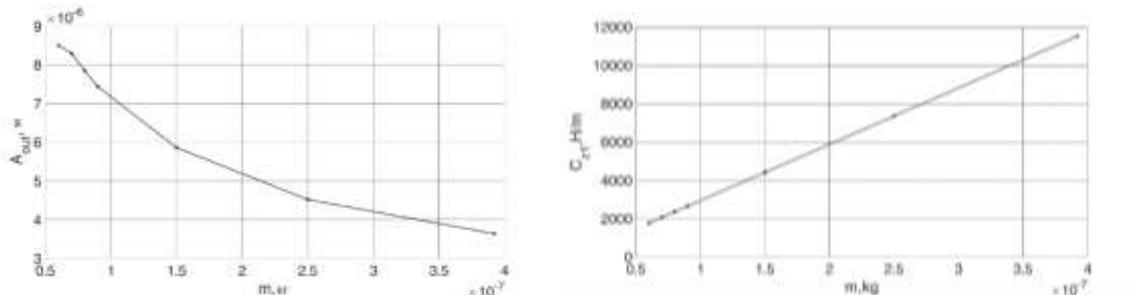


Рис. 1. Зависимость амплитуды вторичных колебаний от величин ИМ и зависимость жесткостей выходной измерительной оси от величин ИМ

Модель МПУС позволяет смоделировать и оценить время установившегося режима первичных колебаний (скорость выхода на режим) в зависимости от величины ИМ (рис. 2).

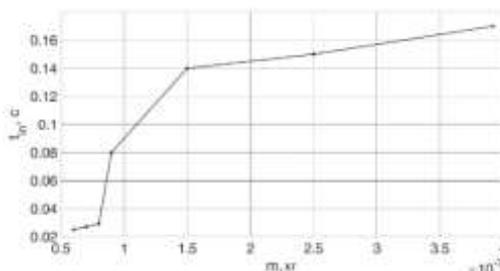


Рис. 2. Зависимость времени выхода на режим от величины ИМ

По результатам моделирования рис. 1 и 2 можно сделать выводы о сокращении времени установившихся колебаний при уменьшении величины ИМ, при этом с ростом величины ИМ массы наблюдается уменьшение амплитуды выходных колебаний ИМ. В модели МПУС реали-

зована система автоматической регулировки и управления (АРУ) амплитуды первичных колебаний по обратной связи, которая представляет собой звено, состоящее из аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, а также пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД регулятора). При правильной настройке система АРУ позволяет уменьшить время установившегося режима и получить оптимальные выходные данные (например, первичные и вторичные колебания ИМ) с требуемой точностью.

Адекватность полученных погрешностей продемонстрирована на рис. 3. Задание погрешностей производилось в сравнении с реальными данными (Теория), параметры ВА взяты исходя из технических характеристик датчиков, для проверки правильности полученных данных построены ВА по случайной составляющей (моделирование) и реальной ВА (Теория), данные отображены с логарифмическим шагом, рассчитанное отклонение характеристики по реальным данным от характеристики по смоделированным составило 21 % [6–7].

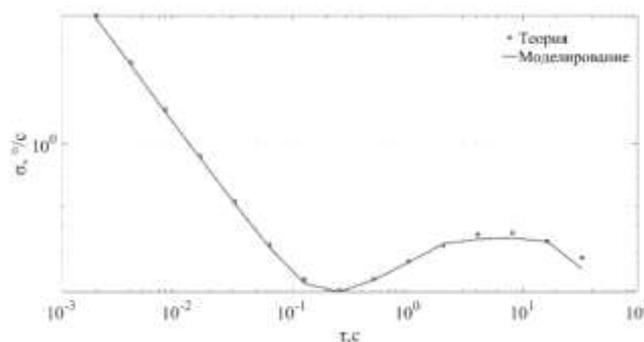


Рис. 3. Вариация Аллана, с логарифмическим шагом

Получение зависимости ВА (рис. 3), позволило определить оптимальность заданных погрешностей в выходных показаниях реальных датчиков и полученных погрешностей на выходе модели.

**Заключение.** В ходе работы проведено исследование математической модели микромеханического преобразователя угловой скорости, составлены системы дифференциальных уравнений для описания движения ИМ, синтезирован алгоритм цифровой обработки сигналов, автоматической регулировки и управления амплитудой. Оценено время установившегося режима первичных колебаний (скорость выхода на режим) в зависимости от величины инерционной массы, а также установившееся значение амплитуды вторичных колебаний в зависимости от величины инерционной массы.

По результатам математического моделирования получены зависимости установившихся значений амплитуд вторичных колебаний от величин инерционных масс и зависимость времени выхода на режим от величин инерционных масс. Анализ полученных зависимостей позволил определить возможность уменьшения времени установившегося режима первичных колебаний за счет уменьшения величины инерционной массы.

Результаты моделирования погрешностей ПМЛУ соответствуют реальным погрешностям показаний БИЧЭ, алгоритм БИЧЭ позволяет отлаживать показания и погрешности в соответствии с реальными данными, для уточнения математической модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. 215-315.
2. **Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В.** Прикладная теория гироскопов, Санкт-Петербург, 2015. 171-174.
3. **Боронахин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В.** Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: Изд-во «Элмор», 2007. 400 с.
4. **Пешехонов В.Г., Несеннюк Л.П., Грязин Д.Г. и др.** Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор». *Мехатроника, автоматизация и управление*. 2008. №2. С. 29-31.
5. **Пешехонов В.Г.** Гироскопы начала XXI века. *Гироскопия и навигация*. 2003. №4. С. 5-18.
6. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2 Введение в теорию фильтрации /О.А. Степанов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2012. 417 с.
7. IEEE Std. 952-1997. IEEE Standard Specifications Format Guide and Test procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, p. 52-71.

M.V.Salogub, M.V.Fyodorov (JSC GYROOPTICS, ETU "LETI", Saint Petersburg)

**Research of the parameters of the mathematical model of a microelectromechanical converter of angular velocity**

The article presents the results of the study of a mathematical model of a micromechanical angular velocity transducer. The basis of the mathematical description of the operation of the sensitive element is a system of differential equations and digital signal processing that simulates the operation of a microelectromechanical angular velocity transducer. The time of the steady-state mode of primary oscillations of the inertial mass (speed of reaching the mode) and the change in the amplitude of secondary oscillations at various values of inertial masses are estimated.

Авторы готовы представить текст на английском языке для сборника материалов мультиконференции, который будет подан для индексирования в Scopus.