

УДК 528.526.6

М. В. ЦЫГАНКОВ, К. С. АЛЕКСЕЕВА, М. В. САЛОГУБ, М. В. ФЕДОРОВ
АО «ГИРООПТИКА», Санкт-Петербург**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ НА
ОСНОВЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХОСЕВОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

В статье приведен результат численного моделирования работы преобразователя линейного ускорения, на основе выведенных аналитических уравнений движения инерционных масс, представлен алгоритм работы микросхемы для обработки полезного сигнала с емкостного датчика акселерометра, предложена конструкция чувствительного элемента трехосевого микромеханического акселерометра. Проведены расчеты с использованием методов конечно-элементного анализа. Получены и проверены на работоспособность опытные образцы.

Введение. Расширение области применения преобразователей линейного ускорения микромеханических (ПЛУ) в различных областях науки и техники предъявляет особые требования к конструкциям чувствительного элемента (ЧЭ). В числе таких требований улучшение выходных характеристик, уменьшение массогабаритных параметров и уменьшение стоимости за одну измерительную ось [1–2]. Достигнуть заявленных требований позволяет создание многоосных датчиков и систем на их основе. Целью работы является разработка модели ПЛУ, основанной на выводе дифференциальных уравнений движения инерционных масс (ИМ), разработки конструкции ЧЭ трехосевого микромеханического акселерометра (ММА) с диапазоном преобразования $\pm 30g$, численном методе моделирования работы ПЛУ для подтверждения результатов работы разработанной конструкции ЧЭ. Развязка трех инерционных масс (ИМ) с помощью системы упругих элементов и опорных рамок позволяет снизить влияние перекрестных связей и уменьшить вклад технологических операций, связанных с монтажом кристаллов, в итоговое значение углов неортогональности.

Математическая модель ПЛУ. Дифференциальные уравнения, описывающие движение трёх инерционных масс чувствительного элемента трехмассового ММА с одной степенью свободы. При решении уравнения Лагранжа 2 рода для каждой ИМ приняты допущения об отсутствии влияния угловой скорости на движение ИМ [1].

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z} + \mu_z \dot{z} + C_z z &= m_1 (a_z - g) \\ m_2 \ddot{y} + \mu_y \dot{y} + C_y y &= m_2 a_y \\ m_3 \ddot{x} + \mu_x \dot{x} + C_x x &= m_3 a_x \end{aligned} ,$$

где μ_x, μ_y, μ_z – коэффициент сил вязкого трения; C_x, C_y, C_z – коэффициент жесткости; a_x, a_y, a_z – проекция измеряемого ускорения; x, y, z – оси движения ИМ; $Q_i = m_j a_i$ – электростатическая сила (съем), где i – номера осей x, y, z , а j – номера масс 1,2,3, соответствующих осям z, y, x [1]. Полученная нелинейная физическая модель для удобства была представлена в пространстве состояний.

$$\dot{\tilde{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -C_z/m & -\mu_z/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (a_z - g),$$

На основе системы уравнений был синтезирован алгоритм (поведенческая модель) ПЛУ в программном пакете Matlab (Simulink) представленная на рис. 1 для проведения численного анализа работы ПЛУ.

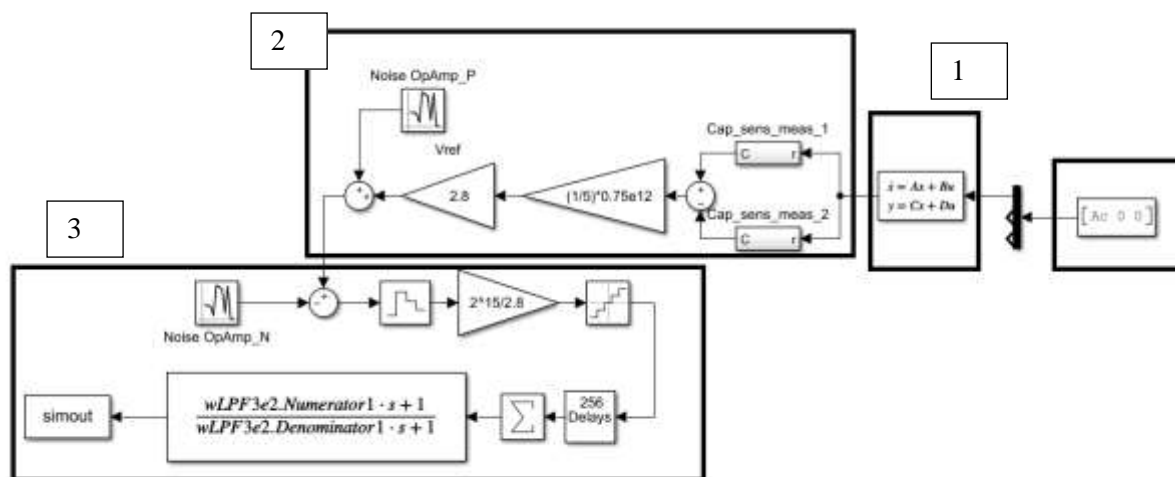


Рис. 1. Поведенческая модель ПЛУ (1 – блок дифференциальных уравнений в пространстве состояний, 2 – емкостные датчики перемещений ИМ, 3 – блок имитации цифрового выхода с ПЛИС)

По результатам численного анализа ПЛУ, были подтверждена правильность работы перемещений инерционной массы ЧЭ ММА, при различных внешних воздействиях линейных ускорений. Измерения, полученные с ёмкостных датчиков, соответствуют заявленным диапазонам.

Разработка конструкции. Конструкция ЧЭ ММА состоит из трех ИМ 1, 2 и 3. Внутренняя ИМ 1 с помощью четырех упругих элементов 5, обеспечивающих перемещение в направлении оси чувствительности Z, подвешена к внутренней опорной рамке 4. Средняя ИМ 2 подвешена к средней и внутренней рамкам на восьми упругих элементах 6, позволяющим средней ИМ совершать перемещения в направлении оси чувствительности Y. Внешняя ИМ 3 подвешена к средней и внешней опорным рамкам с помощью восьми упругих элементов 7 для обеспечения перемещений в направлении оси чувствительности X.

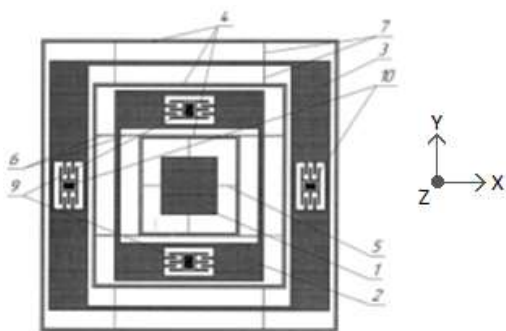


Рис. 2. Конструкция ЧЭ

Каждая из опорных рамок имеет жесткое крепление со стеклянными подложками. Съем выходных сигналов обеспечивается емкостными преобразователями перемещений. Для осей X и Y в целях уменьшения габаритных размеров емкостные преобразователи перемещений выполнены по обращенной схеме, т.е. расположены подвижными зубьями вовнутрь, также каждый из них содержит по симметричному преобразователю перемещений для обеспечения дифференциального съема выходного сигнала. Для обеспечения ударопрочности в конструкцию ЧЭ введены ограничители перемещений, представляющие из себя участки конструкции с уменьшенными зазорами. По периметру внешней опорной рамки находится ответная часть ЧЭ, в которой содержатся контактные площадки [3].

На этапе моделирования выполнялись расчеты собственных частот, емкостей, напряженно-деформированного состояния при воздействии амплитудного ускорения $\pm 30g$, напряженно-деформированного состояния при охлаждении от $+400\text{ }^\circ\text{C}$ до $-60\text{ }^\circ\text{C}$; влияния механического удара амплитудой 20000 g и длительностью 3 ms , влияния синусоидальной вибрации, влияния технологических погрешностей. На рис. 3а, 3б и 3в показаны три моды собственных колебаний по осям X, Y и Z соответственно.

На этапе моделирования выполнялись расчеты собственных частот, емкостей, напряженно-деформированного состояния при воздействии амплитудного ускорения $\pm 30g$, напряженно-деформированного состояния при охлаждении от $+400\text{ }^\circ\text{C}$ до $-60\text{ }^\circ\text{C}$; влияния механического удара амплитудой 20000 g и длительностью 3 ms , влияния синусоидальной вибрации, влияния технологических погрешностей. На рис. 3а, 3б и 3в показаны три моды собственных колебаний по осям X, Y и Z соответственно.

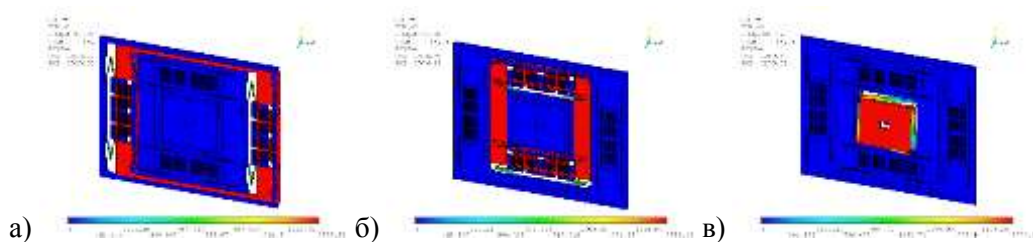


Рис. 3. Моды собственных колебаний

Результатом этапа моделирования стала конструкция ЧЭ трехосевого ММА, для изготовления опытных образцов которой был сформирован необходимый комплект фотошаблонов.

Исследование опытного образца. Фотографии опытного образца и элементов его конструкции показаны на рис. 4.

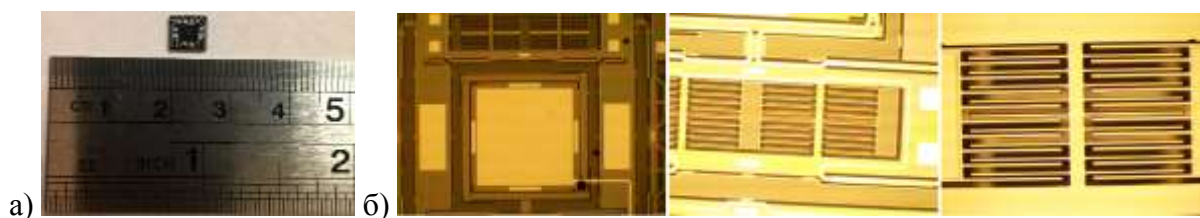


Рис. 4. Фотографии опытного образца: а) общий вид; б) элементы конструкции ЧЭ

Для проверки работоспособности и влияния ускорения свободного падения опытный образец был установлен на двухосный поворотный стенд. На рис. 5а показан выходной сигнал с трех акселерометрических каналов ММА, на рис. 5б алгоритм поворота стенда.

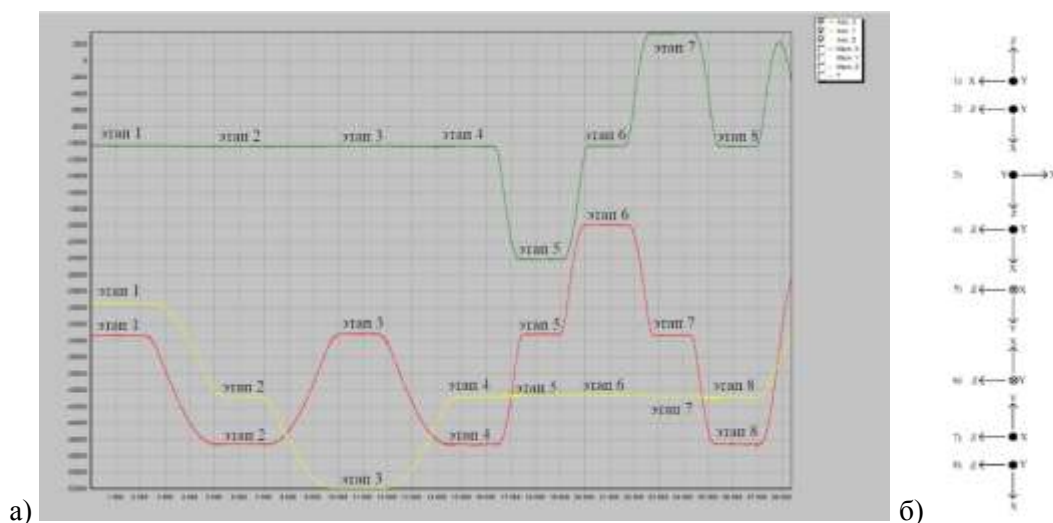


Рис. 5. Результаты оценки работоспособности: а) выходной сигнал с акселерометрических каналов (красный – канал X, зеленый – канал Y, желтый – канал Z), б) алгоритм поворота стенда

Из рис. 5 видно, что ЧЭ реагирует на изменение положения в пространстве в соответствии с алгоритмом поворота стенда. Из этого можно сделать вывод о работоспособности разработанной конструкции.

Диапазона преобразования опытного образца проверялся с помощью стенда управления движением. Проверка проходила в 11 этапов с шагом нагружения 3g. На рис. 6 показан выходной сигнал с трех акселерометрических каналов.

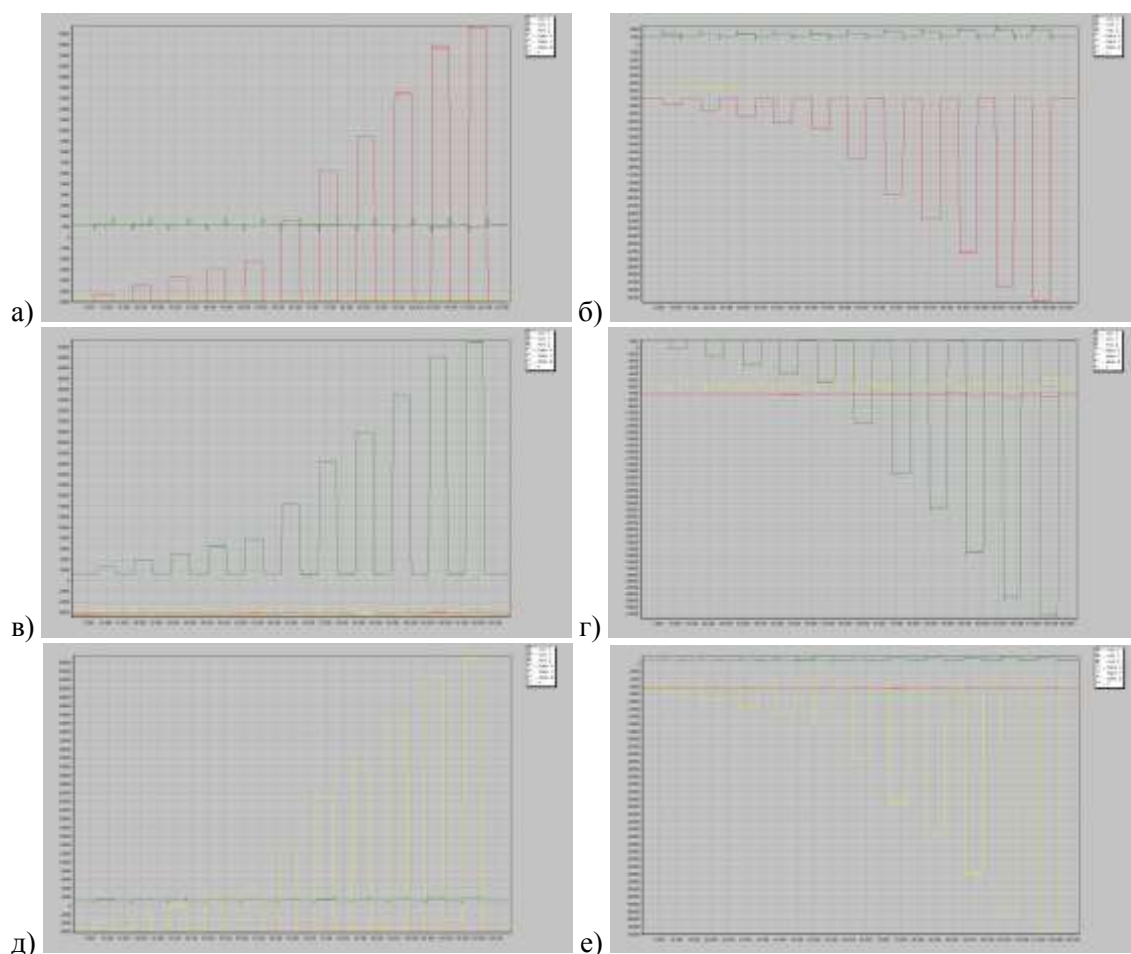


Рис. 6. Результаты оценки диапазона преобразования: а) направление +X, б) направление -X, в) направление +Y, г) направление -Y, д) направление +Z, е) направление -Z (красный – канал X, зеленый – канал Y, желтый – канал Z)

Предложенная конструкция выдерживает воздействие линейного ускорения $\pm 33g$ и соответствует заявленным требованиям.

Заключение. В результате работы разработана конструкция ЧЭ трехосевого ММА. Правильность примененных конструкторских решений подтверждена методами конечно-элементного анализа. В ходе работы получены опытные образцы, проверена их работоспособность и оценены характеристики.

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. Полез. мод. Российская Федерация RU204 922U1, Чувствительный элемент трехосевого микромеханического акселерометра; Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (RU), Акционерное общество "ГИРООПТИКА" (RU), № 2019107872; заявл. 19.03.19; опубл. 17.06.21, Бюл. № 17.

M.V.Tsygankov, K.S.Alekseeva, M.V.Salogub, M.V.Fedorov (JSC GYROOPTICS, St. Petersburg)
Development of the model of a linear micromechanical accelerometer based on the design of the sensitive element of a three-axis micromechanical accelerometer

The article presents the result of numerical simulation of the operation of the linear acceleration converter, based on the derived analytical equations for the movement of inertial masses, the algorithm of the microcircuit for processing the useful signal from the capacitive sensor of the accelerometer is

proposed the design of the sensitive element of a three-axis micromechanical accelerometer. Calculations were carried out using finite element analysis methods. Prototypes received and tested for performance.

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