

Для цитирования: Аман Е. Э. Разработка конструктивно-кинематической модели микромеханических акселерометров // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 10. С. 17–20. DOI 10.21778/2218-5453-2019-10-17-20 УДК 65.012.23

Е. Э. Аман¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В статье рассматривается проблема повышения качества и конкурентоспособности микроэлектромеханических структур (МЭМС) на основе конструктивно-кинематической модели, построенной на новых физических принципах и законах. Актуальность проблемы отражена в постановлении Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». В рамках импортозамещения отечественные МЭМС-датчики нуждаются в широкой номенклатуре разных по принципам построения чувствительных элементов с возможностью применения российской элементной базы и частичном отказе от традиционных решений. Примером является работающий в режиме автоколебаний «обращенный» датчик силы, обеспечивший упрощение технологических решений и высокие силовые характеристики. Рассмотрена разработка конструктивно-кинематической модели инерциального датчика первичной информации с компенсирующим преобразователем магнитоэлектрического или электромагнитного типа.

Ключевые слова: инерциальный датчик, МЭМС, режим автоколебаний

Введение

В то время как в производстве точных измерительных приборов и датчиков достигнуты значительные результаты, дальнейшее улучшение их характеристик известными методами с использованием опробованных проектных решений, материалов и технологий ограничено. Поэтому одной из актуальных задач является разработка конструктивно-кинематической модели микромеханического акселерометра с новым «обращенным» датчиком силы, работающим в режиме автоколебаний.

Разработка и описание конструктивно-кинематической модели автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы

Конструктивно-кинематическая модель автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы (АММА ОДС) представлена на рис. 1.

Подвижной инерционной массой является кремниевая пластина с прямоугольными оптическими щелями в упругом подвесе. Вследствие прохождения излучения светодиодов через первую оптическую щель на выходах фототранзисторов появляется сигнал, который направляется на компаратор,

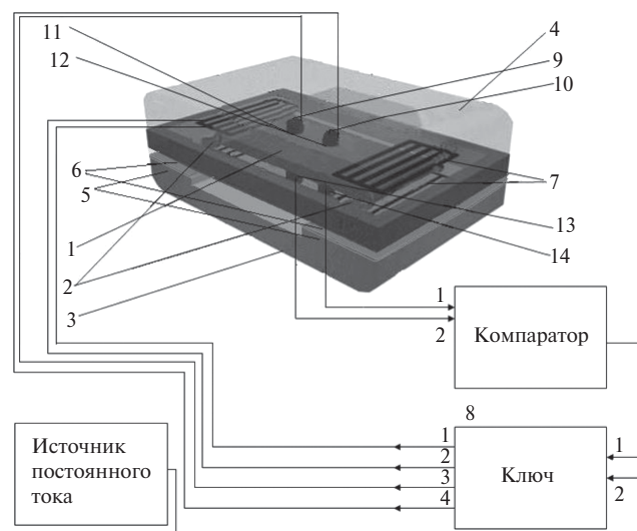


Рисунок 1. Конструктивно-кинематическая схема автоколебательного микромеханического акселерометра с «обращенным» датчиком силы: 1 – постоянный магнит; 2 – упругие подвесы; 3 – основание; 4 – крышка; 5 – выступы магнитопровода; 6 – полюсные наконечники; 7 – токопроводящие дорожки (плоские катушки); 8 – ключ; 9 – первый светодиод; 10 – второй светодиод; 11 – первая оптическая щель; 12 – вторая оптическая щель; 13 – первый фотоприемник; 14 – второй фотоприемник

а затем на ключ, подключающий источник постоянного тока к токопроводящим дорожкам. При подаче тока на токопроводящие дорожки, имеющие длину l , создаваемое ими магнитное поле будет взаимодействовать с магнитным полем постоянного магнита с индукцией B . В результате возникает сила Ампера F_A .

Под действием F_A инерционная масса (ИМ) перемещается по продольной оси, при этом один из фотоприемников становится открытым, а другой – закрытым для светодиода. В результате сигнал с компаратора поступает на ключ, что приводит к переключению им направления тока в токопроводящих дорожках. Далее процесс переключения повторяется, и ИМ совершает автоколебания по продольной оси [1, 2].

Сигнал фотоприемников, амплитуда которого несет полезную информацию об измеряемом ускорении, отправляется на компаратор, что приводит к изменению момента срабатывания ключа и смещению центра автоколебаний инерционной массы вдоль оси возбуждения. Таким образом, введение в контур прибора нелинейного звена приводит к формированию в цепи обратной связи

биполярного электрического сигнала, под действием которого ПУ совершает гармоническое движение с широтно-импульсной модуляцией сигнала на выходе ключа. Этот сигнал несет информацию об измеряемом ускорении [3, 4].

«Обращенный» тип датчика силы представляет собой магнитоэлектрический датчик [5], конструкция которого позволяет увеличить величину тока, проходящего через токопроводящие дорожки (катушки). Тем самым компенсируются потери силы Ампера, возникающие из-за снижения магнитной индукции как результата уменьшения магнитной массы постоянного магнита. Индукцию, создаваемую намагниченной по длине пластиной постоянного магнита, можно найти по уже известным параметрам, указанным в табл. 1 [6].

При расчете магнитной индукции можно не учитывать проводимость утечек с боковых поверхностей и ребер полюсов ввиду малой величины зазора и диамагнитной природы кремния. Однако необходимо учитывать «действительную» длину магнита, приняв его центральную часть ($1/3l$) нейтральной [7].

Таким образом, проводимость зазора определяется соотношением

$$G_{\delta} = \mu_0 \mu S / \Delta, \quad (1)$$

а отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля выбранного магнита определяется как

$$B/H = G_{\delta} l / S = \mu_0 \mu l / \Delta.$$

При использовании магнитного покрытия из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ $B/H = 1,5708 \cdot 10^{-6}$ Тл/(А/м).

Индукция в зазоре может быть определена как точка пересечения кривой размагничивания и прямой, определяемой соотношением (1).

Значение индукции в точке пересечения составляет $B = 0,024$ Тл. Более детальный анализ распределения индукции магнитного поля в зазоре был проведен с помощью имитационного моделирования в программной среде ELCUT. Результаты вычислений представлены на рис. 2.

На рис. 3 показан фрагмент распределения магнитного поля под полюсным наконечником ОДС.

Результаты имитационного моделирования показали, что значение индукции в зазоре будет равно 0,02 Тл, что совпадает с аналитическим расчетом [7].

Сила Ампера, возникающая при взаимодействии проводников с током с магнитным полем постоянного магнита, рассчитывается по формуле

$$F_A = 0,75 B n I_{\text{пл}}, \quad (2)$$

Таблица 1. Параметры датчика силы

Параметр	Величина параметра
Длина пластины магнита l , м	$5 \cdot 10^{-3}$
Площадь поверхности магнита S , м ²	$25 \cdot 10^{-6}$
Величина зазора между полюсным наконечником и ИМ Δ , м	$\leq 20 \cdot 10^{-6}$

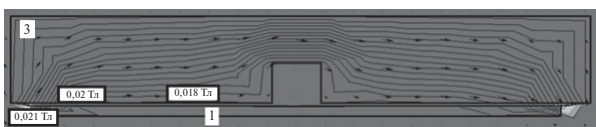


Рисунок 2. Распределение магнитного поля в «обращенном» датчике силы

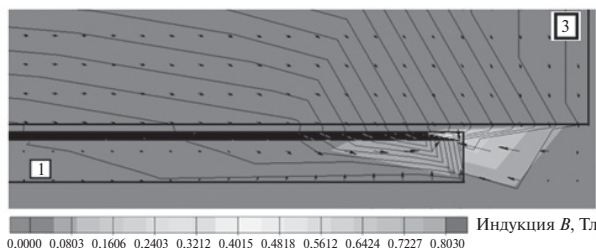


Рисунок 3. Фрагмент распределения магнитного поля под полюсным наконечником в «обращенном» датчике силы

Таблица 2. Элементная база (готовое решение)

Элемент		Материал (торговая марка или форма)
Инерционная масса	Магнитный слой	Постоянный магнит, самарий-кобальт (СМ180/1000)
	Подложка	Кремний
Токопроводящие дорожки		Медь (медный порошок)
Магнитопровод		Сталь (47НК)
Изолятор		Эпоксидная смола
Упругий подвес		Кремний (переменного сечения)
Датчик положения	Излучатель	АЛ102Б (светодиод)
	Фотоприемник (фототранзистор или фотодиод)	КТФ-109А (фототранзистор) Специальные ФД

где B – индукция постоянного магнита, n – количество токопроводящих дорожек, l – их длина, $I_{пл}$ – величина тока плавления, $0,75$ – коэффициент, ограничивающий величину тока. Используя (2), получим, что $F_A = 3,7$ мН.

Максимальное значение силы $3,7$ мН реализуется при числе токопроводящих дорожек $n = 78$.

С помощью конструктивно-кинематической модели был проведен анализ отечественной элементной базы, результаты которого представлены в табл. 2.

Выводы

Описанная конструктивно-кинематическая модель позволяет реализовать автоколебательные режимы, гибко менять элементную базу, упростить технологические решения по изготовлению датчика, отказаться от вакуумирования и герметизации внутреннего объема датчика. Новый «обращенный» тип датчика силы позволил во много раз увеличить силовые характеристики, что положительно сказалось на показателях результативности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тузов А. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-технологии. Часть 1. Инерциальные датчики средней точности // Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. № 1. С. 72–78.
2. Тыртычный А. А., Скалон А. И. Выбор подвеса чувствительных элементов инерциальных микромеханических датчиков для систем управления малых космических аппаратов // Труды МФТИ. 2014. Т. 6. № 2. С. 92–98.
3. Тыртычный А. А. Принципы построения микромеханических инерциальных датчиков на электромагнитных и оптоэлектронных элементах и сравнительный анализ их компенсирующих преобразователей // Научные труды Международной молодежной научной конференции XXXIV. Гагаринские чтения в 8 томах. 2008. Т. 3. С. 82.
4. Тыртычный А. А., Скалон А. А. Анализ характеристик компенсирующих преобразователей микромеханических инерциальных датчиков // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 21–23.
5. Тыртычный А. А. Разработка микромеханических автоколебательных инерциальных датчиков // Конкурс научно-технических работ и проектов молодых ученых и специалистов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»: аннотации работ. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. С. 51–52.
6. Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г. Микромеханические преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике // Мехатроника, автоматизации, управление. 2009. № 3. С. 28–32.
7. Теоретический базис и конструктивно-кинематические схемы микромеханических инерциальных автоколебательных датчиков / Е. Э. Аман, С. Р. Карпиков, И. Н. Лукьяненко, А. И. Скалон, А. А. Тыртычный // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 3–9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аман Елена Эдуардовна, ассистент кафедры Высшей математики и механики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), Российская Федерация, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (911) 102-93-77, e-mail: Anhelena7@gmail.com.

E. E. Aman

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE-KINEMATIC MODEL OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS

The article discusses the problem of improving the quality and competitiveness of MEMS based on the structural kinematic model built on new physical principles and laws. The relevancy is conditioned by Decree of the Government of the Russian Federation No.328 dated 15 April 2014 «On Approval of the State Program of the Russian Federation «Development of Industry and Improvement of its Competitive Ability». Russian MEMS-sensors, being part of import substitution, need a wide nomenclature of sensitive elements differing by construction principles, with an option of using the domestic element base and a partial refusal from conventional decisions. An example of the said solutions is a «converted» power sensor operating in the self-oscillations mode, which has simplified engineering manufacture solutions and guaranteed high power characteristics. The paper discusses algorithm for development of constructive-kinematic model of primary inertial sensor with magneto-electric or electro-magnetic compensatory converter.

Keywords: inertial sensor, MEMS, self-oscillation mode

REFERENCES

1. Tuzov A. Sensors for measuring motion parameters based on MEMS technology. Part 1. Inertial sensors of medium accuracy. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2011, no. 1, pp. 72–78. (In Russian).
2. Tyrtychnyi A. A., Skalon A. I. The choice of suspension of sensitive elements of inertial micromechanical sensors for control systems of small spacecraft. *Trudy MFTI*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 92–98. (In Russian).
3. Tyrtychnyi A. A. The principles of construction of micromechanical inertial sensors on electromagnetic and optoelectronic elements and a comparative analysis of their compensating converters. (Conference proceedings) XXXIV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya, vol. 3, 2008, p. 82. (In Russian).
4. Tyrtychnyi A. A., Skalon A. A. Analysis of the characteristics of compensating transducers of micromechanical inertial sensors. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 2, pp. 21–23. (In Russian).
5. Tyrtychnyi A. A. Development of micromechanical self-oscillating inertial sensors. In: *Konkurs nauchno-tekhnicheskikh rabot i projektov molodykh uchenykh i spetsialistov «Molodezh i budushchee aviatsii i kosmonavtiki»: annotatsii rabot*. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, pp. 51–52. (In Russian).
6. Peshekhonov V. G., Nesenyuk L. P., Gryazin D. G. Micromechanical converters. Current state and use in military equipment. *Mekhatronika, avtomatizatsii, upravlenie*, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russian).
7. Aman E. E., Karpikov S. R., Lukyanenko I. N., Skalon A. I., Tyrtychnyi A. A. Theoretical basis and structural-kinematic schemes of micromechanical inertial self-oscillating sensors. *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 7 (205), pp. 3–9. (In Russian).

AUTHOR

Aman Elena, assistant of the Department of Advanced Mathematics and Mechanics, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (911) 102-93-77, e-mail: Anhelena7@gmail.com.