



Получено: 4.07.2024 г. | Принято: 11.07.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.282.290>

Научная статья

СОЗДАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.А.Жукова¹, к.т.н., зам. нач. центра по науч. раб., ORCID: 0009-0004-1566-8182 / szh17@yandex.ru

Д.Ю.Обижаев¹, к.т.н., нач. упр., ORCID: 0009-0001-4437-558X

С.А.Ульянов¹, нач. НИЦ нанотехнологий, ORCID: 0009-0002-7308-6063

М.А.Зиновьев¹, нач. лаб., ORCID: 0009-0000-3322-317X

Д.Д.Рискин¹, вед. инж., ORCID: 0009-0006-6164-1284

С.Ю.Суздальцев¹, к.т.н., нач. отд. – зам. нач. упр., ORCID: 0009-0001-0224-619X

Е.Н.Фролов¹, к.т.н., нач. лаб., ORCID: 0009-0002-1802-373X

Ю.А.Ганцева¹, нач. лаб. – зам. нач. отд., ORCID: 0009-0006-9899-4972

Аннотация. В ФГУП "ЦНИИХМ" создана линейка микромеханических датчиков линейных ускорений. В состав линейки входят датчики трех исполнений ММА-2, ММА-10 и ММА-30 с диапазонами преобразования ± 20 м/с², ± 100 м/с² и ± 300 м/с² соответственно. Датчики предназначены для использования в составе систем ориентации, стабилизации и навигации в составе различных изделий. Проведен полный комплекс испытаний, подтверждающий заявленные технические характеристики и стойкость к внешним воздействиям, а также утверждена рабочая конструкторская документация для организации серийного производства. Возможный объем производства датчиков составляет несколько тысяч штук в год.

Ключевые слова: МЭМС, акселерометр, емкостной датчик, сборка датчиков, калибровка датчиков, испытания датчиков

Для цитирования: С.А. Жукова, Д.Ю. Обижаев, С.А. Ульянов, М.А. Зиновьев, Д.Д. Рискин, С.Ю. Суздальцев, Е.Н. Фролов, Ю.А. Ганцева. Создание микромеханических датчиков линейных ускорений и организация их серийного производства. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 5. С. 282-290. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.282.290>.

Received: 31.05.2024 | Accepted: 7.06.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.282.290>

Original paper

DEVELOPMENT OF MICROMECHANICAL LINEAR ACCELERATION SENSORS AND THEIR SERIAL INDUSTRIAL ENGINEERING

S.A.Zhukova¹, Cand.of Sci. (Tech), Deputy Director, ORCID: 0009-0004-1566-8182 / szh17@yandex.ru / mail@cniihm.ru

D.Yu.Obizhaev¹, Cand.of Sci. (Tech), Head of Department, ORCID: 0009-0001-4437-558X

S.A.Ulyanov¹, Head of SRC of Nanotechnology, ORCID: 0009-0002-7308-6063

M.A.Zinoviev¹, Head of Laboratory, ORCID: 0009-0000-3322-317X

D.D.Riskin¹, Leading Engineer, ORCID: 0009-0006-6164-1284

S.Yu.Suzdaltsev¹, Cand.of Sci. (Tech), Head of Department, ORCID: 0009-0001-0224-619X

Y.N.Frolov¹, Cand.of Sci. (Tech), Head of Laboratory, ORCID: 0009-0002-1802-373X

Yu.A.Gantseva¹, Head of Laboratory, ORCID: 0009-0006-9899-4972

¹ ГНЦ РФ ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики", Москва, Россия / SRC RF FSUE "Central Research Institute of Chemistry and Mechanics", Moscow, Russia



Abstract. In SRC RF FSUE "Central Research Institute of Chemistry and Mechanics" has been developed a line of micromechanical linear acceleration sensors. The line includes sensors of three versions MMA-2, MMA-10 and MMA-30 with conversion ranges of $\pm 20 \text{ m/s}^2$, $\pm 100 \text{ m/s}^2$ and $\pm 300 \text{ m/s}^2$ respectively. The sensors are intended for use as part of orientation, stabilisation and navigation systems in various products. The full range of tests confirming the declared technical characteristics and resistance to external influences has been carried out, and the operating design documentation for serial industrial engineering has been approved. The planned production value of these sensors is several thousand pieces per year.

Keywords: MEMS, accelerometer, capacitive sensor, sensor packaging, sensor calibration, sensor test

For citation: S.A. Zhukova, D.Yu. Obizhaev, S.A. Ulyanov, M.A. Zinoviev, D.D. Riskin, S.Yu. Suzdaltsev, Y.N. Frolov, Yu.A. Gantseva. Development of micromechanical linear acceleration sensors and their serial industrial engineering. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 5. PP. 282–290. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.5.282.290>.

ВВЕДЕНИЕ

Микромеханические датчики линейных ускорений находят широкое применение в составе бесплатформенных навигационных систем (БИНС). Они способны обеспечить высокую чувствительность, временную и температурную стабильность параметров в сочетании с высокой стойкостью и прочностью к внешним воздействиям, малыми габаритами и низким энергопотреблением. Одним из наиболее эффективных вариантов исполнения является микромеханический акселерометр, в качестве чувствительного элемента которого использован полностью кремниевый миниатюрный преобразователь емкостного типа с маятниковым подвесом. Такая конструкция используется разработчиками акселерометров с девяностых годов прошлого столетия и позволяет обеспечить низкий температурный и временной дрейф, высокую стойкость и прочность к внешним воздействиям. Примеры конструкций и способов их изготовления описаны в [1–5].

В Российской Федерации, несмотря на существенный интерес со стороны организаций-разработчиков инерциальных приборов и изделий на их основе, серийное производство микромеханических датчиков линейных ускорений отсутствует. При этом поставка прецизионных датчиков не осуществляется в виду экспортных ограничений.

Таким образом, создание линейки прецизионных миниатюрных микромеханических датчиков линейных ускорений и организация их серийного производства является безусловно актуальной задачей. Кроме того, одной из важнейших задач при проведении разработки было исключение использования в создаваемой конструкции материалов и покупных комплектующих изделий (далее – ПКИ) зарубежного производства.

INTRODUCTION

Micromechanical linear acceleration sensors are widely used in platform-free navigation systems (PFNS). They can provide high sensitivity, time and temperature stability of parameters in combination with high resistance and robustness to external influences, small size and low power consumption. One of the most efficient designs is the micromechanical accelerometer, which uses an all-silicon miniature capacitive-type transducer with a pendulum suspension as a sensing element. This design has been used by accelerometer developers since the nineties of the last century and allows to provide low temperature and time drift, high resistance and durability to external influences. Examples of designs and methods of their manufacture are described in [1–5].

In the Russian Federation, in spite of considerable interest on the part of organisations-developers of inertial devices and products based on them, there is no serial production of micromechanical linear acceleration sensors. At the same time, precision sensors are not supplied due to export restrictions.

Thus, development of a line of precision miniature micromechanical linear acceleration sensors and organizing of their serial production is an urgent task. In addition, one of the most important tasks during developing was to exclude the use of foreign-made materials and purchased component parts (hereinafter – PCP) in the created design.

FEATURES AND KEY ELEMENTS OF SENSOR DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY

Each sensor includes electronic subsystem of "capacitance-voltage" conversion, micromechanical pendulum sensing element (SE), mounted in hermetically sealed gas-filled metal-ceramic housing with information outputs.

Measurement of acceleration is provided as a result of formation of the output analogue signal proportional to the change in electrical capacitance of the SE due to the action of the inertia force along the sensing axis.



ОСОБЕННОСТИ И КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАТЧИКОВ

Каждый датчик включает электронную подсистему преобразования "емкость – напряжение" и микромеханический маятниковый чувствительный элемент (ЧЭ), смонтированные в герметичный газонаполненный металлокерамический корпус с информационными выводами.

Измерение ускорения обеспечивается в результате формирования выходного аналогового сигнала, пропорционального изменению электрической емкости ЧЭ, обусловленной действием силы инерции вдоль оси чувствительности.

Датчики всех трех исполнений имеют единый принцип функционирования, разработаны с применением единого комплекта ПКИ и отличаются только характеристиками ЧЭ.

ЧЭ изготавливается из низкоомных кремниевых пластин диаметром 100 мм и представляет собой микромеханическую структуру, выполненную на основе трех герметично соединенных кремниевых элементов – центрального подвижного электрода и крайних неподвижных электродов. В центральной пластине методом жидкостного анизотропного травления выполнена инерционная масса, соединенная с герметизирующей рамкой при помощи упругого подвеса [6]. Верхняя и нижняя пластины соединены с центральным электродом методом прямого сращивания (без использования адгезива) через слой диоксида кремния. На поверхности верхнего и нижнего электродов сформировано по четыре диэлектрических ограничителя перемещения инерционной массы на основе диоксида кремния. Они обеспечивают электрическую изоляцию инерционной массы от поверхности электродов при ее большом отклонении от положения равновесия. На негерметизируемой части структуры каждого электрода сформированы алюминиевые контакты. На последнем этапе изготовления пластины разделяют на кристаллы методом дисковой резки. На рис.1 представлены фотографии пластины, содержащей ЧЭ, перед разделением на кристаллы и ЧЭ, подготовленный для сборки датчика.

На следующем этапе проводится сборка датчиков. При этом, в связи с необходимостью обеспечения низкого температурного дрейфа в широком диапазоне температур ($-60 \div +85^\circ\text{C}$), технологический процесс сборки имеет решающее значение. Разработанная технология монтажа обеспечивает минимальный уровень деформаций ЧЭ во всем рабочем диапазоне температур,

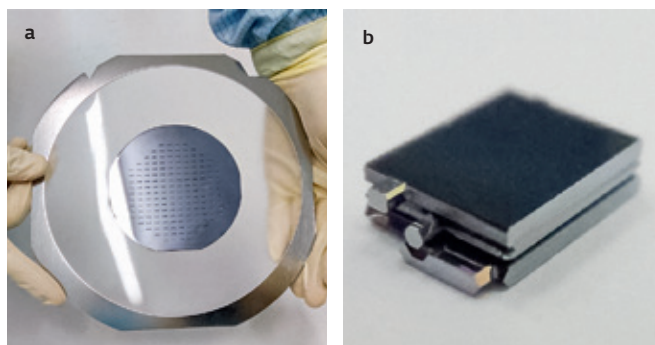


Рис.1. а – фотографии пластины, содержащей ЧЭ перед разделением на кристаллы; б – ЧЭ, подготовленный для сборки датчика

Fig.1. a – images of the wafer containing the SE before separation into crystals; b – SE prepared for sensor assembly

Sensors of all three versions have the same principle of operation, are designed using a single set of PCI and differ only in the characteristics of the SE.

The SE is made of low-resistance silicon wafers with a diameter of 100 mm and represents a micromechanical structure based on three hermetically connected silicon elements – the central movable electrode and the outermost fixed electrodes. An inertial mass is made in the central plate by liquid anisotropic etching, connected to the sealing frame by means of an elastic suspension [6]. The upper and lower plates are connected to the central electrode by direct splicing (without adhesive) through a silicon dioxide layer. On the surface of the upper and lower electrodes, four dielectric silicon dioxide-based inertial mass movement limiters are formed each. They provide electrical isolation of the inertial mass from the electrode surface in case of its large deviation from the equilibrium position. Aluminium contacts are formed on the non-sealed part of the each electrode structure. At the last stage of fabrication, the wafers are separated into crystals by disc cutting. Fig.1 shows images of the wafer containing the SE before separation into crystals and the SE prepared for sensor assembly.

At the next stage the sensors are assembled. In this case, due to the need to ensure low temperature drift in a wide temperature range ($-60 \div +85^\circ\text{C}$), the technological process of assembly is of crucial importance. The developed assembly technology provides a minimum level of deformations of the SE in the whole operating temperature range caused by deformation of the ceramic base of the housing. This is achieved by using a specialised elastic adhesive, methods of its application and SE installation. Fig.2 shows a microphotograph of the sensors at the assembly stage.

When sealing these sensors, special attention is paid to ensuring a minimum level of moisture in their

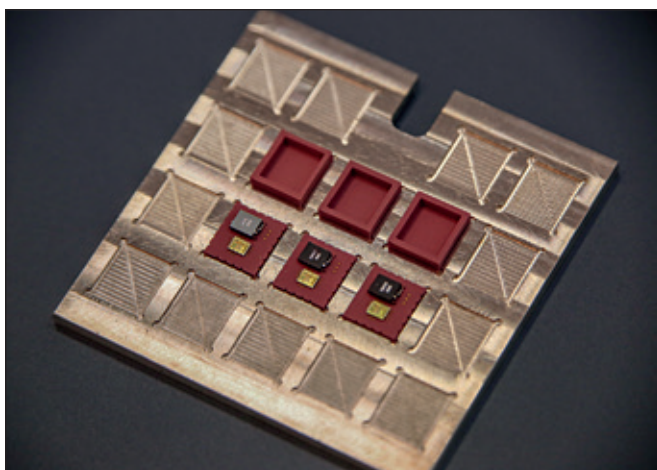


Рис.2. Микрофотографии датчиков линейных ускорений ММА-2 перед монтажом керамической крышки

Fig.2. Microphotographs of MMA-2 linear acceleration sensors before mounting the ceramic cover

обусловленных деформацией керамического основания корпуса. Это достигается за счет применения специализированного эластичного адгезива, методов его нанесения и установки ЧЭ. На рис.2 представлена микрофотография датчиков на этапе сборки.

При герметизации датчиков особое внимание уделяется обеспечению минимального уровня влаги в их подкорпусном объеме. Процесс проводится в атмосфере азота с содержанием влаги, не превышающем 1 ppm, с применением специализированного оборудования, в котором также реализована возможность длительной дегазации элементов корпусов при повышенной температуре перед их герметизацией. На рис.3 представлена фотография оборудования для проведения процессов герметизации датчиков.

После завершения процесса герметизации все датчики проходят тестирование на наличие течей и передаются для проведения процесса калибровки.

КАЛИБРОВКА И ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКОВ

Процесс калибровки выполняется при помощи программно-аппаратного комплекса, выполненного на базе лабораторной центрифуги и реализующего автоматизированный алгоритм подбора конфигурационных параметров электронной подсистемы, обеспечивающих минимальный уровень нелинейности выходного сигнала датчика. На рис.4 представлены фотографии фрагмента аппаратно-программного комплекса и комплекта измерительной оснастки.



Рис.3. Оборудование для проведения процессов герметизации датчиков

Fig.3. Equipment for sensor sealing processes

underbody volume. The process is carried out in nitrogen atmosphere with moisture content not exceeding 1 ppm, using specialised equipment, which also provides possibility of long-term degassing of housing elements at elevated temperature before their sealing. Fig.3 shows a photo of the equipment for sensor sealing processes.

Once the sealing process is complete, all sensors are tested for leaks and submitted for the calibration process.

SENSOR CALIBRATION AND TESTING

The calibration process is performed using a hardware-software complex based on a laboratory centrifuge, which implements an automated algorithm for selecting the configuration parameters of the electronic subsystem that ensure the minimum level of nonlinearity of the sensor output signal. Fig.4 shows photos of a fragment of the hardware-software complex and a set of measuring equipment.

It should be noted that the product is also equipped with a built-in temperature sensor, the readings of which are transmitted as an analogue signal and can be used for thermal compensation. The characteristics of the built-in temperature sensor are not standardised by the manufacturer.

After calibration, these sensors are subjected to a set of acceptance tests. Each sensor undergoes control of fourteen parameters that fully characterise suitability of the product operation. The values of the parameters confirmed during the tests for each sensor version are presented in Table No. 1 [7, 8]. Fig.5 shows photos of sensors in preparation for the control of zero offset variation in the operating temperature range.

During developing of durability and resistance of manufactured sensors to external influences (mechanical and

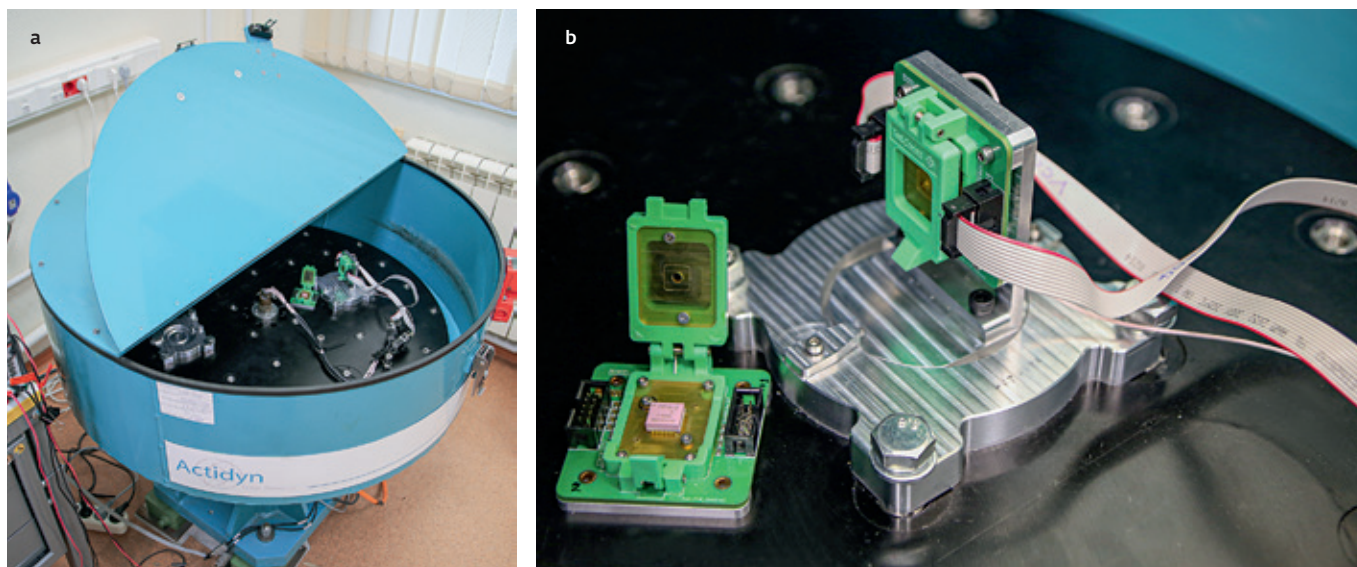


Рис.4. Фотографии фрагмента программно-аппаратного комплекса для калибровки датчиков (а) и измерительной оснастки (b)

Fig.4. Images of a fragment of the hardware-software system for sensor calibration (a) and measuring tooling (b)

Следует отметить, что изделие также оснащено встроенным датчиком температуры, показания которого передаются в виде аналогового сигнала и могут использоваться для термокомпенсации. При этом характеристики встроенного датчика температуры не нормируются производителем.

После проведения калибровки датчики подвергаются комплексу приемо-сдаточных испытаний. Каждый датчик проходит контроль четырнадцати параметров, полностью характеризующих пригодность эксплуатации изделия. Значения параметров, подтверждаемых при проведении испытаний для каждого исполнения датчиков, представлены в табл.1 [7, 8]. На рис.5 представлены фотографии датчиков при подготовке к проведению контроля изменения смещения нуля в рабочем диапазоне температур.

При проведении разработки была подтверждена прочность и стойкость создаваемых датчиков к внешним воздействиям (механическим и климатическим). Полученные значения представлены в табл.2 и 3.

После проведения приемо-сдаточных испытаний датчики маркируются, упаковываются и пломбируются. Упаковка состоит из групповой потребительской тары в виде ложементов матричного типа, изготовленной из антистатического пластика, и транспортной тары в виде коробки из гофрированного картона. На рис.5 представлены фотографии датчиков MMA-2 после маркировки и в процессе упаковывания.

climatic) were confirmed. The obtained values are presented in Tables 2 and 3.

After acceptance, tested sensors are labelled, packed and sealed. Packaging consists of group consumer packaging in the form of a matrix-type spoon made of anti-static plastic and transport packaging in the form of a box made of corrugated cardboard. Fig.5 shows photos of MMA-2 sensors after labelling and during packing.

The sensors are manufactured under the QC. Within the framework of the development, the working design documentation was approved for organisation of serial production of sensors. The technological and testing base available in SRC RF FSUE "Central Research Institute of Chemistry and Mechanics" provides possibility of serial production of linear acceleration sensors with the production volume of several thousand pieces per year.

POSSIBLE DIRECTIONS FOR IMPROVING SENSOR PERFORMANCE

The analysis of the data obtained during development showed that further improvement of the sensor characteristics (output noise, parameter instability) is limited by the characteristics of the applied electronic subsystem. At the same time, as a result of mathematical modelling it has been established that in case of using the SE in the compensatory mode it is possible to reduce these parameters by one decimal order. Thus, implementation of an electronic subsystem providing a compensatory mode of operation of the SE is a priority direction for improving the characteristics of micromechanical linear acceleration sensors. In turn, the improvement of the SE can be aimed at increasing its resistance to shock impact



Таблица 1. Основные технические характеристики датчиков

Table 1. Main technical characteristics of the sensors

Параметр Parameter	Исполнение Design		
	MMA-2	MMA-10	MMA-30
Диапазон чувствительности, м/с^2 Sensitivity range, m/s^2	± 20	± 100	± 300
Нестабильность нуля в запуске (σ), не более, м/с^2 Zero instability in start-up (σ), not more, m/s^2	0,008	0,040	0,120
Нестабильность нуля от запуска к запуску (σ), не более, м/с^2 Zero instability from start to start (σ), not more, m/s^2	0,009	0,045	0,135
Шум выходного сигнала, не более, $\text{м}/(\text{с}^2\text{Гц}^{1/2})$ Output signal noise, not more, $\text{m}/(\text{s}^2\text{Hz}^{1/2})$	0,0015	0,0060	0,0180
Масштабный коэффициент, не менее, $\text{мВ}/(\text{м/с}^2)$ Scale factor, not less, $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$	50	10	3
Изменение смещения нуля в рабочем диапазоне температур, не более, м/с^2 Variation of zero offset in the operating temperature range, not more, m/s^2	$\pm 0,6$	$\pm 3,0$	$\pm 9,0$
Смещение нуля, не более, м/с^2 Zero offset, not more than, m/s^2	$\pm 0,6$	$\pm 3,0$	$\pm 9,0$
Нелинейность передаточной характеристики, % Nonlinearity of transfer characteristic, %	Не более 1,5 No more		
Изменение масштабного коэффициента в рабочем диапазоне температур, % Change of scaling factor in the operating temperature range, %	Не более 2,5 No more		
Нестабильность масштабного коэффициента от запуска к запуску, % (σ) Instability of scaling factor from run to run, % (σ)	Не более 0,3 No more		
Частотный диапазон преобразования по уровню минус 3 дБ, Гц Frequency range of conversion at minus 3 dB level, Hz	0–100		
Ток потребления, мА (при напряжении питания 3,3 В $\pm 1\%$) Consumption current, mA (at supply voltage 3,3 V $\pm 1\%$)	Не более 0,9 $\pm 10\%$ No more		
Габаритные размеры (Д \times Ш \times В), мм \times мм \times мм Overall dimensions (L \times W \times H), mm \times mm \times mm	10,5 \times 9,3 \times 3,5		

Изготовление датчиков выполняется под контролем ОТК. В рамках выполнения разработки утверждена рабочая конструкторская документация для организации серийного производства датчиков. Имеющаяся во ФГУП "ЦНИИХМ" технологическая и испытательная база обеспечивает возможность серийного изготовления датчиков линейных ускорений с объемом производства на уровне нескольких тысяч штук в год.

by optimising the parameters of dielectric inertial mass displacement limiters.

CONCLUSIONS

SRC RF FSUE "Central Research Institute of Chemistry and Mechanics" has created a line of micromechanical linear acceleration sensors with conversion ranges of $\pm 20 \text{ m/s}^2$, $\pm 100 \text{ m/s}^2$ and $\pm 300 \text{ m/s}^2$ with the acceptance of the QC. The sensors are made on the basis of



Таблица 2. Механические воздействующие факторы

Table 2. Mechanical affecting factors

Воздействующий фактор Affecting factor	Характеристика воздействующего фактора Characteristics of the affecting factor	Значение воздействующего фактора Affecting factor value
Синусоидальная вибрация Sinusoidal vibration	Амплитуда ускорения, м/с^2 Acceleration amplitude, m/s^2	200
	Диапазон частот, Гц Frequency range, Hz	1–2000
Широкополосная случайная вибрация Broadband random vibration	Среднеквадратическое значение ускорения, м/с^2 RMS value of acceleration, m/s^2	200
	Диапазон частот, Гц Frequency range, Hz	20–2000
Механический удар одиночного действия Single-acting mechanical impact	Пиковое ударное ускорение, м/с^2 Peak impact acceleration, m/s^2	5000
	Длительность действия ударного ускорения, мс Impact acceleration duration, ms	0,1–2
Механические удары многократного действия Multiple mechanical impacts	Пиковое ударное ускорение, м/с^2 Peak impact acceleration, m/s^2	150
	Длительность действия ударного ускорения, мс Impact acceleration duration, ms	5–10
Линейное ускорение Linear acceleration	Значение линейного ускорения, м/с^2 Linear acceleration value, m/s^2	1000

ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ

Анализ полученных в ходе разработки данных показал, что дальнейшее совершенствование

Russian-made materials and components. The created sensors combine small dimensions (the occupied area is less than 1 cm^2) and power consumption (less than 1 mA at supply voltage of 3.3 V) with sufficiently high

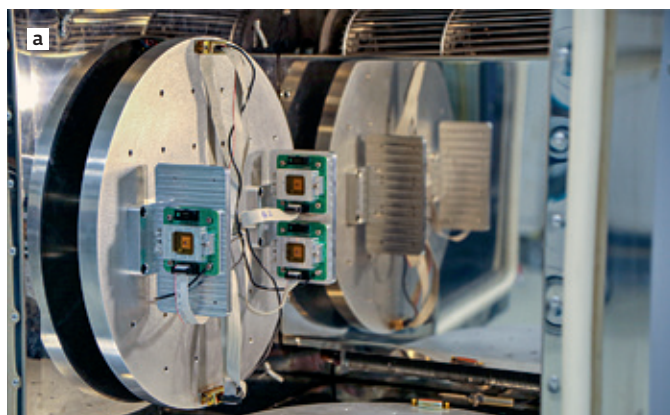


Рис.5. а – фотографии поворотного стола во внутреннем объеме термокамеры с установленными датчиками; б – рабочее место для регистрации и анализа данных

Fig.5. a – images of the turntable in the interior of the thermal chamber with sensors installed; b – the workstation for data recording and analysis



Таблица 3. Климатические воздействующие факторы

Table 3. Climatic affecting factors

Воздействующий фактор Affecting factor	Характеристика воздействующего фактора Characteristics of the affecting factor	Значение воздействующего фактора Affecting factor value
Повышенная температура среды Increased ambient temperature	При эксплуатации, °C In operation	+85
	При транспортировании и хранении, °C During transport and storage	-70
Пониженная температура среды Lowered ambient temperature	При эксплуатации, °C In operation	-60
	При транспортировании и хранении, °C	-60
Изменение температуры среды Change of environment temperature	Диапазон изменения температуры среды, °C Medium temperature variation range	-60 до +85 -60 up to +85
	Скорость изменения температуры, °C/мин Temperature change rate	3
Комбинированное воздействие Combined effect	Атмосферное пониженное давление, кПа Atmospheric underpressure, kPa	70,1
	Температура среды, °C Medium temperature	-4,5
Циклическое изменение температуры Cyclic temperature change	Последовательность изменения температуры, °C Sequence of temperature change	+15; -60; +60; +15
	Количество циклов Number of cycles	3
	Длительность одного полного цикла, ч Duration of single complete cycle, h	4

характеристик датчиков (выходной шум, нестабильность параметров) ограничено характеристиками применяемой электронной подсистемы. При этом в результате математического моделирования установлено, что в случае использования ЧЭ в компенсационном режиме возможно снизить указанные параметры на один десятичный порядок. Таким образом, реализация электронной подсистемы, обеспечивающей компенсационный режим работы ЧЭ, является приоритетным направлением совершенствования характеристик микромеханических датчиков линейных ускорений. В свою очередь, совершенствование ЧЭ может быть направлено на повышение его прочности к ударному воздействию за счет оптимизации параметров диэлектрических ограничителей перемещения инерционной массы.

performance characteristics, wide range of operating temperatures (-60 ÷ +85 °C) and other external influences. The available technological and testing base in SRC RF FSUE "Central Research Institute of Chemistry and Mechanics" provides possibility of serial production of linear acceleration sensors with the production volume at the level of 1000 pieces per year.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

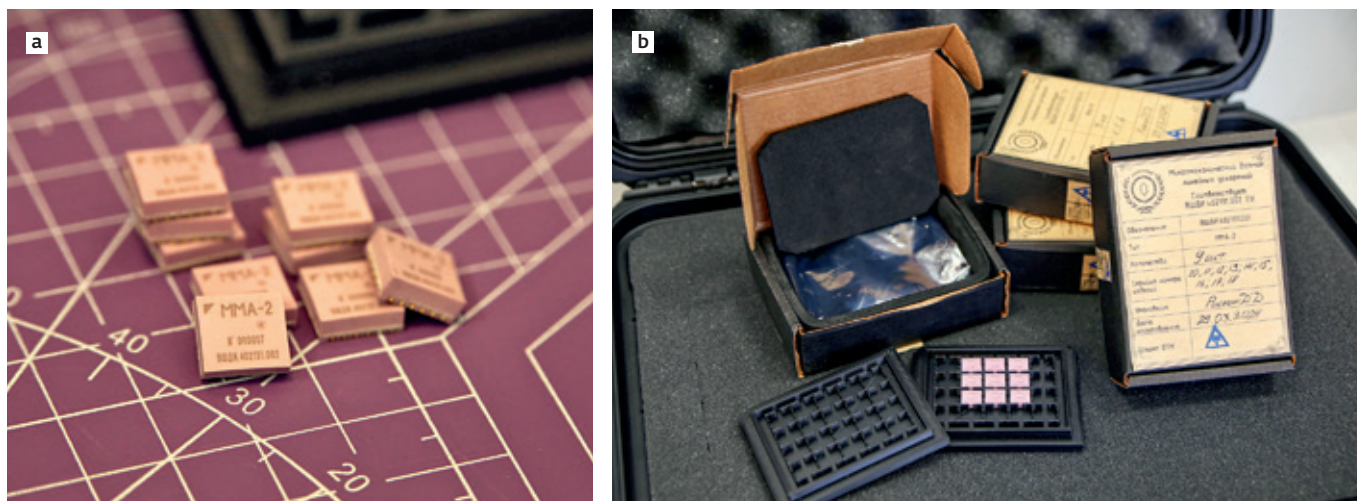


Рис.6. Фотографии датчиков ММА-2: а – после маркировки; б – в процессе упаковки
Fig.6. Images of MMA-2 sensors: a – after labelling, b – during the packing process

ВЫВОДЫ

В ФГУП "ЦНИИХМ" создана линейка микромеханических датчиков линейных ускорений с приемкой ОТК со следующими диапазонами преобразования: ± 20 м/с², ± 100 м/с² и ± 300 м/с². Датчики выполнены на базе материалов и комплектующих российского производства. Созданные датчики сочетают в себе малые габариты (занимаемая площадь менее 1 см²) и энергопотребление (менее 1 мА при напряжении питания 3,3 В) с достаточно высокими эксплуатационными характеристиками, широким диапазоном рабочих температур ($-60 \div +85$ °С) и других внешних воздействий. Имеющаяся технологическая и испытательная во ФГУП "ЦНИИХМ" база обеспечивает возможность серийного изготовления датчиков линейных ускорений с объемом производства на уровне 1000 штук в год.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. US5006487A. Method of making an electrostatic silicon accelerometer. Honeywell Inc., Minneapolis, Minn. (US). H01L 21/302. 09.04.1991.
2. US5551294A. Micromachined measuring cell with arm supported sensor. CSEM-Centre Suisse D'Electronique et de Microtechnique, Neuchatel (Switzerland). H01L 21/00. 27.01.1995.
3. US5352918A Capacitive micro-sensor with a low stray capacity and manufacturing method. Sextant Avionique, Cedex, (France). H01L 29/84 H01L 29/96. 04.10.1994. 16.02.1993.
4. EP0937985B1 A method of producing an acceleration sensor. Panasonic Holdings Corp. (JP) G01P 15/12. G01P 15/125. G01P 15/08. G01P 15/09. H01L 29/84. 07.09.1998.
5. Marjoux D., Ullah P., Frantz-Rodriguez N., Morgado-Orsini P.F., Soursoy M., Brisson R., Lenoir Y., Delhaye F. Silicon MEMS by Safran-Navigation grade accelerometer ready for mass production. In Proceedings of the 2020 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 15-16 September 2020.
6. Способ изготовления упругого элемента микромеханического устройства/ RU2580910C1. Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики" (ФГУП "ЦНИИХМ") (RU). H01L 21/308 10.04.2016.
7. Микромеханический датчик линейных ускорений. ММА-2, ММА-10, ММА-30. Технические условия. ВШДИ.402131.002 ТУ, 84 с.
8. Микромеханический датчик линейных ускорений. ММА-2, ММА-10, ММА-30. Руководство по эксплуатации. ВШДИ.402131.002 РЭ, 25 с.

ЛУЧШАЯ
ВЫСТАВКА
РОССИИ*

21–24.10.2024

www.chemistry-expo.ru



27-я международная
выставка химической
промышленности
и науки

ХИМИЯ

КНИМИА

12+ Реклама



При поддержке:
• Министерства промышленности и торговли РФ
• Российского Союза химиков
• ОАО «НИИТЭХИМ»
• Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
• РХТУ им. Д.И. Менделеева
Под патронатом ТПП РФ



Минпромторг
России



Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

Организатор

65 ЭКСПОЦЕНТР

*Согласно Общероссийскому рейтингу выставок. Подробнее – www.exporating.ru