

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

УДК 629.7.072.1

А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирянина

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЪЕМНОЙ МИКРОМЕХАНИКИ

A. G. Dmitrienko, A. A. Papko, S. I. Torgashin, I. V. Kiryanina

ON STUDY THE POSSIBILITY OF DEVELOPING INERTIAL MODULES ON THE BASIS OF DOMESTIC METHODS OF HIGH-VOLUME MICROMECHANICS

А н н о т а ц и я. Эффективность решения задач навигации подвижных объектов в значительной степени зависит от качества инерциальных модулей, в состав которых входят акселерометры и датчики угловой скорости. В платформенных инерциальных системах выходной сигнал акселерометров подвергается двойному интегрированию для определения скорости и координат. При этом информацию о направлении ускорения получают от датчиков угловой скорости, обеспечивающих для акселерометров опорную систему координат. В настоящее время актуальны исследования и разработки микромеханических инерциальных модулей, обеспечивающих существенное улучшение массогабаритных и энергетических характеристик навигационных систем. Рассмотрены конструктивно-технологические особенности их реализации.

A b s t r a c t. Efficiency of solving moving craft navigation problems mostly depends on the quality of inertial measuring cells comprising accelerometers and angular velocity sensors. In platformless inertial systems to determine velocity and coordinates accelerometer output signal is double integrated. Acceleration direction data at that is received from angular velocity sensors providing reference frame for accelerometers. Currently urgent are investigations and developments of micromechanical inertial measuring cells providing essential improvement of mass-dimensional and energy characteristics of navigation systems. The paper deals with structural and technological peculiarities of their realization.

К л ю ч е в ы е с л о в а: микромеханические инерциальные измерительные модули, микромеханические датчики угловой скорости, микромеханические акселерометры, бес-

платформенные инерциальные навигационные системы, технологии объемной микроэлектроники, МЭМС-технологии, СБИС.

Key words: micromechanical inertial measuring cells, micromechanical angular velocity sensors, micromechanical accelerometers, platformless inertial navigation systems, 3d micro-mechanics technologies, MEMS technologies, VLSI.

Введение

Системы управления движением являются важнейшей частью любого ракетно-космического комплекса.

Для космических аппаратов, движущихся по баллистическим траекториям с большими скоростями и на большом удалении от поверхности Земли, задачи управления решаются посредством использования инерциальных навигационных систем, основными достоинствами которых являются их автономность или независимость от внешних источников информации, возможность выработки данных для управления движением объекта непосредственно на борту и абсолютная помехозащищенность [1].

Основными узлами инерциальной навигационной системы являются:

- измерительный модуль, содержащий по три акселерометра и датчика угловой скорости;
- вычислительный блок, в котором осуществляются интегрирование основного уравнения, вычисление необходимых параметров движения, формирование сигналов управления ориентацией инерциальных измерителей и сигналов компенсации систематических погрешностей;
- блок времени, из которого в измерительный модуль и вычислительный блок поступают сигналы мирового времени;
- блок ввода начальной информации в вычислитель для ориентации инерциальных измерителей и интегрирования основного уравнения;
- блок выдачи информации о параметрах движения.

Датчиками первичной информации для инерциальных измерительных модулей систем управления движением различных объектов являются инерциальные компоненты – датчики угловой скорости и акселерометры.

Датчики угловой скорости (ДУС) измеряют скорость вращения объекта, а акселерометры – ускорение. Для отслеживания ориентации объекта сигналы ДУС интегрируются, а для отслеживания положения объекта сигналы акселерометра дважды интегрируются, что дает представление о положении объекта в глобальной системе координат. При этом известно, что технологии изготовления инерциальных измерительных модулей определяются технологиями изготовления инерциальных компонентов.

Лидирующим российским разработчиком и производителем инерциальных систем управления (термин разработчика) на основе прецизионных акселерометров и поплавковых гироскопов с газодинамической опорой является ФГУП «НПЦ АП им. академика Н. А. Пилюгина». В них опорная система координат обеспечивается установкой акселерометров на платформах, стабилизируемых физическим гирокомпасированием. Платформенная инерциальная система НПЦ АП является универсальным аппаратным ядром ракетносителей разгонных блоков и космических аппаратов различных типов. Несмотря на то что инерциальные компоненты и навигационные системы НПЦ АП с полным правом можно отнести к уровню «High-End» (высшего класса), они не соответствуют современным требованиям из-за неудовлетворительных массогабаритных (масса 30 кг) и энергетических характеристик (энергопотребление 120 Вт).

Известным способом совершенствования инерциальных систем управления и навигации являются бесплатформенная установка акселерометров и гироскопов на борту с жесткой привязкой к осям подвижного объекта и замена физического гирокомпасирования на математическое.

В США лабораторией Дрейпера совместно с фирмой Northrop Electronics Division в конце 80-х гг. прошлого столетия создана одна из первых в мире бесплатформенных инерциальных систем (БИНС) типа AIRS, точность которой до настоящего времени позволяет использовать ее в качестве эталона для других БИНС. Область ее использования из-за значительной сложности примененных технических и технологических решений и высокой стоимости ограничена стратегическими межконтинентальными ракетами серии Minuteman (на конец 1989 г. стоимость одного акселерометра системы AIRS оценивалась в 300 тыс. долл.).

Для зарубежной космической техники бесплатформенные инерциальные навигационные системы в основном разрабатывает и производит фирма Honeywell. В номенклатуру ее продукции входят инерциальные блоки (IMU) и индивидуальные инерциальные компоненты. На

основе технологий Q-Flex фирмой изготавливаются акселерометры типа QA-3000, стоимость которых достигает 14 тыс. долл., и кольцевые лазерные гироскопы HG9848, HG9900, стоимость которых не озвучивается. Системы управления и навигации фирмы Honeywell уровня «High-End» отличаются высокой точностью и по сравнению с отечественными аналогами имеют более совершенные массогабаритные и энергетические характеристики. Их характеристики обеспечивают уникальные и растущие требования управляемых тактических и навигационных платформ всех типов подвижных объектов – изделий РКТ, управляемых снарядов, баллистических перехватчиков, беспилотных транспортных средств, целей, торпед.

ФГУП «НПЦ АП им. академика Н. А. Пилогина» в своих рекламных материалах также заявляет о создании БИНС на основе каналов измерения линейного ускорения на базе маятниковых акселерометров с кремниевым подвесом и магнитоэлектрическим уравниванием типа АКП и каналов измерения угловой скорости на базе трехкоординатного волоконно-оптического датчика угловой скорости с дискретными выходами. Судя по представленным характеристикам акселерометра АКП, каналы измерения ускорения указанной БИНС уступают аналогичным каналам системы фирмы Honeywell не менее чем на порядок по смещению нуля, разрешающей способности, временной и температурной стабильностям коэффициента преобразования. При этом следует отметить, что волоконно-оптические гироскопы также уступают по характеристикам кольцевым лазерным гироскопам, примененным в БИНС фирмы Honeywell. Рекламуемая БИНС НПЦ АП имеет массу 5,2 кг и потребляемую мощность 50 Вт, что более чем вдвое превышает аналогичные характеристики БИНС фирмы Honeywell.

В целях дальнейшего расширения рынка за счет создания сверхминиатюрных БИНС фирма Honeywell достигла определенных успехов на пути практического использования МЭМС-технологий.

Известными целями создания инерциальных МЭМС-компонентов является удовлетворение:

- потребностей рынка специального назначения – военного, космического, сейсмомониторинга и т.д. уровня «High-End»;
- потребностей массового производства автомобильной, строительной и медицинской техники. Приоритетной характеристикой МЭМС-компонентов для этого сектора является низкая стоимость.

Рынок акселерометров массового производства широко известен. Их распространению на другие сегменты рынка препятствуют неудовлетворительные метрологические характеристики, отсутствие индивидуальных характеристик, неудобство механического и электрического подключения на изделия, необходимость использования переходных конструкций и сервисных элементов, ухудшающих массогабаритные характеристики.

Рынок датчиков угловой скорости (ДУС) значительно скромнее в связи с более высокой технологической и конструктивной сложностью по сравнению с акселерометрами.

Возможности развития массовых МЭМС-технологий в РФ ограничены отсутствием гарантированного массового рынка сбыта. Известный российский специалист в области микроэлектроники И. Шахнович пояснял: «Все высокотехнологичные производители электронной продукции ориентированы на массовые сектора рынка. Лучше сразу похоронить какие-либо идеи о применении суперсовременных технологий в немассовых областях, например, военной или военно-космической. Любой другой путь, как показывает практика, не по силам экономике ни одной страны в мире» [2].

Технологии объемной микромеханики не требуют значительных инноваций в свое развитие, в связи с чем и могут эффективно использоваться в мелкосерийном производстве. При этом по сравнению с технологиями массового производства микромеханические акселерометры и ДУС имеют принципиально большие возможности повышения точности. Для них нормируются индивидуальные метрологические характеристики, что является одним из основных преимуществ их применения в инерциальных модулях.

Примером внедрения технологий объемной микромеханики являются акселерометры АЛЕ 049, АЛЕ 050, выпускаемые в ОАО «НИИФИ» с 1998 г.

По сравнению с зарубежными и отечественными аналогами акселерометры типа АЛЕ 049, АЛЕ 050 и новые разработки ОАО «НИИФИ» имеют высокие метрологические характеристики, надежность и механическую прочность, а также отличаются технологичностью механического и электрического подключения к изделиям РКТ. Результаты сравнения микромеханических и интегральных акселерометров нового поколения ОАО «НИИФИ» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики микромеханических и интегральных акселерометров

Наименование характеристики и единицы измерений	Характеристики исследуемого акселерометра	Количественные показатели характеристик для каждого типа				Микромеханический акселерометр инерциального модуля HG 1700 фирмы Honeywell	Микромеханический однокомпонентный MS7010 «Colibrys»
		Интегральный акселерометр АЛЕ 064 ОАО «НИИФИ»	Микромеханический акселерометр АЛЕ 065 ОАО «НИИФИ»	Интегральный акселерометр АКП2 ФГУП «НИЦ АП им. академика Н. А. Пилогина»	±750		
Диапазон измерений, м/с ²	От ±11 до ±700	От ±2,8 до ±700	От ±2,8 до ±700	±750	±700	±100	
Пределы измерения выходного сигнала, В	(0-6)	(0-6)	(0-6)	±10	(2±1,6)	(2±1,6)	
Среднеквадратическое значение нелинейности градуировочной характеристики, %, не более	0,01	0,001	0,01	0,01	0,05	0,9	
Частотный диапазон измерений, Гц	От 0 до 256	От 0 до 256	От 0 до 256	-	-	0-600	
Разрешающая способность, 10 ⁻⁶ g	100	10	100	-	1000	-	
Температурная стабильность смещения нуля, μg/°C	300	100	300	100	-	-	
Температурная стабильность коэффициента преобразования, %/°C	0,01	0,003	0,01	0,005	-	0,03	
Температура окружающей среды, °C	±65	От минус 50 до +125	±65	От минус 50 до +80	От минус 40 до +105	От минус 40 до 125	
Напряжение питания постоянного тока, В	±(15±0,5)	±(15±0,5)	±15	±15	+5	+5	
Потребляемый ток (мощность), мА, (Вт)	До 2	До 2,5	0,6	До 2,5	До 0,1	До 0,7	
Масса в стальном корпусе, г, не более	50	50	50	50	Масса ЧЭ без корпуса не более 5	Масса ЧЭ без корпуса не более 7	

Интегральными акселерометрами названы прецизионные акселерометры с кремниевым подвесом и магнитоэлектрическим уравниванием. Результаты сравнения показывают:

– метрологические характеристики интегральных акселерометров близки к аналогичным Q-Flex-акселерометрам;

– метрологические характеристики микромеханических объемных акселерометров уступают интегральным по температурной нестабильности смещения нуля и коэффициента преобразования в три раза, по разрешающей способности и линейности функции преобразования – на порядок. Микромеханический акселерометр на основе поверхностной микромеханики по разрешающей способности на порядок уступает объемным акселерометрам и в пять раз – по нелинейности функции преобразования;

– по потребляемой мощности микромеханические объемные акселерометры по технологиям объемной микромеханики превосходят интегральные акселерометры не менее чем в 3,5 раза, а акселерометр на основе поверхностной микромеханики – более чем в 20 раз;

– масса представленных акселерометров, за исключением акселерометров фирм Honeywell и Colibrus, главным образом определяется массой стальных герметичных корпусов.

На основе общего анализа представленных характеристик можно отметить, что явным преимуществом и отличием микромеханических акселерометров от интегральных являются улучшенные энергетические характеристики. Такое преимущество, как малые габариты чувствительного элемента, теряет свою значимость из-за необходимости корпусирования в герметичный корпус.

В связи с этим при выборе акселерометра для микромеханического инерциального блока приоритетными характеристиками будут являться низкая стоимость и необходимость уменьшения потребляемой мощности.

ДУС по сравнению с акселерометрами являются более сложными устройствами, в связи с чем достижения в разработке МЭМС или микромеханических ДУС можно охарактеризовать как менее значительные.

Наиболее распространенным принципом действия микромеханических датчиков угловой скорости является реализация режима вибрационного гироскопа. Такие датчики называются микромеханическими вибрационными гироскопами и работают на принципе Кориолиса, когда при возбуждении первичных колебаний вибрационной структуры по одной оси и при наличии измеряемой угловой скорости по другой оси, перпендикулярной к первой, под действием сил Кориолиса возникают вторичные колебания вибрационной структуры по третьей оси, перпендикулярной к первой и второй осям.

Как правило, микромеханические ДУС воспринимаются потребителем как дешевые датчики средней точности, что в большинстве случаев соответствует действительности. Подобные ДУС выпускаются в значительных количествах фирмами Murata, Epson, Silicon Sensing, Honeywell, Analog Devices. Наиболее распространенной конструктивной схемой построения чувствительных элементов (ЧЭ) ДУС указанных фирм является вариант с плоскопараллельным перемещением инерционных элементов (LL-типа). Подавляющее большинство таких приборов представляет собой микроэлектромеханические системы, которые изготавливают по технологиям поверхностной микромеханики. Однако базовые технологические процессы поверхностной микромеханики не позволяют на требуемом уровне решить проблемы стабильности метрологических характеристик, вызванных отличием реальных электрофизических свойств кремния от ожидаемых. На них значимое влияние оказывают электрические шумы различной природы.

На рынке микромеханических вибрационных гироскопов в качестве разработчиков и изготовителей позиционируют себя следующие российские предприятия:

- ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"» (г. Санкт-Петербург);
- ООО «Айсенс» (г. Москва);
- ЗАО «Инерциальные Технологии "Технокомплекса"» (г. Раменское);
- ЗАО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург).

Наиболее важные технические характеристики микромеханических вибрационных гироскопов указанных фирм приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наиболее важные технические характеристики микромеханических вибрационных гироскопов

Наименование предприятия	Диапазон измерений, °/С	Угловой случайный шум, °/√ч	Нестабильность смещения нуля, °/ч
ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"» (г. Санкт-Петербург)	±1000	15	50
ООО «Айсенс» (г. Москва)	±1000	10	30
ЗАО «Инерциальные Технологии "Технокомплекса"» (г. Раменское)	±300	72	70
ЗАО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург)	±200	100	–

Отличительным признаком разработок указанных предприятий является то, что для изготовления они используют микросхемы ДУС таких фирм, как Analog Devices, Northrop Grumman, Silicon Sensing, Sensorog и др. Используемый подход существенно ограничивает возможности использования ДУС указанных фирм на изделиях РКТ. Кроме того, ДУС этих фирм имеют неудовлетворительные показатели углового случайного шума, находящиеся в интервале от 10 до 100 °/√ч.

Улучшения характеристик микромеханических ДУС можно добиться, совершенствуя технологии, конструкции ЧЭ и схемотехнику. Известным путем улучшения метрологических характеристик ДУС является применение в них технологий объемной микромеханики.

Для таких технологий наиболее приемлемо использование конструктивного построения ДУС с кардановым подвесом (RR-типа).

Общий вид ЧЭ ДУС на основе объемной микромеханики показан на рис. 1.

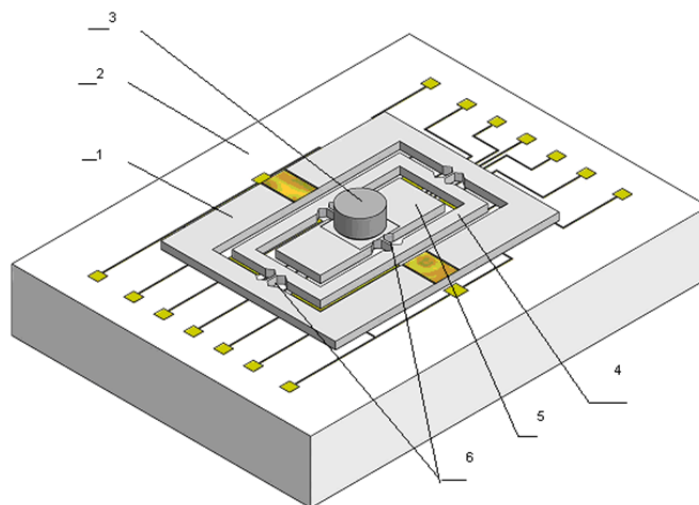


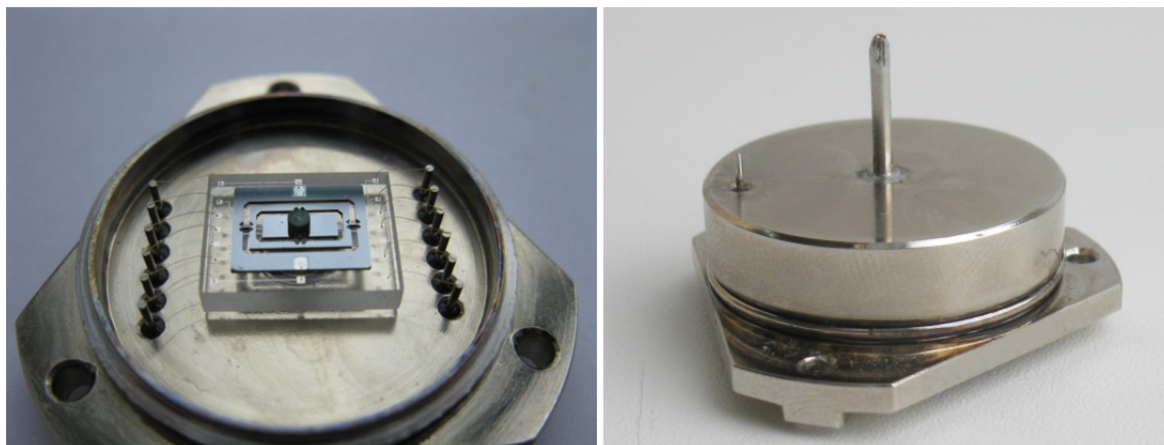
Рис. 1. ЧЭ вибрационного ДУС на основе объемной микромеханики:

1 – кремниевый кристалл; 2 – стеклянная подложка с напыленными неподвижными пластинами дифференциальных конденсаторов; 3 – верхний груз (нижний установлен симметрично верхнему, на рисунке не виден); 4 – наружная рамка; 5 – внутренняя рамка; 6 – торсионы

Как видно из рисунка, ЧЭ содержит две механические колебательные системы (МКС) – внешнюю и внутреннюю. Рамка каждой из МКС выполняет функции подвижных емкостных обкладок дифференциальных конденсаторов датчиков углового перемещения и электростатических обратных преобразователей. С целью выравнивания собственных частот МКС на внутреннюю рамку крепятся дополнительные грузы из вольфрама.

Очевидная возможность использования базовых технологий объемной микромеханики – формообразования МКС из монокристаллического кремния, напыления проводящих слоев на пластинах из стекла, электротермостимулированного сращивания кремния из стекла – позволяет надеяться на получение положительного результата по созданию ЧЭ ММВГ.

В настоящее время в ОАО «НИИФИ» разработаны макетные образцы ДУС, фотографии ЧЭ которых показаны на рис. 2.



а)

б)

Рис. 2. Фотография чувствительного элемента ДУС: без крышки (а); с крышкой (б)

Для них экспериментально подтверждено значение углового случайного шума, не превышающее $5^\circ/\sqrt{ч}$, что почти на порядок лучше аналогичного показателя для ДУС, в изготовлении которых используются зарубежные чувствительные элементы.

Сравнение полученного результата с характеристиками случайного шума, приведенного в табл. 2, показывает, что у экспериментальных образцов ДУС ОАО «НИИФИ» уже в настоящее время получены удовлетворительные результаты по значению углового случайного шума.

Процесс формулирования комплекса причин, препятствующих повышению стабильности МЭМС-компонентов, сопровождался и сопровождается поиском путей по уменьшению их негативного влияния.

В настоящее время пути решения проблемы можно представить в виде:

- совершенствования схемотехники в направлении внедрения импульсных методов многотактного уравнивания зарядов в цепях измерения электрических емкостей и методов широтно-импульсной модуляции в цепях уравнивания механических моментов, пропорциональных измеряемым параметрам;

- обработки технологий их изготовления таким образом, чтобы из всего комплекса электрофизических параметров кремния использовать только его упругие свойства и способность к формообразованию с использованием комбинации анизотропного и реактивного ионно-плазменного травления для получения сквозных отверстий и формирования подвесов сложной формы с вертикальными стенками.

При этом содержание процессов обработки сопряжено с проведением исследований и разработкой новых технологий, предусматривающих:

- исследование конструкторско-технологических решений, обеспечивающих исключение зависимости изолирующих свойств оксидов кремния от значений и полярности информационных сигналов, протекающих через кремниевый кристалл;

- исследование технологий, направленных на снижение плотности поверхностных состояний на кремниевых конструкциях и способствующих повышению временной стабильности акселерометров и ДУС. В первую очередь речь идет об исследовании и особенностях внедрения реактивного ионно-плазменного травления, отличающегося управляемостью, обеспечивающего снижение плотности в поверхностях состояний и, как следствие, повышение стабильности;

- совершенствование технологий нанесения фоторезистивных масок на рельефные поверхности кремниевых кристаллов и технологий анизотропного и изотропного травления кремния;

- обработку технологий металлизации глубокорельефных кремниевых поверхностей;

- обработку технологий вакуумирования с сохранением уровня вакуума, достигнутого при производстве ДУС.

Наряду с решением перечисленных задач в ОАО «НИИФИ» в настоящее время ведется разработка микромеханического инерциального модуля. Основной задачей разработки на этом этапе являются моделирование структурных схем и алгоритмов функционирования вычислителя и моделирование конструктивных решений трехкомпонентного измерительного модуля, направленное на оптимизацию массогабаритных характеристик.

Алгоритмы, позволяющие по сигналам датчиков инерции получить информацию о положении и ориентации, а также скорости объекта в реальном времени, хорошо известны [1] и отражают взаимодействие таких основных блоков, как инерциальный модуль, вычислитель, блоки ввода начальной информации и вывода окончательной информации о параметрах движения.

Заключение

Полученные результаты будут использованы в проведении ОКР по разработке инерциальных элементов и микромеханических измерительных инерциальных модулей, предназначенных для коррекции траектории движения и стабилизации маломерных космических аппаратов (изделия ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина», ОАО «РКЦ им. академика В. П. Макеева», «НПО автоматики им. Н. А. Семихатова»).

Двойное применение результатов исследований предусматривает применение микромеханических инерциальных модулей в интеллектуальном управлении снарядами, разрабатываемых и изготавливаемых ГНПП «Сплав» (г. Тула), КБП (г. Тула), ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева».

Список литературы

1. Ориентация и навигация подвижных объектов / под общ. ред. Б. С. Алешина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. – М. : Физматлит, 2006.
2. Шахнович, И. Технологии уровня 45 нм: 45, 32, далее везде? / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – № 2.

Дмитриенко Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: niifi@sura.ru

Dmitrienko Aleksey Gennad'evich

candidate of technical sciences,
director general,
Scientific-research Institute
of physical measurements

Папко Антонина Алексеевна

доктор технических наук,
главный конструктор направления,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: inercial@niifi.ru

Papko Antonina Alekseevna

doctor of technical sciences,
chief designer,
Scientific-research Institute
of physical measurements

Торгашин Сергей Иванович

директор по производству,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: niifi@sura.ru

Torgashin Sergey Ivanovich

director of production,
Scientific-research Institute
of physical measurements

Кирынина Ирина Владимировна

заместитель начальника комплекса –
начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
E-mail: niifi@sura.ru

Kiryanina Irina Vladimirovna

deputy head of research
and development department – head of division,
Scientific-research Institute
of physical measurements

УДК 629.7.072.1

Дмитриенко, А. Г.

Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики / А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирянина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 45–53.