

УДК 531.383

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-531-537

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА И МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Д.С. Гнусарев, В.В. Скоробогатов, Е.А. Депутатова

Филиал ФГУП «НПЦАП» — «ПО «Корпус» Саратов, 410010, Российская Федерация
 Адрес для переписки: men4eg@outlook.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.02.19, принята к печати 20.03.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Гнусарев Д.С., Скоробогатов В.В., Депутатова Е.А. 3D-моделирование чувствительных элементов волнового твердотельного гироскопа и маятникового акселерометра из кварцевого стекла // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 531–537. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-531-537

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены физические процессы, проходящие внутри чувствительных элементов измерителей угловой скорости и линейного ускорения, на примере волнового твердотельного гироскопа и маятникового акселерометра. Инерционные массы исследуемых чувствительных элементов изготовлены из кварцевого стекла марки КУ-1. **Метод.** Используя рабочие чертежи чувствительных элементов, проведена их реализация в специализированном программном обеспечении, позволяющем выполнить 3D-моделирование работы приборов при действии различных входных воздействий, что осуществить с использованием реальных приборов не представляется возможным, а аппарат математического моделирования, например, с применением программного комплекса MATLAB, не дает полной картины. **Основные результаты.** По результатам 3D-моделирования получена визуальная информация о характере движения инерционных масс чувствительных элементов, что позволило скорректировать известные математические модели приборов для последующего анализа в программном комплексе MATLAB с замкнутым контуром управления, так как исследуемые гироскоп и акселерометр являются приборами компенсационного типа с положительной и отрицательной обратной связью соответственно. Также произведен расчет резонансных частот рассматриваемых приборов. **Практическая значимость.** На данный момент для маятникового акселерометра полученная информация о резонансных частотах позволила провести расчет полосовых фильтров для подавления реакций на возмущения на данных частотах в полосе пропускания прибора, а для волнового твердотельного гироскопа — уточнить рабочую частоту колебаний резонатора.

Ключевые слова

маятниковый акселерометр, волновой твердотельный гироскоп, кварцевое стекло, 3D-моделирование, математическая модель

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-531-537

3D-MODELING OF QUARTZ GLASS SENSORY ELEMENTS OF HEMISPHERICAL RESONATOR GYRO AND PENDULUM ACCELEROMETER

D.S. Gnusarev, V.V. Skorobogatov, E.A. Deputatova

Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” — Production Association “Korpus”, Saratov, 410010, Russian Federation
 Corresponding author: men4eg@outlook.com

Article info

Received 18.02.19, accepted 20.03.19
 Article in Russian

For citation: Gnusarev D.S., Skorobogatov V.V., Deputatova E.A. 3D-modeling of quartz glass sensory elements of hemispherical resonator gyro and pendulum accelerometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 531–537 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-531-537

Abstract

Subject of Research. The paper considers physical processes occurring in sensory elements of angular rate and apparent acceleration measuring devices, such as hemispherical resonator gyro and pendulum accelerometer. Inertial masses of the studied sensory elements are made of KU-1 quartz glass. **Method.** Actual engineering drawings of the sensory elements are converted

into a specialized 3D environment to simulate the performance of devices under different input effects, that is impossible with real devices. Moreover, traditional mathematical modeling approach, that involves such software packages as Matlab, does not provide a complete picture. **Main Results.** Visual information on the nature of motion of inertial masses was obtained using the results of 3D modeling, making it possible to improve and correct the known mathematical models of devices for subsequent Matlab analysis with closed control loop, since the studied gyro and accelerometer are compensation type devices with positive and negative feedback, respectively. Resonant frequencies of the considered devices were calculated as well. **Practical Relevance.** Considering the accelerometer, the obtained information on resonant frequencies made it possible to calculate band pass filters in order to suppress reactions to disturbances at these frequencies in the device pass band, and for the hemispherical resonator gyro it provides the possibility to define more precisely the resonator working frequency of oscillations.

Keywords

pendulum accelerometer, hemispherical resonator gyro, quartz glass, 3D-modeling, mathematical model

Введение

С середины 1970-х годов в области инерциальной навигации широкое распространение получили технологии бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), когда бортовая система координат объекта формировалась не физически, как в гиросtabilизированной платформе, а математически — в управляющем процессоре системы, инерциальные чувствительные элементы (ИЧЭ) которой — измерители угловой скорости и линейного ускорения — располагались либо по базовым координатным осям трехгранника, связанного с центром масс БИНС, либо имели неортогональную ориентацию осей чувствительности ИЧЭ и комплектовались в тетрады, пентады и гексады [1–4]. Развитие в последние годы вакуумных технологий с применением приборов, чувствительными элементами которых являются изделия из кварцевого стекла [5], привели к тому, что современные БИНС ракетно-космического и авиационного применения строятся на кварцевых маятниковых акселерометрах (КМА) [6–12] и волновых твердотельных гироскопах (ВТГ) [13–18].

Общие тенденции развития инерциальных чувствительных элементов для БИНС выдвигают следующие требования [1]: обеспечение наивысших точностей в плане уменьшения случайной составляющей смещения нулевого сигнала в запуске и между запусками, уменьшение погрешности коэффициента преобразования до сотых и тысячных долей процента и расширение диапазона измерения. Кроме того, если платформенные системы за счет работы разгрузочных двигателей по каждой из трех осей стабилизации обеспечивали защиту первичных измерителей от вибрационных воздействий, а обогрев гироскопов и акселерометров обеспечивал инвариантность приборов к изменениям температуры окружающей среды, что приводило к существенному весу и энергопотреблению гиросtabilизированных платформ, то современные БИНС, обладая значительно меньшими массами и энергопотреблением, чувствительны к вибрационным и температурным возмущениям, а системные требования к их динамическим и температурным характеристикам лишь ужесточаются. Полоса пропускания современных инерциальных чувствительных элементов должна составлять сотни герц, а температурный диапазон, например, для приборов авиационного применения — от -65 до $+85$ °C.

Методы математического моделирования всегда широко применялись при исследовании динамических свойств гироскопических приборов и акселерометров. Современный кварцевый маятниковый акселерометр или волновой твердотельный гироскоп, рассматриваемые в качестве примеров ИЧЭ БИНС в настоящей работе, представляют собой сложнейшую электромеханическую структуру с цифровой системой автоматического управления, поэтому исследования подобных приборов в комплексе требуют применения современных программно-математических средств, которые несут в себе ранее известные методы исследования, например, метод конечных элементов и методы синтеза регуляторов систем автоматического управления, для применения которых требовалось создание программно-математического обеспечения отдельно для каждого прибора.

Задачи исследования

На рис. 1, а приведена трехмерная модель маятника КМА [10], где 1 — маятник из кварцевого стекла марки КУ-1¹ с напылением золота/хром, 2 — медные катушки датчика момента, 3 — тонкие перемычки из кварцевого стекла марки КУ-1.

На рис. 1, б приведена трехмерная модель резонатора ВТГ [14], где 1 — резонатор из кварцевого стекла марки КУ-1, 2 — напыление хромом на внутренней части резонатора.

При исследовании КМА рассмотрены вопросы оптимизации геометрии трехмерной модели маятника, настройки физической модели, оптимизации расчетной сетки, приведены результаты расчетов собственных резонансных частот и исследований в частотной и временной областях. Моделирование проведено с целью уточнения применяемых на нашем предприятии (филиале ФГУП «НПЦАП» — «ПО «Корпус», г. Саратов)

¹ ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. Введен 01.01.88. М.: ИПК издательство стандартов, 1987. 30 с.

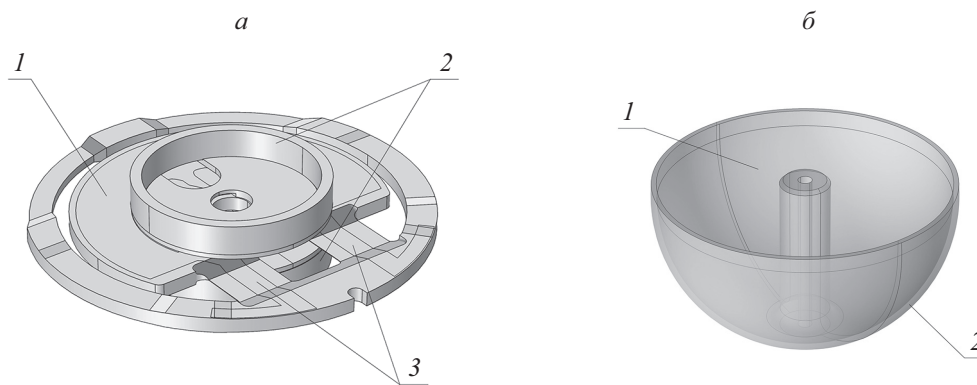


Рис. 1. Модели механических частей исследуемых приборов

математических моделей перемещения маятника (модель углового движения, построенная на уравнениях Даламбера, и модель плоскопараллельного движения, основанная на втором законе Ньютона) [11].

Уравнение движения чувствительного элемента КМА, совершающего угловое движение [1, 19, 20], имеет вид:

$$I_{\beta} \ddot{\beta} + n_{\beta} \dot{\beta} + C_T \beta + K_{\text{дм}} i_{\text{дм}} = ml \cdot q + M_{\beta}, \quad (1)$$

где I_{β} — момент инерции; n_{β} — коэффициент демпфирования; C_T — угловая жесткость торсиона подвеса маятника; β — угол отклонения маятника; $K_{\text{дм}}$ — крутизна характеристики датчика момента; $i_{\text{дм}}$ — ток датчика момента, формируемый в цепи обратной связи; ml — маятниковость; q — проекция вектора измеряемого ускорения на ось чувствительности; M_{β} — сумма вредных моментов.

Уравнение движения чувствительного элемента КМА, совершающего плоскопараллельное движение, имеет вид:

$$m \ddot{x} + n_x \dot{x} + C_x x + K_{\text{дс}} i_{\text{дс}} = m \cdot q + F_x. \quad (2)$$

Здесь, помимо указанных выше, введены следующие обозначения: m — масса маятника; n_x — коэффициент демпфирования; C_x — линейная жесткость торсиона подвеса маятника; x — перемещение маятника в направлении, перпендикулярном его плоскости; $K_{\text{дс}}$ — крутизна характеристики датчика силы; $i_{\text{дс}}$ — ток датчика силы, формируемый цепью обратной связи; F_x — сумма сил, обусловленных помехами.

При исследовании резонатора ВТГ приведены результаты расчетов собственных резонансных частот резонатора с целью уточнения рабочей частоты ВТГ.

Подготовка трехмерных моделей и настройка физических интерфейсов

Трехмерные модели КМА и ВТГ построены в одном из программных комплексов для создания 3D-моделей, позволяющем реализовать действующую рабочую документацию на каждый из приборов, после чего полученные 3D-модели переданы в другой программный комплекс для проведения моделирования физических процессов методом конечных элементов, позволяющий интегрировать реализованные проекты со средой MATLAB. Так как способы построения и отображения геометрии в различных программных комплексах имеют существенные различия, то после передачи в геометрии модели могут появляться дополнительные грани, в дальнейшем затрудняющие моделирование. Это делает необходимым оптимизацию геометрии. На рис. 2, а хорошо видны такие дополнительные грани, созданные в процессе передачи модели

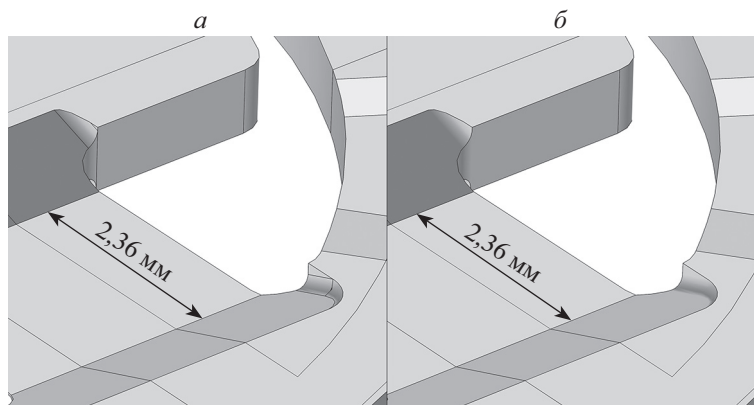


Рис. 2. Геометрия маятника до (а) и после (б) оптимизации

маятника КМА, а на рис. 2, б виден результат оптимизации геометрии встроенными инструментами второго программного комплекса.

При настройке физической модели в обоих случаях применены два физических интерфейса, доступные в применяемом программном комплексе: первый (физика твердого тела) применяется ко всему объему объектов исследования, а второй (моделирование тонких пленок) — для указания тонких слоев напыления на поверхностях. Применение второго интерфейса значительно увеличивает время расчета, и его применение в обоих случаях ограничивается наиболее деформируемыми областями геометрии.

Материалы различных частей чувствительных элементов (рис. 3) заданы в соответствии с действующей конструкторской документацией, а свойства указанных материалов перенесены из нормативной документации.

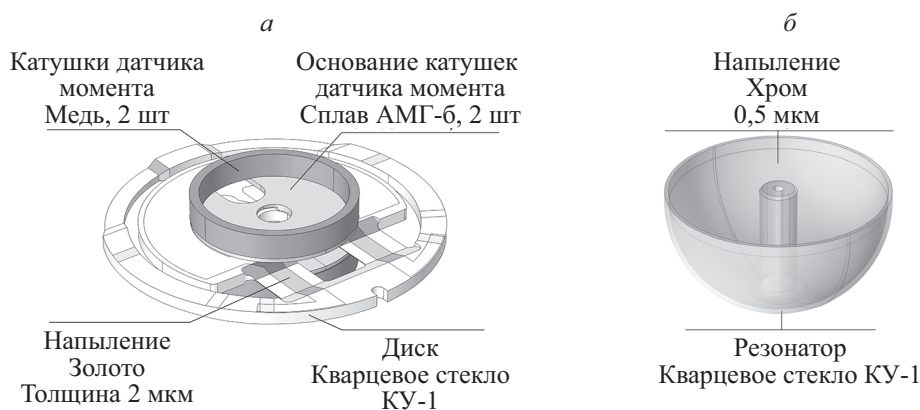


Рис. 3. Материалы в модели маятника кварцевого маятникового акселерометра (а), материалы в модели резонатора волнового твердотельного гироскопа (б)

Настройка первого физического интерфейса для маятника КМА проведена следующим образом: указаны области фиксации геометрии в соответствии со сборочным чертежом чувствительного элемента; настроены жесткие связи между элементами маятника; задано значение коэффициента демпфирования, известное из ранее проводившихся экспериментальных работ; произведена настройка параметров в соответствии с проводимым исследованием.

Для резонатора ВТГ настройка первого физического интерфейса ограничена указанием областей фиксации геометрии. Настройка связей не требуется, так как резонатор в данном случае не содержит составных частей, а значение коэффициента демпфирования не указывается, так как резонатор находится в вакууме.

Настройка второго физического интерфейса в моделях заключается в указании областей применения интерфейса и толщины напыления.

Построение расчетной сетки

В обоих случаях применена расчетная сетка с пользовательскими настройками, так как именно такой подход к ее построению позволяет получить наилучшее качество разбиения исходной модели.

Расчетная сетка резонатора ВТГ (рис. 4, а) содержит примерно 50 000 четырехгранных конечных элементов. Среднее значение качества элементов сетки составило примерно 0,69, при этом значение увеличивается в местах возникновения наибольших деформаций.

При настройке расчетной сетки маятника КМА (рис. 4, б) в первую очередь настроено разбиение области перемычек, так как именно там деформации имеют наибольшее значение. Построенная сетка об-

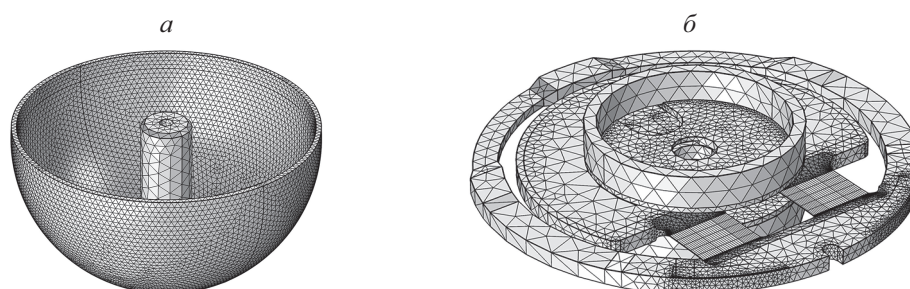


Рис. 4. Расчетная сетка резонатора волнового твердотельного гироскопа (а), расчетная сетка маятника кварцевого маятникового акселерометра (б)

ладает следующими показателями: общее количество конечных элементов примерно равно 45 000 (из них примерно 1200 шестигранников, 500 пятигранников и 42 000 четырехгранников), среднее значение качества элементов примерно составило 0,65 (0,9 в области тонких перемычек).

Анализ результатов исследования собственных резонансных частот

Для резонатора ВТГ рабочей служит частота второй моды собственных колебаний, от ее правильного выбора зависит получаемая добротность резонатора, а соответственно точностные характеристики прибора. Математическое моделирование позволило с высокой точностью подобрать данную частоту, что сокращает время на ее подбор экспериментальным путем на рабочем макете. В результате расчета (рис. 5) рабочая частота резонатора ВТГ составила 2275,7 Гц, что значительно отличается от используемой в существующем макетном образце рабочей частоты, равной 2400 Гц.



Рис. 5. Деформации резонатора волнового твердотельного гироскопа при колебаниях на рабочей частоте

Расчет собственных резонансных частот маятника КМА (поиск производился в диапазоне 0–2000 Гц) выявил 4 моды колебаний с частотами: 8, 63,6, 186,8 и 457,8 Гц. Форма колебаний при первых двух частотах соответствует угловой модели движений маятника [11]. Колебания с третьей частотой не представляют интереса, так как могут проявляться только при специфических внешних воздействиях, о которых в данной работе говорить не будет. Наибольший интерес вызывает четвертая мода колебаний, так как ее форма перемещений не соответствует ни одной из используемых нами математических моделей движения маятника.

Анализ результатов исследования в частотной области

Исследование в частотной области проведено для маятника КМА со следующими входными воздействиями по оси чувствительности: амплитуда ускорений 1 g, частота от 20 до 1000 Гц с шагом 5 Гц. После анализа результатов (рис. 6) сделаны следующие выводы: в диапазоне от 20 до 200 Гц перемещение маятника соответствует угловой модели движения (1), в диапазоне от 800 и более Гц описание перемещения близко к плоскопараллельной модели движения (2). В диапазоне частот от 200 до 800 Гц форма движений маятника не соответствует ни одной из используемых моделей движения маятника.

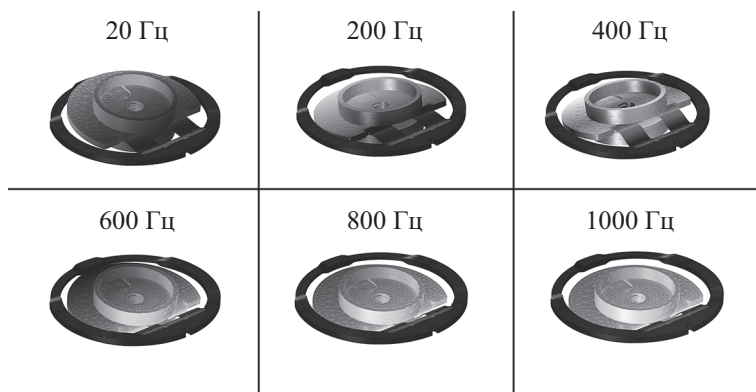


Рис. 6. Деформация маятника акселерометра при входных воздействиях с разной частотой

Анализ результатов исследования во временной области

Исследование во временной области для маятника КМА проведено при задании следующих входных воздействий по оси чувствительности прибора: амплитуда ускорения синусоидальная от 0 до 1 g, частота 500 Гц. Было получено, что описание формы колебаний маятника также не соответствует используемыми математическими моделями движений маятника (1) и (2).

Применение результатов исследований

Результаты исследования собственных резонансных частот колебаний резонатора ВТГ позволили получить точное значение его рабочей частоты, равное 2275,7 Гц, что, в свою очередь, позволило дать рекомендацию по уточнению этой частоты в действующем макетном образце и продолжить исследования, уточняя и дополняя модель в соответствии с результатами экспериментальных работ.

Исследования маятника показали, что ни одна из используемых математических моделей не может в полной мере описать движения маятника при различных воздействиях и требуют уточнения. В свою очередь стало очевидно, что дальнейшие работы по минимизации ошибок измерения при воздействии различных видов вибраций будут связаны не только с уточнением существующих математических моделей, но и с поиском новых подходов к описанию движения маятника. Следующим этапом моделирования маятника КМА станет добавление обратной связи, что даст более глубокое понимание процессов, проходящих в чувствительном элементе при работе прибора.

Заключение

Показано, что использование возможностей программных комплексов, реализующих 3D-модели приборов, позволяет эффективно решить следующие задачи:

- 1) сформировать высокоточную математическую модель чувствительных элементов кварцевого маятникового акселерометра и волнового твердотельного гироскопа, уточнить собственные частоты их колебаний;
- 2) скорректировать управляющие алгоритмы, соединив полученную модель в программной среде MATLAB с цифровой системой управления и компенсационными алгоритмами, прошиваемыми в контуре управления на базе встроенных микроконтроллеров каждого из приборов;
- 3) скорректировать математические модели, сравнив результаты эксперимента на макетном образце каждого из приборов с результатами компьютерного моделирования;
- 4) приступить к уточнению алгоритмов формирования штатной информации в бесплатформенной инерциальной навигационной системе и кватернионных алгоритмов управления, добившись полного соответствия математического моделирования инерциального чувствительного элемента и макетного образца;
- 5) выполнить отладку бесплатформенной инерциальной навигационной системы в целом.

В настоящее время на производственном объединении «Корпус» (г. Саратов) разработан кварцевый маятниковый акселерометр с цифровой системой управления для шестисносного блока измерителей линейного ускорения космических кораблей «Союз-МС» [10] и «Прогресс-МС». Прибор прошел все виды наземных проверок, подтвердил свои технические характеристики и ныне находится на испытаниях в составе системы управления космического корабля «Союз-МС» в ракетно-космической корпорации «Энергия» (г. Королев). Производится уточнение модели кварцевой пластины с целью коррекции управляющих алгоритмов в цифровой системе управления для компенсации вибрационных погрешностей для объектов наземного и авиационного применения, что позволит расширить сферу применения кварцевого маятникового акселерометра с цифровой системой управления только за счет формирования корректирующих алгоритмов программным способом.

Литература

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. 280 с.
2. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992. 280 с.
3. Бранец В.Н. Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: МФТИ, 2009. 302 с.
4. Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Гнусарев Д.С. Перспективы развития БИНС на современных типах гироскопов и акселерометров в ракетно-космической технике // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации». Саратов, 2019. С. 26–51.
5. Мельников В.Е. Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
6. Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф. и др. Термo-инвариантный измеритель линейного ускорения. Патент РФ №2528119. Бюл. 2017. № 25.
7. Скоробогатов В.В., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Гребенников В.И. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового широкодиапазонного акселерометра компенсационного типа. Патент РФ №2627970. Бюл. 2017. № 23.

References

1. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Basics of Constructing Strapdown Inertial Navigation Systems*. St. Petersburg, ОАО Kontsern TsNII Elektropribor Publ., 2009, 280 p. (in Russian)
2. Branets V.N., Shmyglevskii I.P. *Introduction to the Theory of Strapdown Inertial Navigation Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1992, 280 p. (in Russian)
3. Branets V.N. *Lectures on the Theory of Strapdown Inertial Navigation Systems*. Moscow, MFTI Publ., 2009, 302 p. (in Russian)
4. Kalikhman D.M., Deputatova E.A., Skorobogatov V.V., Gnusarev D.S. Prospects for the SINS development on modern types of gyroscopes and accelerometers in space technology. *Proc. 7th Int. Conf. on Problems of Control, Information Processing and Transmission*. Saratov, Russia, 2019, pp. 26–51.
5. Mel'nikov V.E. *Quartz Glass based Electromechanical Converters*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 160 p. (in Russian)
6. Kalikhman L.Ya., Kalikhman D.M., Nakhov S.F. et al. Thermal Invariant Meter of Linear Acceleration. *Patent RU2528119*, 2017.
7. Skorobogatov V.V., Kalikhman L.Ya., Kalikhman D.M., Nakhov S.F., Grebennikov V.I. Method for Providing Scale Coefficient Linearity of Pendulum Wide-Range Accelerometer of Compensatory Type. *Patent RU2627970*, 2017.

8. Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Скоробогатов В.В., Самитов Р.М., Кожевников В.Е., Поздняков В.М. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового акселерометра компенсационного типа. Патент РФ №2626071. Бюл. 2017. № 21.
9. Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Скоробогатов В.В., Смирнов Е.С. Способ обеспечения виброустойчивости маятникового акселерометра линейных ускорений с цифровой обратной связью и виброустойчивый маятниковый акселерометр. Патент РФ №2615221. Бюл. 2017. № 10.
10. Скоробогатов В.В. Основы разработки безобогревных термоинвариантных измерителей угловых скоростей и кажущихся ускорений для систем управления ракетно-космическими объектами: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2018.
11. Депутатова Е.А., Гребенников В.И., Калихман Д.М., Скоробогатов В.В., Чибирев А.С. Математическая модель чувствительного элемента кварцевого маятникового акселерометра // Сборник трудов V Международной юбилейной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации». Саратов, 2017. С. 54–61.
12. Депутатова Е.А., Гнусарев Д.С., Калихман Д.М. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1091–1098. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098
13. Негри С., Лаббар Э., Линьон К., Брунштейн Э., Салаён Э. Новое поколение инерциальных навигационных систем на основе ВТГ для аппаратов, обеспечивающих запуск спутников // Гироскопия и навигация. 2016. № 1(92). С. 49–59.
14. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 126 с.
15. Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4. С. 24–34.
16. Schmidt G.T. INS/GPS technology trends, advances in navigation sensors and integration technology // RTO Lecture. 2004. N 232. P. 11.
17. Barbour N.M. Inertial navigation sensors, advances in navigation sensors and integration technology // RTO Lecture. 2004. N 232. P. 7.
18. Delhayе F., Girault J.P. HRG technological breakthrough for advanced space launcher inertial reference system // Proc. 25th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2018. P. 267–271.
19. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
20. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2015. 316 с.
8. Grebennikov V.I., Kalikhman L.Ya., Kalikhman D.M., Nakhov S.F., Skorobogatov V.V., Samitov R.M., Kozhevnikov V.E., Pozdnyakov V.M. Method for Providing Linearity of Pendulous Accelerometer Scale Coefficient of Compensatory Type. *Patent RU2626071*, 2017.
9. Grebennikov V.I., Kalikhman L.Ya., Kalikhman D.M., Nakhov S.F., Skorobogatov V.V., Smirnov E.S. Method for Providing Vibration Resistance of Pendulum Accelerometer of Linear Accelerations with Digital Feedback and Vibration Pendulum Accelerometer. *Patent RU2615221*, 2017.
10. Skorobogatov V.V. *Basics of development of heat-free thermo-invariant angular velocity meaters and seemingly accelerated for control systems of rocket-space objects*. Dis. PhD Eng. Sci. Saratov, Russia, 2018.
11. Deputatova E.A., Grebennikov V.I., Kalikhman D.M., Skorobogatov V.V., Chibirev A.S. Mathematical model of a sensitive element of quartz pendulum accelerometer. *Proc. 5th Int. Conf. on Problems of Control, Information Processing and Transmission*. Saratov, Russia, 2017, pp. 54–61. (in Russian)
12. Deputatova E.A., Gnsarev D.S., Kalikhman D.M. Analysis of noise components in quartz pendulum accelerometer with digital feedback amplifier. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1091–1098 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1091-1098
13. Negri C., Labarre E., Lignon C., Brunstein E., Salaün E. A new generation of IRS with innovative architecture based on HRG for satellite launch vehicles. *Gyroscoy and Navigation*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 223–230. doi: 10.1134/S2075108716030135
14. Zhuravlev V.F., Klimov D.M. *A Wave Solid-State Gyroscope*. Moscow, Nauka Publ., 1985, 126 p. (in Russian)
15. Jeanroy A., Bouvet A., Remillieux G. HRG and marine applications. *Gyroscoy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 67–74. doi: 10.1134/s2075108714020047
16. Schmidt G.T. INS/GPS technology trends, advances in navigation sensors and integration technology. *RTO Lecture*, 2004, no. 232, p. 11.
17. Barbour N.M. Inertial navigation sensors, advances in navigation sensors and integration technology. *RTO Lecture*, 2004, no. 232, p. 7.
18. Delhayе F., Girault J.P. HRG technological breakthrough for advanced space launcher inertial reference system. *Proc. 25th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, 2018, pp. 267–271.
19. Raspopov V.Ya. *Micromechanical Devices*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 400 p. (in Russian)
20. Luk'yanov D.P., Raspopov V.Ya., Filatov Yu.V. *Applied Theory of Gyros*. St. Petersburg, OAO Kontsern TsNII Elektropribor Publ., 2015, 316 p. (in Russian)

Авторы

Гнусарев Дмитрий Сергеевич — инженер-электроник, Филиал ФГУП «НПЦАП» — «ПО «Корпус» Саратов, 410010, Российская Федерация, Scopus ID: 57195506586, ORCID ID: 0000-0001-7112-0622, men4eg@outlook.com

Скоробогатов Вячеслав Владимирович — кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник, Филиал ФГУП «НПЦАП» — «ПО «Корпус» Саратов, 410010, Российская Федерация, Scopus ID: 56395146100, ORCID ID: 0000-0001-9755-4066, vvskorobogatov@yandex.ru

Депутатова Екатерина Александровна — кандидат технических наук, ведущий инженер-программист, Филиал ФГУП «НПЦАП» — «ПО «Корпус» Саратов, 410010, Российская Федерация, Scopus ID: 37087025100, ORCID ID: 0000-0001-8870-8107, deputatova@bk.ru

Authors

Dmitry S. Gnsarev — Electronic engineer, Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” — Production Association “Korpus”, Saratov, 410010, Russian Federation, Scopus ID: 57195506586, ORCID ID: 0000-0001-7112-0622, men4eg@outlook.com

Vyacheslav V. Skorobogatov — PhD, Leading electronic engineer, Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” — Production Association “Korpus”, Saratov, 410010, Russian Federation, Scopus ID: 56395146100, ORCID ID: 0000-0001-9755-4066, vvskorobogatov@yandex.ru

Ekaterina A. Deputatova — PhD, Leading software engineer, Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” — Production Association “Korpus”, Saratov, 410010, Russian Federation, Scopus ID: 37087025100, ORCID ID: 0000-0001-8870-8107, deputatova@bk.ru