

# НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.383

## МИНИАТЮРНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ГИРОСКОПЫ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М.А. Басараб<sup>1</sup>, Б.С. Лунин<sup>2</sup>, В.А. Матвеев<sup>1</sup>,  
А.В. Фомичев<sup>1</sup>, Е.А. Чуманкин<sup>3</sup> А.В. Юрин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: a.v.fomichev@bmstu.ru

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>ОАО “АНПП “ТЕМП-АВИА”, г. Арзамас, Нижегородская обл.,  
Российская Федерация  
e-mail: bmic@mail.ru

*Рассмотрены перспективы использования в составе системы управления мало-размерного космического аппарата интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы на миниатюрных волновых твердотельных гироскопах. Приведены результаты теоретической и практической разработки волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором. Основное внимание уделено проблемам создания высокودобротных металлических резонаторов. Проведено исследование влияния конструктивных элементов резонатора на его технические параметры, представлены результаты моделирования, выявлена зависимость технических параметров резонатора от геометрии его конструктивных элементов, а также от свойств материала, из которого он будет изготавливаться.*

**Ключевые слова:** волновой твердотельный гироскоп, металлический резонатор, добротность резонатора, термоупругие потери, конечно-элементное моделирование, малый космический аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, система управления.

## MINIATURE GYROSCOPE BASED ON ELASTIC WAVES IN SOLIDS FOR SMALL SPACECRAFT

М.А. Basarab<sup>1</sup>, B.S. Lunin<sup>2</sup>, V.A. Matveev<sup>1</sup>,  
A.V. Fomichev<sup>1</sup>, E.A. Chumankin<sup>3</sup> A.V. Yurin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: a.v.fomichev@bmstu.ru

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>ОАО “Arzamasskoe nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie (ANPP) “ТЕМП-АВИА”, Arzamas, Nizhny Novgorod region, Russian Federation  
e-mail: bmic@mail.ru

*The prospects of using small spacecraft of integrated platformless inertial navigation system as a part of control system using a miniature gyroscope based on elastic waves in solids are discussed. The results of the theoretical and practical development of gyroscope based on elastic waves in solids with metallic resonator are given. The main attention is paid to the problems of creation of metal resonators with high-quality Q-factor. The influence of the structural elements of the resonator on its*

*technical parameters is studied. Simulation results are presented. The correlation of the technical parameters of the resonator from the geometry of its structural elements, as well as from properties of the material from which it will be made, is revealed.*

**Keywords:** gyroscope based on elastic waves in solids, metal resonator, Q-factor, thermoelastic loss, finite element modeling, small spacecraft, strapdown inertial navigation system, control system.

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание малогабаритной интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) для малоразмерных космических аппаратов (МКА).

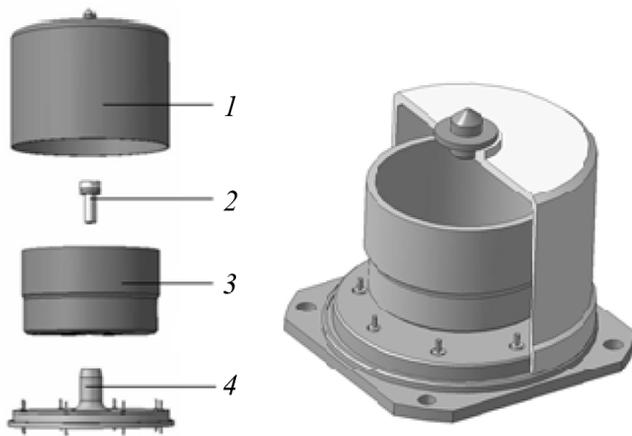
При создании систем управления перспективных МКА существенно повышаются требования к таким показателям, как точность, автономность, универсальность, надежность, помехозащищенность, габаритно-массовые характеристики, энергопотребление, эксплуатационные расходы и др.

В связи с этим существенное значение имеет создание перспективных систем навигации и ориентации, как одного из основных элементов систем управления МКА. Отечественные системы навигации и ориентации существующих космических аппаратов уступают наиболее совершенным зарубежным аналогам по точности определения навигационных параметров, массе, энергопотреблению и ресурсу аппаратуры. В условиях широкого внедрения бортовых средств вычислительной техники и информационных технологий все большую актуальность приобретает проблема повышения точности и ресурсных характеристик БИНС для управления параметрами движения МКА.

В качестве возможного перспективного чувствительного элемента БИНС рассматриваются и волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), разработкой и исследованием которых занимаются как зарубежные фирмы, например, Northrop Grumman (США), Marconi (Великобритания), InnaLabs (Великобритания), Badin-Crouzet (Франция), так и российские (РПКБ, НПП “Медикон”, ОАО “АНПП “ТЕМП-АВИА” и др.).

В отличие от других типов гироскопов ВТГ устойчивы к воздействиям вибрационных и ударных нагрузок, отличаются высокой радиационной стойкостью, а также не имеют вращающихся, оптических, лазерных и микромеханических элементов. К достоинствам ВТГ следует отнести малое энергопотребление и высокую стабильность механических характеристик, обуславливающих его высокую конкурентоспособность по отношению к другим измерителям угловой скорости.

К недостаткам, затрудняющим применение ВТГ в БИНС подвижных объектов, можно отнести следующие: сложность (функционирование ВТГ обеспечивают несколько электронных систем), меньший диапазон измерений (по сравнению с оптическими гироскопами), а самое главное, чувствительность ВТГ к качеству резонатора. Полусферический высокодобротный резонатор (обычно из кварцевого стекла),



**Рис. 1. Конструкция ВТГ фирмы Innalabs, Ltd.:**

*1* — корпус; *2* — крепежный винт; *3* — резонатор; *4* — основание

характеристики которого и определяют параметры гироскопа, — наиболее технологически сложная и дорогая деталь ВТГ.

При разработке ВТГ в ближайшие годы, по имеющимся данным, основное внимание будет уделяться уменьшению габаритных размеров, повышению добротности материала резонатора и упрощению схемы управления и съема информации.

В настоящее время в ОАО “АНПП “ТЕМП-АВИА” и МГТУ им. Н.Э. Баумана ведется совместная разработка ВТГ с цилиндрическим резонатором. Аналогом разрабатываемого ВТГ служит прибор с металлическим резонатором фирмы Innalabs, Ltd., показанный на рис. 1.

Резонатор выполнен в виде цилиндра, на дно которого приклеены пьезокерамические элементы, используемые как для возбуждения, так и для измерения колебаний.

Материал резонатора — NiCrTi-сплав с низким коэффициентом линейного теплового расширения.

Резонатор *3* диаметром 17...43 мм крепят на основании *4* винтом *2* и устанавливают собранный чувствительный элемент в корпус *1*. Добротность резонатора составляет  $(1...1,5) \cdot 10^4$ . Электронный блок управления собран на плате размером 45×45 мм и работает в режиме “быстрого времени”, т.е. подавление в узлах синфазных и квадратурных колебаний осуществляется путем подачи противофазных переменных напряжений на соответствующие пьезоэлементы; ВТГ работоспособен при температуре от -40 до +75°C. Предполагаемая скорость случайного дрейфа ~1 град/ч (модель-аналог Innalabs-ВТГ INL-CVG-GU200).

Фирма Innalabs и группа компаний “Ангстрем” выпускают линейку ВТГ: одноосевые, двухосевые, с аналоговым или цифровым выходом,



Рис. 2. Общий вид и резонатор ВТГ

а также в бескорпусном варианте. На рис. 2 показан общий вид ВТГ (слева) и его резонатор (справа). Данный чувствительный элемент (ЧЭ) используется во всех модификациях ВТГ.

Выделим три основных направления повышения точностных характеристик интегрированной малогабаритной БИНС в составе современной системы управления:

1. Отработка научно-технических и технологических проблем проектирования чувствительных элементов. Ряд аспектов, отражающих данное направление, будет описан в настоящей статье.

2. Исследование принципов взаимодействия элементов навигационной системы в системе управления космического аппарата и отработка схем совместной обработки информации с внешними измерителями. Данное направление представлено в работе [1].

3. Исследование погрешностей измерителей. Знание конкретных параметров и структуры погрешностей дает возможность использовать алгоритмические способы их компенсации и тем самым существенно повысить точность измерителей без ужесточения их исходных характеристик. Способам и методам решения данной проблемы будет посвящена отдельная статья.

**Моделирование термоупругого напряженного состояния резонатора ВТГ и процессы внутреннего трения в металлическом резонаторе.** Резонатор является основным элементом любого ВТГ. Его характеристики (и их стабильность) в конечном счете определяют параметры гироскопа в целом. Основными характеристиками резонатора являются добротность  $Q$  и расщепление собственной частоты  $\Delta f$ :

$$Q = \frac{2\pi W_0}{\Delta W} = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega},$$

где  $W_0$  — энергия, запасенная в колебательной системе;  $\Delta W$  — потеря энергии за период;  $\omega_0$  — собственная угловая частота;  $\delta$  — коэффициент затухания;  $\Delta\omega$  — ширина амплитудной резонансной кривой по уровню  $1/\sqrt{2}$ .

Расщепление собственной частоты возникает из-за несимметрии упруго-массовых свойств резонатора и равно разности собственных частот резонатора.

Для улучшения качества резонатора необходимо учитывать те аспекты, которые вызывают затухания и шумы в колебательной системе. Рассмотрим термоупругое внутреннее трение, которое оказывает существенное влияние на добротность резонатора.

Термоупругое внутреннее трение связано с возникновением тепловых потоков в материале при его периодической деформации [2–5]. Изменение объема тела при расширении или сжатии под действием напряжения требует совершения некоторой работы ( $W$ ), которая для моля вещества равна разности теплоемкостей при постоянном давлении ( $C_p$ ) и постоянном объеме ( $C_v$ ), и которая может быть выражена через коэффициент линейного теплового расширения ( $\alpha$ ), молярный объем вещества  $V$  и модуль Юнга  $E$  [6]:

$$W = C_p - C_v = 9\alpha^2 T_0 E V. \quad (1)$$

При деформировании твердого тела локальная температура в различных его точках зависит от локальной деформации среды и между “горячими” и “холодными” зонами будут возникать тепловые потоки, интенсивность которых определяется теплопроводностью среды. Эти потоки выравнивают локальные температуры тела и приводят к необратимому превращению механической энергии в тепловую.

Для расчета термоупругого внутреннего трения  $Q^{-1}$  предложены следующие формулы [5]:

$$Q^{-1} \approx \Delta \frac{\omega \bar{\tau}}{1 + (\omega \bar{\tau})^2}; \quad \Delta = E T_0 \frac{\alpha}{C_p}; \quad \bar{\tau} \approx \frac{d^2}{\varsigma}, \quad (2)$$

где  $\varsigma$  — коэффициент температуропроводности;  $d$  — расстояние, которое должен пройти тепловой поток;  $\omega$  — круговая частота колебаний.

В работе [5] эти параметры рассчитаны для ряда металлов, причем результаты довольно хорошо совпадают с экспериментальными данными. Отметим, что в кварцевых резонаторах термоупругие потери тоже есть, но они крайне малы ввиду малого коэффициента температуропроводности кварцевого стекла.

Для моделирования термоупругого напряженного состояния в резонаторе необходимо решить связанную задачу термоупругости [7–11]. В общем случае постановка задачи заключается в следующем. Необходимо при заданных механических и тепловых воздействиях определить шестнадцать функций координат и времени: шесть компонент тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ , шесть компонент тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$ , три компоненты вектора перемещений  $u_i$  и температуру  $T$ , удовлетворяющих трем уравнениям движения, шести соотношениям между напряжениями и деформациями, шести соотношениям между

деформациями и перемещениями и уравнению теплопроводности при определенных начальных и граничных условиях.

Соотношение между напряжениями и деформациями имеет вид [10]

$$\sigma = \mathbf{D}\epsilon_{el} = D(\epsilon - \epsilon_{th}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{D}$  —  $6 \times 6$  тензор модулей упругости;  $\epsilon_{el}$ ,  $\epsilon_{th}$  — векторы упругих и температурных деформации;  $\sigma$  — вектор напряжений.

В случае изотропного тела (3) можно представить в виде [10, 11]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x - \alpha(T - T_0) \\ \epsilon_y - \alpha(T - T_0) \\ \epsilon_z - \alpha(T - T_0) \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $T$  — температура при изменении напряженно-деформированного состояния;  $T_0$  — температура при отсутствии напряженно-деформированного состояния.

Для определения температуры рассмотрим уравнение теплового баланса

$$T \frac{\partial S}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = 0, \quad (5)$$

где  $k$  — теплоемкость,  $S$  — энтропия.

В случае термоупругого тела, энтропия  $S$  в единице объема определяется с помощью формулы

$$S = \rho C_p \ln(T/T_0) + S_{el},$$

где  $\rho C_p$  — объемная теплоемкость, а составляющую  $S_{el}$  для изотропных материалов можно представить в виде

$$S_{el} = \alpha(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

Для малых приращений деформаций и температуры уравнение (5) перепишем следующим образом

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + T_0 \frac{\partial S_{el}}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = 0.$$

В случае гармонического разложения  $T = T(x_i) \exp(j\omega t)$  это уравнение принимает вид

$$-\nabla(k \nabla T) = Q_{heat},$$

где тепловой источник равен  $Q_{heat} = -j\omega(\rho C_p T + T_0 S_{el})$ .

Основываясь на приведенных данных и [12–14], можно определить добротность резонатора  $Q$  при термоупругих потерях (а значит, и интенсивность внутреннего трения  $Q^{-1}$ ) на резонансных частотах  $f$ . Для этого решается связанная задача на собственные значения термоупругости. Собственное значение представляет собой комплексную величину  $(-\lambda) = \delta + j\omega$ , которая однозначно определяет резонансную частоту колебаний  $\omega$  и коэффициент затухания  $\delta$ . Каждому собственному значению соответствует свое гармоническое поле перемещений  $u$ . Запишем соотношение для нахождения добротности резонатора  $Q$  на резонансной частоте  $f$  в виде

$$Q = \frac{\text{Im}(\lambda)}{2 \text{Re}(\lambda)}, \quad \delta = \text{Re}(\lambda), \quad (6)$$

$$f = \left| \frac{\text{Im}(\lambda)}{2\pi} \right|.$$

Расчеты на персональном компьютере (ПК) выполнялись в среде программирования *COMSOL*. *COMSOL Multiphysics* — это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (ДУЧП) методом конечных элементов. Программа позволяет изменять типы анализа, включая стационарный и переходный анализ; линейный и нелинейный анализ; анализ собственных частот.

Для решения ДУЧП *COMSOL Multiphysics* использует метод конечных элементов (МКЭ). Программное обеспечение запускает конечно-элементный анализ вместе с сеткой, учитывающей геометрическую конфигурацию тел, и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Поскольку многие физические законы выражаются в форме ДУЧП, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики, таких как акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрация, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства и многих других.

Взаимодействие с программой возможно стандартным способом — через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script или языке MATLAB. В настоящей работе использовался способ взаимодействия через графический интерфейс.

Для оценки надежности расчетов в среде COMSOL сравнивались результаты работы реального образца резонатора на рабочем месте с расчетными значениями. За основу была выбрана конструкция резонатора, представленная на рис. 3. Основные размеры резонатора:  $D_1 = 22,7$  мм;  $D_2 = 25,4$  мм;  $D_3 = 23,6$  мм;  $D_4 = 4$  мм;  $L_1 = 11$  мм;  $L_2 = 19$  мм;  $H = 0,45$  мм. Измеренная в нормальных условиях рабочая частота резонатора составляла 7524 Гц.

При конечно-элементном моделировании данной конструкции резонатора в среде COMSOL задавались следующие условия: резонатор закреплен; марка материала сплав Д16Т; физические свойства материала: плотность  $2800 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент Пуассона 0,33; модуль Юнга  $0,72 \cdot 10^{11}$  Па.

Конечно-элементная сетка задавалась с учетом конструктивных особенностей резонатора (рис. 4).

Вид основных форм колебаний показан на рис. 5. Рассчитанные собственные частоты конструкции составили: 1608,732 Гц, 1608,732 Гц, 7461,554 Гц, 7463,037 Гц, 20409,342 Гц, 20423,981 Гц. Погрешность расчетных данных по сравнению с рабочим образцом составляет  $\sim 1\%$ , что говорит о возможности практического применения расчетов, выполненных в среде COMSOL.

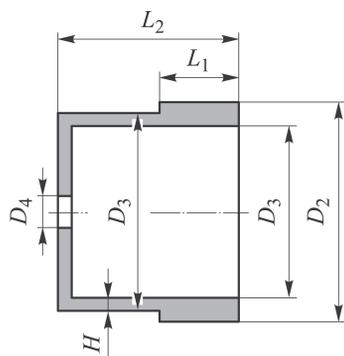


Рис. 3. Конструкция цилиндрического резонатора ВТГ

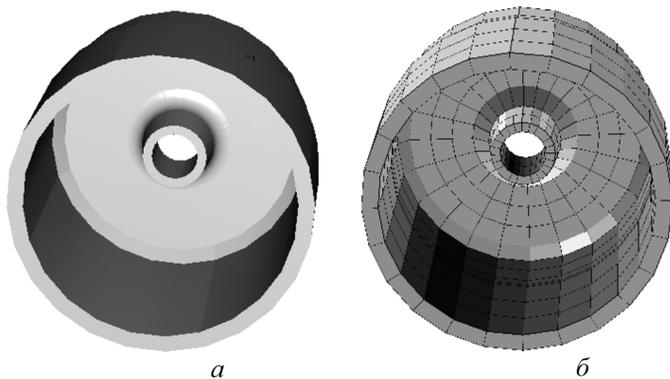
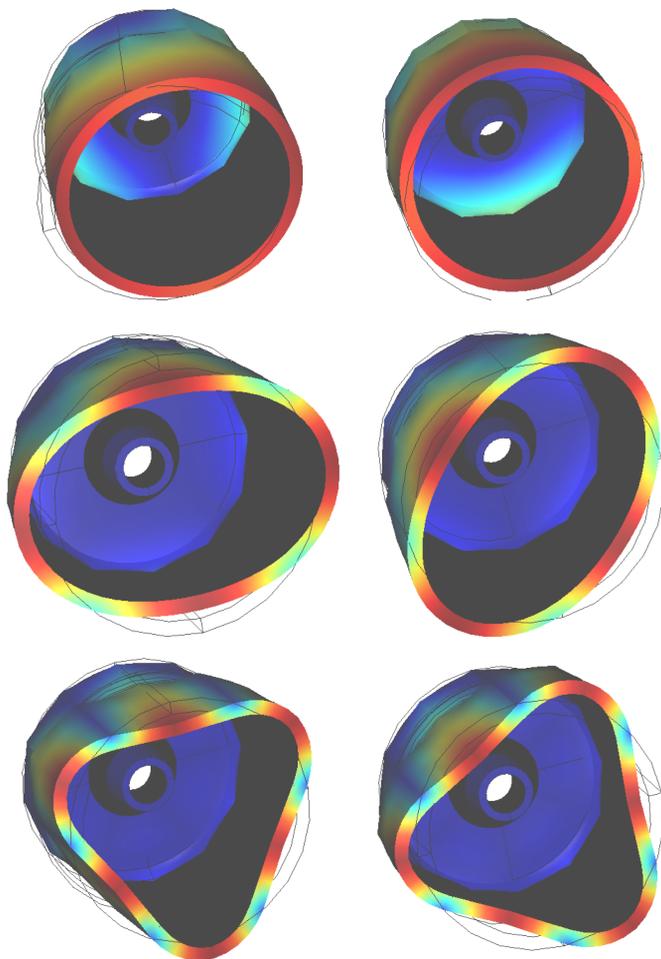


Рис. 4. Трехмерная модель резонатора ВТГ (а) и конечно-элементная аппроксимация его геометрии (б)



**Рис. 5. Вид основных форм колебаний резонатора ТВГ**

При этом выявлено наличие дополнительных мод колебаний, что предполагает необходимость применения в блоке управления резонатора узкополосных высокочастотных фильтров.

**Конечно-элементное моделирование термоупругих процессов в резонаторе ВТГ.** Для проведения численного эксперимента использована конструкция резонатора, показанная на рис. 3. Основные размеры резонатора:  $D_1 = 41$  мм;  $D_2 = 46$  мм;  $D_3 = 42$  мм;  $D_4 = 3$  мм;  $L_1 = 13$  мм;  $L_2 = 24$  мм;  $H = 0,5$  мм.

При моделировании приняты следующие допущения: резонатор закреплен через донное отверстие, находится в теплоизолированной среде и теплообмен с внешней средой через донное отверстие отсутствует.

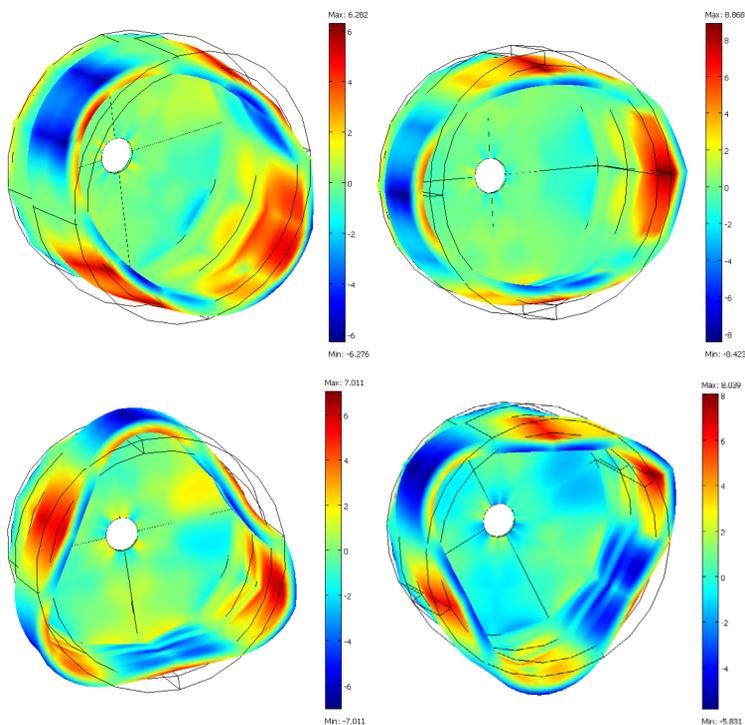
Для выяснения возможностей использования Д16Т в качестве материала для резонатора был проведен расчет характеристик резонатора с учетом следующих физических свойств: плотность  $2800$  кг/м<sup>3</sup>; коэф-

коэффициент Пуассона 0,33; модуль Юнга  $0,72 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент линейного расширения  $22,9 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности  $875 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ; удельная теплоемкость  $193 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ .

На основе моделирования были получены картины распределения температурного поля в материале для основных форм колебания резонатора (рис. 6). При решении связанной задачи термоупругости на собственные значения полученные результаты (собственные функции) нормализуются, и значение температуры носит информационный характер.

Согласно полученным данным (см. рис. 6) при деформации резонатора локальная температура в различных точках зависит от локальной деформации. Характер изменения температуры (“горячие” и “холодные” зоны) имеет соответствующую окраску. Как следует из рис. 6, необратимому процессу превращения механической энергии в тепловую наиболее подвержено рабочее кольцо резонатора. Этот элемент конструкции испытывает наибольшие механические и температурные нагрузки.

Расчет основных характеристик резонатора [12–14] проводился на основе формулы (6).



**Рис. 6.** Распределение температурного поля при возникновении внутреннего трения в материале на основных формах колебаний резонатора, изготовленного из Д16Т

Основные характеристики резонатора [12–14] рассчитывались на основе формулы (6).

1. Вторая форма колебаний:

$$f_1 = 3264,18 \text{ Гц}, \quad Q_1 = 26662; \quad f_2 = 3269,75 \text{ Гц}, \quad Q_2 = 26713.$$

$$\Delta f = f_1 - f_2 = -5,6 \text{ Гц}; \quad \Delta Q = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 + Q_1} = \pm 0,10 \text{ \%}.$$

2. Третья форма колебаний:  $f_1 = 7583,15 \text{ Гц}$ ,  $f_2 = 7577,47 \text{ Гц}$ .

Рассматриваемые параметры измерялись в эксперименте. При определении резонансных частот и добротности резонатор подвешивался, либо закреплялся с помощью сквозной ножки, пропущенной через донное отверстие. Полученные экспериментальные данные подтвердили результаты численного моделирования. При закреплении резонатора за ножку добротность уменьшалась на  $\sim 4\%$ , что, по-видимому, связано с небольшим массовым дисбалансом оболочки.

Результаты измерений по второй форме колебаний (данные приведены при измерениях по собственным осям):  $f_1 = 3246,02 \text{ Гц}$ ,  $Q_1 = 27500$ ;  $f_2 = 3242,82 \text{ Гц}$ ,  $Q_2 = 27800$ ;

$$\Delta f = 3,2 \text{ Гц}; \quad \Delta Q = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 + Q_1} = \pm 0,54 \text{ \%}.$$

Результаты измерений по третьей форме колебаний:  $f = 7600 \text{ Гц}$ .

Материал резонаторов, как правило, имеет напряженные зоны и со временем его структура релаксирует. Возможность релаксации структуры алюминиевых сплавов была отмечена еще Бордони [15], что приводит к существенным изменениям параметров.

В качестве примера можно привести следующий экспериментальный результат. В 1988 г. был изготовлен резонатор из алюминиевого сплава Д16Т и при испытаниях (в 1988 г.) он показал следующие характеристики.

Вторая форма колебаний:  $f = 3305 \text{ Гц}$ ,  $Q = 87\,000$ .

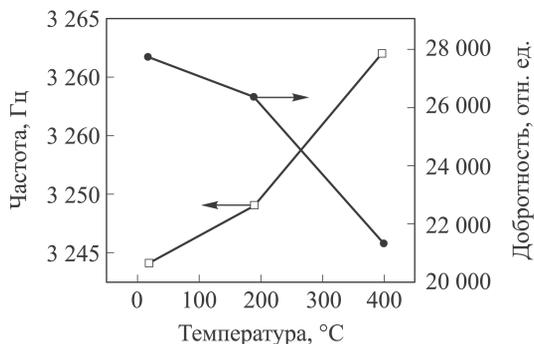
Третья форма колебаний:  $f = 7700 \text{ Гц}$ ,  $Q = 158\,000$ .

Тот же самый резонатор был вновь измерен в 2006 г. и его характеристики оказались следующими.

Вторая форма колебаний:  $f = 3199 \text{ Гц}$ ,  $Q = 94\,400$ .

Третья форма колебаний:  $f = 7572 \text{ Гц}$ ,  $Q = 145\,000$ .

Эти результаты показывают, что уход частоты при старении резонатора может быть весьма значительным. Для снятия исходных механических напряжений резонатор можно термообрабатывать. Для выяснения влияния отжига на характеристики резонатора, изготовленного из Д16Т, было проведено три цикла отжига по 1 ч каждый, на воздухе, при температурах 190, 400 и 550 °С. В ходе последнего отжига геометрия резонатора претерпела существенные искажения, поэтому температуру отжига 350...400 °С следует рассматривать как максимально



**Рис. 7. Изменение частоты и добротности резонатора из Д16Т (конструкция — см. рис. 3)**

допустимую. Результаты этого опыта приведены на рис. 7. Видно, что в ходе отжига резонансная частота повысилась, а добротность упала. Эти результаты могут быть объяснены изменением напряжений в материале при отжиге, взаимодействием поверхности резонатора с атмосферными и печными газами при отжиге (в пользу этого предположения говорит тот факт, что поверхность резонатора после отжига при 550 °С потемнела; для исключения взаимодействия с атмосферой целесообразно проводить отжиг в вакууме, или в среде инертного газа, а не на воздухе), а также образованием мелкозернистой структуры алюминиевого сплава [16], приводящей к росту внутреннего трения.

Существует нерешенная пока проблема, связанная с влиянием структуры сплава на добротность: дело в том, что алюминиевые сплавы, как правило, поставляются уплотненные — в виде прутка (тогда существует концентрическая слоистость сшивок), либо в виде плит (с параллельными поверхностями слоями сшивок). Поэтому можно ожидать, что добротность резонатора, вырезанного из плиты, когда его ось симметрии перпендикулярна поверхности плиты, будет отличаться от добротности точно такого же резонатора, вырезанного из той же плиты, но когда ось его симметрии параллельна поверхности плиты или когда такой резонатор сделан из обжатого прутка. Прямых экспериментальных данных на этот счет нет, но лучшие результаты всегда получали для резонаторов, вырезанных из плит перпендикулярно поверхности, тогда резонатор представляет собой многослойный “пирог”, все его слои колеблются одинаково, и межслойное проскальзывание, по-видимому, отсутствует. Стекланные (кварцевые) резонаторы из слоистого стекла (например, типа КУ-1) всегда вырезают именно так, чтобы ось симметрии резонатора совпадала с осью наплава стекла — только в этом случае можно получить высокую добротность. Подобные эффекты могут иметь место и для алюминиевых сплавов и сталей.

Детальное выяснение влияния структуры алюминиевого сплава на добротность требует проведения дополнительных исследований.

Для изготовления резонатора могут быть использованы другие сплавы с низким термическим коэффициентом линейного расширения. Некоторые из них приведены в таблице. Для окончательного выбора материала целесообразно провести математическое моделирование и расчет основных характеристик резонатора для нескольких видов сплавов, а также изготовить резонаторы и провести сравнительные оценки в составе ВТГ.

**Физические свойства некоторых сплавов, пригодных для изготовления резонаторов ВТГ**

Физические свойства	Сплав	
	36Н (инвар)	32НКД (супер инвар)
Плотность	8050 кг/м <sup>3</sup>	8140 кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент Пуассона	0,28	0,23
Модуль Юнга	1,48·10 <sup>11</sup> Па	1,45·10 <sup>11</sup> Па
Коэффициент линейного расширения	1,3·10 <sup>-6</sup> 1/°С	0,63·10 <sup>-6</sup> 1/°С
Коэффициент теплопроводности	515 Вт/(м·°С)	500 Вт/(м·°С)
Удельная теплоемкость	12 Дж/(кг·°С)	10 Дж/(кг·°С)

Помимо сплавов, приведенных в таблице, также можно рекомендовать сплавы 42НХТЮ, 44НХТЮ.

Картины распределения температурного поля в сплавах, приведенных в таблице, для основных форм колебания резонатора показаны на рис. 8, 9. Значения рассчитанных характеристик резонатора приводятся далее.

Расчет основных характеристик для сплава 36Н.

1. Вторая форма колебаний:

$$f_1 = 3713,60 \text{ Гц}, \quad Q_1 = 35200; \quad f_2 = 3715,23 \text{ Гц}, \quad Q_2 = 35337;$$

$$\Delta f = 1,63 \text{ Гц}; \quad \Delta Q = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 + Q_1} = \pm 0,19 \%$$

2. Третья форма колебаний:  $f_1 = 9712,53 \text{ Гц}, \quad f_2 = 9788,14 \text{ Гц}.$

Расчет основных характеристик для сплава 32НКД.

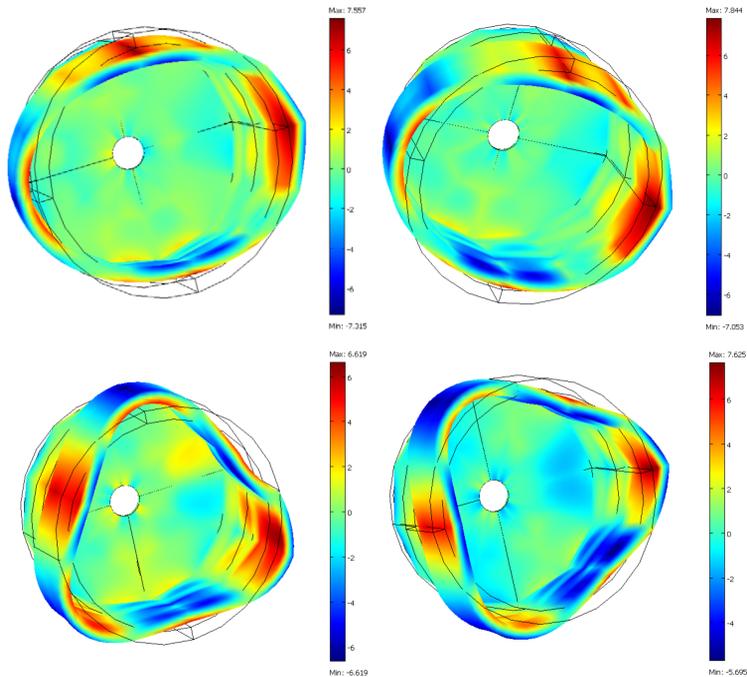
1. Вторая форма колебаний:

$$f_1 = 3676,59 \text{ Гц}, \quad Q_1 = 32539; \quad f_2 = 3677,78 \text{ Гц}, \quad Q_2 = 32575;$$

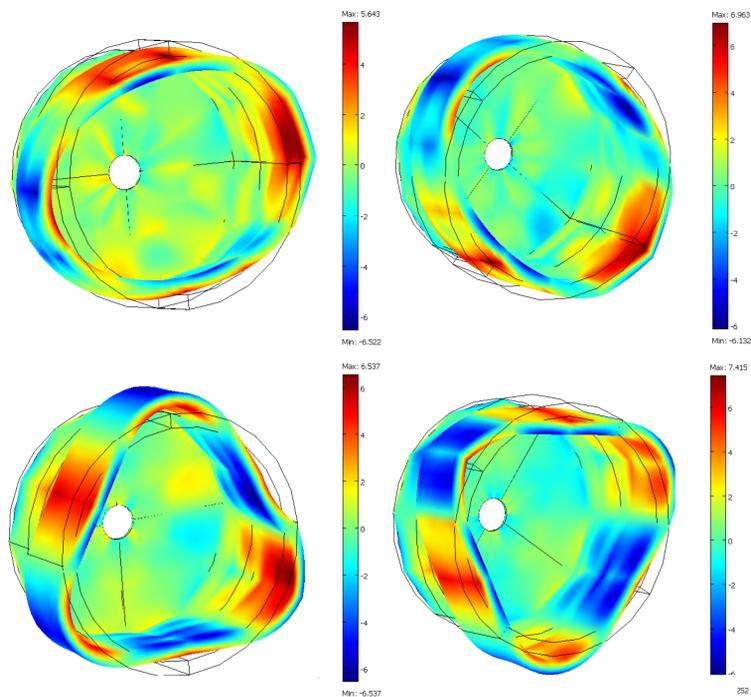
$$\Delta f = 1,19 \text{ Гц}; \quad \Delta Q = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 + Q_1} = \pm 0,06 \%$$

2. Третья форма колебаний:  $f_1 = 9534,53 \text{ Гц}, \quad f_2 = 9606,44 \text{ Гц}.$

**Заключение.** Результаты проведенного исследования показали, что для изготовления резонатора ВТГ могут быть использованы различ-



**Рис. 8. Распределение температурного поля при возникновении внутреннего трения в материале на основных формах колебаний резонатора, изготовленного из сплава 36Н**



**Рис. 9. Распределение температурного поля при возникновении внутреннего трения в материале на основных формах колебаний резонатора, изготовленного из сплава 32HKD**

ные металлические сплавы. Максимальная добротность, как правило, ограничивается термоупругими потерями и достаточна для ВТГ общего применения низкой и средней точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лобусов Е.С., Фомичев А.В. Разработка и исследование алгоритмического обеспечения для основных режимов функционирования бесплатформенной инерциальной системы управления движением и навигации малогабаритного космического аппарата / Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. № 10 (22). 23 с. <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1095.html>
2. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М.: Metallurgiya, 1969. 330 с.
3. Механическая спектроскопия металлических материалов / М.С. Блантер, И.С. Головин, С.А. Головин и др. М.: Международная инженерная академия, 1994. 249 с.
4. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях / М.С. Блантер, Ю.В. Пигузов, Г.М. Ашмарин и др. М.: Metallurgiya, 1991. 248 с.
5. Зинер К. Упругость и неупругость металлов // Вонсовский С.В. Упругость и неупругость металлов. М.: ИЛ, 1954. С. 9–168.
6. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976.
7. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1998. 236 с.
8. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / под общ. ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2001.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
10. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Киев: Наукова думка. 1970. 307 с.
11. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. М.: Мир, 1970.
12. Duwel A., Candler R.N., Kenny T.W., Varghese M. Journal of Microelectromechanical Systems. 2006. Vol. 15. No. 6. P. 1437–1445.
13. Gupta S. Estimation of Thermo-Elastic Dissipation in MEMS, MSc. Thesis, Dept. Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, July 2004.
14. Lifshitz R., Roukes K.L. Thermoelastic Damping in Micro- and Nanomechanical Systems. Physical Review B. Vol. 61. No. 8, 15. Feb. 2000-II.
15. Физическая акустика. Ред.: У. Мэзон. Т. 4А. М.: Мир. 1969.
16. Suzuki T., Tsubono K., Hirakawa H. Quality factor of vibration of aluminum alloy disks // Phys. Lett. 1978. Vol. 67A. No. 1. P. 2–4.

## REFERENCES

- [1] Lobusov E.S., Fomichev A.V. Development and research of algorithmic support for the main modes of for BINS of compact spacecraft. *Jelekt. nauchno-tehn. Izd. "Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Techn. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation" of Bauman MSTU], 2013, no. 10 (22), pp. 1–23. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1095.html> (accessed 19.11. 2013) (in Russ.).
- [2] Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallakh. [The internal friction in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 330 p.
- [3] Blanter M.C., Golovin I.S., Golovin C.A., Il'in A.A., Carrak V.I. Mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskih materialov. [The mechanical spectroscopy of metallic materials] Moscow, Mezhd. inzhernaya akademiya Publ., 1994. 249 p.

- [4] Blanter M.S., Yu.V. Piguzov M.S., Ashmarin G.M. eds. Metod vnutrennego treniya v metallovedcheskikh issledovaniyakh. [The internal friction's method in metallographic research]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 248 p.
- [5] Zener C.M. "Elasticity And Anelasticity Of Metals". USA, Chicago, University of Chicago Press, 1948 (Russ. ed.: Ziner K. Uprugost' i neuprugost' metallov pod redaktsiey Vonsovskogo S.V. Moscow, Inostrannaya Lit. Publ., 1954. 248 p.).
- [6] Kikoin A.K., Kikoin I.K. Kurs obshchey fiziki. Molekulyarnaya fizika. [General physics course. The molecular Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 480 p.
- [7] Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. Dinamika temperaturno-vozmushchennykh giroskopicheskikh priborov i sistem. [Dynamics of temperature-perturbed gyroscopic devices and systems]. Saratov, SGU Publ., 1998. 236 p.
- [8] Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. Matematicheskie modeli teplovogo dreyfa giroskopicheskikh datchikov inertsiyal'nykh sistem (pod obshch. red. akad. RAN V.G.Peshkxonova). [The thermal drift's mathematical models of gyroscopic inertial systems]. SPb., GNTs RF TsNII "Elektropribor" Publ., 2001, 152 p.
- [9] Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. [The theory of Heat Conduction]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1967. 600 p.
- [10] Kovalenko A.D. Osnovy termouprugosti. [Fundamentals of thermoelasticity]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1970. 307 p.
- [11] Nowacki W. Dynamiczne zagadnienia termosprężystości. Warszawa: PAN, 1966. (Russ. ed.: Novatskiy V. Dinamicheskie zadachi termouprugosti. Per. s pol'sk. pod red. Shapiro G.S. Moscow, Mir Publ., 1970. 256 p.).
- [12] Duwel A., Candler R.N., Kenny T.W. and Varghese M. *J. Microelectromechanical Systems*, 2006, vol. 15, no. 6, pp. 1437–1445.
- [13] Gupta S. Estimation of Thermo-Elastic Dissipation in MEMS, MSc. *Thesis, Dept. Mechanical Engineering, Indian Institute of Science*. Bangalore, July 2004.
- [14] Lifshitz R., Roukes K.L. Thermoelastic Damping in Micro- and Nanomechanical Systems. *Physical Review B*, 2000, vol. 61, no. 8, 15. Feb.-II.
- [15] Mason W.P. (ed.) Physical Acoustics, Vol. IV, Part A. New York, Academic Press, 1968. (Russ. ed.: Fizicheskaya akustika. Pod redaktsiey Mezon U. T. 4 A. Moscow, Mir Publ., 1969. 440 p.).
- [16] Suzuki T., Tsubono K., Hirakawa H. Quality factor of vibration of aluminum alloy disks *Phys. Lett.*, 1978, vol. 67A, no. 1, pp. 2–4.

Статья поступила в редакцию 27.02.2014

Михаил Алексеевич Басараб — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 5 монографий и более 100 научных работ в области прикладной математики, информатики, цифровой обработки сигналов, гироскопии, радиофизики.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

M.A. Basarab — Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 5 monographs and more than 100 publications in the fields of applied mathematics, informatics, digital signal processing, gyroscopy and radiophysics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Борис Сергеевич Лунин — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1.

B.S. Lunin — Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of Chemistry faculty of the Lomonosov Moscow State University.

Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russian Federation.

Валерий Александрович Матвеев — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель НУК “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ и 25 патентов в области информатики, систем управления и навигации. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Matveev — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of the Scientific and Educational Complex for Information Technologies and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications and 23 patents in the field of information technologies, systems of control and navigation.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Алексей Викторович Фомичев — канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой “Системы автоматического управления”, первый заместитель декана факультета “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области навигации и систем управления сложными динамическими объектами.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

A.V. Fomichev — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor, deputy head of “Automatic Control Systems” department, First Deputy Dean of the faculty “Informatics and Control Systems” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the fields of navigation and control systems of the complex dynamic objects.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Евгений Алексеевич Чуманкин — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела ОАО “АНПП “ТЕМП-АВИА”. Специалист в области гироскопических систем и навигационных устройств.

ОАО “АНПП “ТЕМП-АВИА”, Российская Федерация, 607920, Нижегородская обл., г. Арзамас, ул. Кирова, д. 26.

E.A. Chumankin — Cand. Sci. (Eng.), deputy head of the department of the ОАО “Arzamasskoe nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie (ANPP) “TEMP-AVIA”. Technicalist in the field of gyroscopic systems and navigation devices.

ОАО “ARPE “TEMP-AVIA”, Kirov ul. 26, Arzamas, Nizhny Novgorod region, 607920 Russian Federation.

Алексей Владимирович Юрин — программист НИС НУК “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 15 научных работ в области математического моделирования и цифровой обработки сигналов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

A.V. Yurin — programmer NIS NUS “Informatics and Control Systems” of Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 scientific publications in the field of mathematical modeling and digital signal processing.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.