

УДК 536.2, 629.5

ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА И ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В СОСТАВЕ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Д.С. Громов^{a, b}

^a Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, dmitrygromov17@gmail.com

^b ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, Россия

Известно, что на точность показаний волоконно-оптического гироскопа большое влияние оказывают температурные возмущения и тепловой режим. В области достижения навигационных точностей тепловые возмущения – одна из основных проблем на настоящее время. Рассмотрение существующих методов снижения температурных влияний на точность показаний бесплатформенной инерциальной навигационной системы на основе волоконно-оптических гироскопов показало, что одних лишь конструктивных и компенсационных методов недостаточно для получения необходимых точностей, и, следовательно, требуется термостабилизация. Предложена реверсивная система термостабилизации, основными исполнительными элементами которой являются термоэлектрические модули, теплоотдача от которых обеспечивается с помощью радиаторов на рабочих поверхностях модулей. Описан и рассмотрен данный вариант обеспечения термостабилизации, выбраны термоэлектрические модули и датчики температуры, рассчитаны геометрические параметры радиаторов для интенсификации теплообмена. Выбраны вентиляторы, обеспечивающие необходимую циркуляцию воздуха в приборе, рассчитана толщина тепловой изоляции. В современном программном обеспечении Autodesk Simulation CFD проведены расчеты тепловых режимов навигационной системы с учетом термостабилизации. Сравнение результатов текущих и ранее выполненных исследований и расчетов показало существенное снижение градиентов температур по поверхностям волоконно-оптических датчиков и большую равномерность температурного поля в приборе в целом. По итогам работы сделаны выводы об эффективности использования метода в целях улучшения точностных характеристик навигационной системы. Обеспечение термостатирования внутреннего объема навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах является обоснованным, при совместном использовании методов алгоритмической компенсации и термостабилизации ожидается достижение требуемых точностей.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, навигация, тепловая защита, термостабилизация, тепловой режим, точность.

THERMAL PROTECTION AND THERMAL STABILIZATION OF FIBER-OPTICAL GYROSCOPE INCLUDED IN STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

D.S. Gromov^{a, b}

^a Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia

^b State Research Center of the Russian Federation Concern «CSRI Elektropribor», Saint Petersburg, Russia, dmitrygromov17@gmail.com

It is known, that temperature perturbations and thermal modes have significant influence on the accuracy of a fiber-optical gyroscope. Nowadays, thermal perturbations are among the main problems in the field of navigation accuracy. Review of existing methods for decrease of temperature influences on the accuracy of a strapdown inertial navigation system with fiber-optical gyros showed, that the usage of constructive and compensation methods only is insufficient and, therefore, thermostabilization is required. Reversible thermostabilization system is offered, its main executive elements are thermoelectric modules (Peltier's modules), heat transfer from which is provided by heatsinks at work surfaces of modules. This variant of thermostabilization maintenance is considered; Peltier's modules and temperature sensors for the system are chosen. Parameters of heatsinks for heat transfer intensification are calculated. Fans for necessary air circulation in the device are chosen and thickness of thermal isolation is calculated. Calculations of thermal modes of navigation system with thermostabilization are made in modern software Autodesk Simulation CFD. Comparison of results for present and previous researches and calculations shows essential decrease in gradients of temperature on gyro surfaces and better uniformity of temperature field in the whole device. Conclusions about efficiency of the given method usage in view of accuracy improvement of navigation system are made. Thermostabilization provision of a strapdown inertial navigation system with fiber-optical gyros is proved. Thermostabilization application in combination with compensational methods can reach a necessary accuracy of navigation system.

Keywords: fiber-optical gyro, navigation, thermal protection, thermostabilization, thermal mode, accuracy.

Введение

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) и бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на основе ВОГ находят все большее применение в навигации и постепенно проникают в сегмент навигационных приборов все больших точностей [1, 2]. В России созданием навигационной системы на основе ВОГ класса точности 0,01°/ч занимается ряд научно-производственных предприятий, в том числе ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон» совместно с НИУ ИТМО. Существует ряд проблем и задач, которые необходимо решить на пути к БИНС на ВОГ указанной точности. Одна из таких проблем – влияние тепловых возмущений на точность показаний гироскопа. В литературе показано, что для достижения точности ВОГ не хуже 0,01 °/ч требуется поддержание постоянного во времени градиента по волоконно-оптическому контуру вплоть до 0,01 К [3, 4]. Помимо

конструктивных способов, включающих в себя обеспечение теплоотвода и компоновку основных составляющих элементов, существуют два метода борьбы с негативными температурными влияниями на ВОГ – алгоритмическая компенсация тепловых воздействий на выходной сигнал прибора [5, 6] и термостабилизация прибора либо на уровне БИНС, либо на уровне ВОГ [7].

Ранее были проведены расчеты тепловых режимов разрабатываемой в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» БИНС на основе ВОГ без осуществления термостабилизации гироскопов [8, 9]. Предложенные изначально конструкции были доработаны по результатам расчетов и исследований, но требуемого уровня точности от них получить не удалось. Работы по алгоритмической компенсации и коррекции выходного сигнала также активно ведутся [10, 11]. Ожидается, что желаемого результата удастся достичь лишь совместным применением обоих вышеописанных методов, поэтому было принято решение термостабилизировать БИНС.

Для поддержания требуемого уровня температур в навигационных системах на основе поплавок-выходных гироскопов применяется реверсивная система термостабилизации (СТС) на основе термоэлектрических модулей (ТЭМ), которая способна в довольно широком диапазоне температур окружающей среды обеспечивать и поддерживать во времени требуемый уровень температур во внутреннем объеме прибора [12]. Основные принципы ее действия предложено использовать при разработке новой системы термостабилизации для БИНС на основе ВОГ. Возможность создания СТС на термоэлектрических модулях также описана в [13].

Основной целью настоящей работы является расчет тепловых режимов БИНС на основе ВОГ с СТС для подтверждения целесообразности применения предложенных методов термостабилизации в целях обеспечения требуемой точности навигационной системы, а также выработка рекомендаций по выбору конструктивных и исполнительных элементов СТС. Для этого необходимо:

- выбрать исполнительные и чувствительные элементы СТС;
- определить параметры конструктивных элементов СТС;
- рассчитать тепловой режим БИНС на основе ВОГ с учетом использования СТС;
- оценить эффективность предложенных методов термостабилизации.

Описание системы терморегулирования

В качестве отправной точки в разработке системы термостабилизации для БИНС на основе ВОГ принята СТС для навигационного прибора предыдущего поколения [12]. В своем первоначальном виде к рассматриваемой БИНС она неприменима из-за больших габаритных размеров и высокого энергопотребления, следовательно, необходима новая система. Общий вид СТС, разрабатываемой для БИНС на основе ВОГ, представлен на рис. 1. Габаритные размеры БИНС с установленной СТС не превышают 360 мм в длину и ширину и 500 мм в высоту.

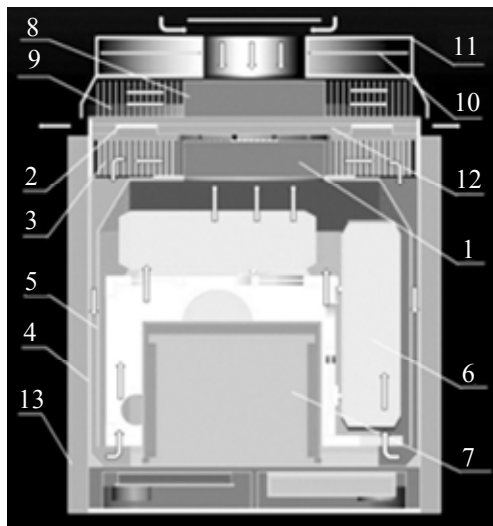


Рис. 1. Упрощенное изображение СТС, установленной на БИНС:

1, 8 – вентиляторы; 2 – ТЭМ; 3, 9 – радиаторы; 4, 5 – внутренний и внешний кожух; 6 – интерферометры ВОГ; 7 – платы электроники ВОГ; 10 – плата питания; 11 – внешняя крышка; 12, 13 – тепловая изоляция (стрелками показаны направления движения воздуха)

Основной контур (внутренний) является замкнутым, циркуляция воздуха в нем осуществляется с помощью вентилятора 1. Воздух, выходящий из вентилятора в радиальном направлении, нагревается или охлаждается с помощью двенадцати расположенных по окружности ТЭМ 2 (для интенсификации теплообмена используются радиаторы 3), проходит в зазоре между внешним 4 и внутренним 5 кожухами, затем

поднимается вверх, омывая элементы конструкции прибора 6, 7, и затягивается в СТС с помощью того же вентилятора, тем самым замыкая контур. Внешний же контур служит для теплообмена (снятия или подвода теплоты в зависимости от режима работы системы) с противоположных сторон ТЭМ и состоит также из вентилятора 8 и радиаторов 9. Забор воздуха осуществляется сверху, выход воздуха из прибора – с боковой поверхности. В верхней части прибора расположена плата питания 10, теплоотвод от которой будет кондуктивным на верхнюю крышку 11, радиаторы разных контуров 7, 9 отделены друг от друга слоем тепловой изоляции 12, для снижения влияния внешних температурных возмущений также используется тепловая изоляция 13.

Термостат состоит из следующих элементов: объект термостатирования, термостатируемый объем (камера термостата), исполнительные элементы (нагреватели/охладители), чувствительные элементы (термометры), тепловая изоляция. Основными объектами для термостатирования в данном случае являются интерферометры ВОГ (хотя фактически термостатируется весь внутренний объем БИНС). В качестве исполнительных элементов выступают ТЭМ (возможно применение дополнительных нагревателей), в качестве чувствительных элементов – платиновые термометры сопротивления, для теплоизоляции термостатируемого объема от окружающей прибор среды предложено изготовить дополнительный теплоизолирующий кожух. На начальной стадии разработки СТС необходимо решить несколько важных вопросов: выбор ТЭМ и нагревателей, определение местоположений датчиков температуры, выбор вентиляторов и радиаторов для интенсификации теплообмена на рабочих поверхностях ТЭМ.

Выбор исполнительных и чувствительных элементов СТС

Одним из основных критериев при выборе термоэлектрических модулей для СТС является требуемое время готовности прибора. Для определения мощности ТЭМ необходимо оценить общую теплоемкость элементов, составляющих термостатируемый объем, теплообмен с внешней окружающей средой и внутренние тепловыделения в приборе. Суммарная теплоемкость рассчитана аналитически и равна $C_{\text{сумм}} = 2,3 \cdot 10^4$ Дж/К. Для расчета выбрана температура стабилизации $T_{\text{стаб}} = 35$ °С. Из предложенных вариантов было выбрано два наиболее важных при эксплуатации режима выхода прибора на рабочий режим: прогрев с 15 °С до 35 °С за 15 мин при температуре окружающей среды 15 °С и охлаждение с 50 °С до 35 °С за 60 мин при температуре окружающей среды 50 °С. Определено, что с учетом суммарной теплоемкости и мощности тепловыделений внутри термостатируемого объема, а также теплообмена прибора с окружающей средой через слой теплоизоляции 2 см из материала с теплопроводностью $\lambda = 0,05$ Вт/(м·К), в режиме прогрева в прибор необходимо подводить 500 Вт тепловой мощности, а при охлаждении отводить 170 Вт. Для форсированного прогрева прибора было предложено использовать дополнительные нагреватели суммарной мощностью 200 Вт, равномерно распределенные по внешней поверхности внутреннего кожуха прибора. Следовательно, в режиме нагрева каждый из двенадцати ТЭМ должен подводить в систему 25 Вт тепловой мощности, а в режиме охлаждения отводить 15 Вт. Эти значения использованы в дальнейшем для определения их параметров.

Термоэлектрический модуль – достаточно сложный элемент с точки зрения определения его режима работы, эффективности и прочих характеристик, которые зависят от множества факторов, таких как ток и напряжение питания, интенсивность теплосъема на обеих рабочих поверхностях и др. Одним из основных преимуществ, которым обусловлено применение ТЭМ в настоящей конструкции, является возможность работы как в режиме нагрева, так и в режиме охлаждения. Выбор ТЭМ осуществляется по каталогам, графикам и расчетным программам фирмы «Криотерм» [14] и известным методикам [15]. Для заданной холодопроизводительности, напряжения питания и с учетом некоторых дополнительных параметров был выбран ТЭМ STORM-71 фирмы «Криотерм». Для обеспечения требуемой производительности при напряжении $U = 9$ В и поддержания необходимых температур на рабочих поверхностях требуется ток $I = 2,1$ А. При этом мощность, которую необходимо снимать с противоположной «горячей» поверхности ТЭМ, составляет 34 Вт. Стоит отметить, что это значение несколько превышает требуемую мощность в максимально сложном режиме прогрева прибора, следовательно, в режиме нагрева ТЭМ достаточно использовать те же значения тока и напряжения. Дальнейшей задачей является обеспечение необходимого теплосъема с рабочих поверхностей модулей.

Любая СТС должна иметь в своем составе один или несколько чувствительных элементов (датчиков температуры) для использования их в системе регулирования. В разрабатываемой системе термостабилизации поддержание температуры на уровне $\pm 0,1$ К предложено осуществлять по датчику ЭЧП-23 и расположить его в месте входа воздушных потоков из БИНС в вентилятор СТС. Также требуются контрольные датчики на обеих рабочих поверхностях ТЭМ. Кроме того, необходимо дополнить систему еще одним контрольным датчиком температуры, расположив его в месте выхода воздуха из радиатора внутреннего циркуляционного контура системы. Его не планируется использовать в качестве регулятора СТС. Но информация о температуре воздуха, выходящего из радиатора, вместе с показаниями вышеописанных датчиков позволит делать выводы об эффективности работы системы термостабилизации и при необходимости даст возможность быстро корректировать режимы работы ТЭМ на этапе проведения испытаний.

Расчет параметров конструктивных элементов СТС

Для функционирования термоэлектрического модуля в требуемом режиме необходимо обеспечить интенсивный теплообмен на его рабочих поверхностях, причем особенно важно – с «горячей» его стороны, так как именно на ней выделяется наибольшая мощность, и без должного теплоотвода модуль не будет работать в оптимальном режиме и может выйти из строя вследствие перегрева. Была проведена серия расчетов с учетом максимально возможной температуры окружающей среды, максимально допустимой температуры ТЭМ 80°C и рабочих параметров выбранного модуля при вышеуказанных I и U питания.

Для интенсификации теплосъема и обеспечения теплоотвода от рабочих поверхностей ТЭМ предложены штыревые радиаторы (применение ребристых радиаторов затруднено из конструктивных соображений и недостаточной их эффективности, что подтвердили дополнительные оценочные расчеты), циркуляция воздуха через которые осуществляется с помощью вентиляторов. Для обоих контуров циркуляции воздуха выбраны вентиляторы Papst RER 125-19/18 NH с максимальным расходом воздуха $G = 166 \text{ м}^3/\text{ч}$. Первоначально необходимо оценить аэродинамические потери при протекании воздушного потока через радиаторы и основную часть прибора для задания действительного расхода в расчетах радиаторов, в частности, и БИНС в целом. Серия предварительных расчетов (как аналитических, так и методом конечных элементов) показала, что на радиаторах потери напора составляют 55–60%, поэтому при расчете прибора в целом на входе и на выходе воздуха из БИНС в СТС будет задано значение расхода $G = 70 \text{ м}^3/\text{ч}$. При протекании воздуха через основной объем прибора СТС потери напора не превышают 8–10%, следовательно, при расчетах радиаторов будет использовано значение расхода $G = 12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, умноженное на количество радиаторов, составляет именно 90% от $166 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Расчеты показали, что, с учетом теплового сопротивления в местах контакта ТЭМ с радиатором, для обеспечения работы ТЭМ в требуемом режиме и, что наиболее важно, предотвращения его перегрева в случае работы СТС в режиме охлаждения при максимально возможной температуре окружающей среды требуется радиатор с тепловым сопротивлением R_{th} не хуже 0,45 К/Вт как с верхней стороны ТЭМ (внешний контур), так и с нижней (внутренний контур). Для выбора оптимальных геометрических параметров радиаторов в рамках заданных габаритов была проведена серия расчетов. Были промоделированы радиаторы из различных материалов, с различной высотой (H) и стороной квадратного поперечного сечения штыря (L), а также с шахматным и коридорным расположением штырей относительно потока воздуха. Результаты моделирования представлены в табл. 1 и показывают, что наиболее эффективным (за исключением значительно более дорогого медного) является радиатор с коридорным расположением штырей и размерами $L = 2 \text{ мм}$ и $H = 35 \text{ мм}$ из алюминиевого сплава с теплопроводностью $\lambda = 210 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Номер расчета	Исходные данные				Результаты
	Теплопроводность, λ , Вт/(м·К)	L , мм	H , мм	Оребрение	
1	210	3	35	коридорное расположение	0,45
2	210	2	35		0,42
3	210	3	35		0,43
4	210	2	40		0,42
5	130	2	40		0,56
6	380	2	40		0,28
7	210	2	40	шахматный порядок	0,44
8	210	2	35		0,44
9	210	3	35		0,47

Таблица 1. Результаты моделирования радиаторов с различными параметрами

Расчеты тепловых режимов БИНС на основе ВОГ с применением СТС

При расчетах БИНС с установленной СТС целиком ее влияние в расчетах учтено с помощью задания воздушного потока с постоянным расходом при температуре стабилизации на входе в прибор и того же постоянного расхода на выходе. Все расчеты проводятся для модели БИНС с кожухами и направляющими для обеспечения циркуляции воздуха с заданием постоянного расхода воздуха на входе и выходе из прибора. За значение расхода принято $G = 70 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура воздуха на входе в прибор равна температуре термостабилизации $T_{\text{стаб}} = 35^\circ\text{C}$. Учтена тепловая изоляция из материала с теплопроводностью $\lambda = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ толщиной 2 см, граничное условие с внешних боковых поверхностей – естественная конвекция с учетом теплового излучения. Расчеты проведены методом конечных элементов в программном обеспечении Autodesk Simulation CFD (ранее известном как CFDesign) [16, 17]. Конечно-элементная сетка для расчетов состоит приблизительно из 3 млн. элементов. В результате проведения расчетов кондуктивных и конвективных тепловых процессов во внутреннем объеме прибора при различных температурах окружающей среды получены распределения температур и скоростей движения воздуха в БИНС.

Все результаты расчетов слишком объемны для размещения их в рамках настоящей работы, поэтому на рис. 2 в качестве примера показано распределение температур по интерферометрам ВОГ в составе БИНС с учетом работы СТС при температуре окружающей среды 15°C. В табл. 2 показаны максимальные и минимальные температуры по поверхностям интерферометров ВОГ с учетом функционирования системы термостатирования при различных температурах окружающей среды.

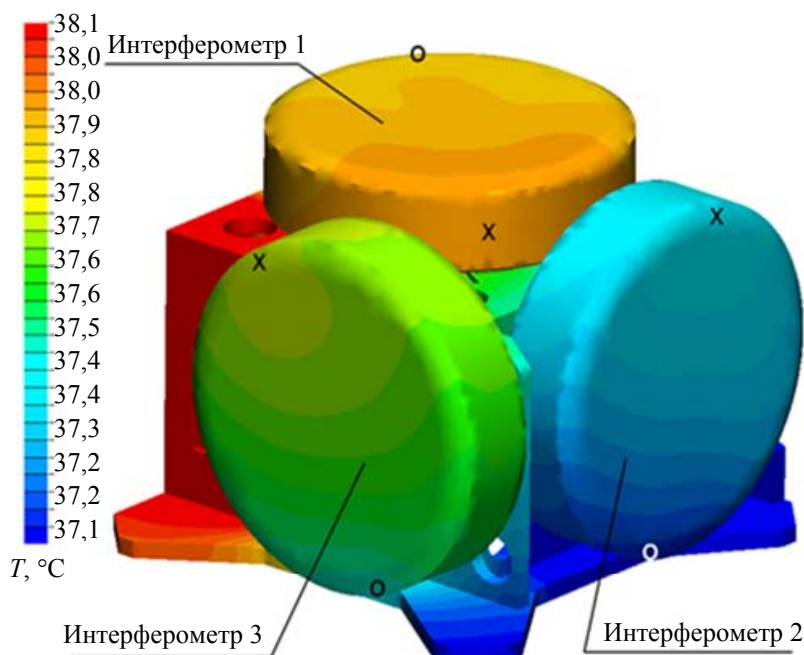


Рис. 2. Распределение температур по интерферометрам ВОГ при $T_{\text{ср}} = 15^\circ\text{C}$
(«x» – максимумы температур на поверхности каждого интерферометра, «o» – минимумы)

$T_{\text{ср}},$ $^\circ\text{C}$	Интерферометр 1			Интерферометр 2			Интерферометр 3		
	$T_{\text{макс}},$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{мин}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta T,$ К	$T_{\text{макс}},$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{мин}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta T,$ К	$T_{\text{макс}},$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{мин}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta T,$ К
0	37,23	37,17	0,06	36,81	36,52	0,29	37,13	36,85	0,28
15	38,06	38,01	0,05	37,4	37,13	0,27	37,85	37,59	0,26
35	38,99	38,94	0,05	38,36	38,12	0,24	38,65	38,43	0,22
50	39,8	39,75	0,05	38,89	38,5	0,39	39,38	39,02	0,36

Таблица 2. Перепады температур по поверхностям интерферометров

Заключение

Исследована возможность термостабилизации внутреннего объема бесплатформенной инерциальной навигационной системы на базе волоконно-оптических гироскопов. Рассмотрена возможность построения реверсивной системы термостабилизации на основе термоэлектрических модулей по аналогии с приборами предыдущего поколения. Обоснован выбор исполнительных элементов в системе термостабилизации, определены их режимы работы, рассчитаны оптимальные параметры радиаторов для интенсификации теплоотдачи с рабочих поверхностей термоэлектрических модулей, рассчитаны тепловые режимы навигационной системы с учетом термостабилизации, определены перепады температур по поверхностям интерферометров в приборе. Полученные значения существенно меньше, чем для той же навигационной системы без термостабилизации [8]: не более 0,4 К с использованием системы термостабилизации против 1 К в стационарном режиме и до 2 К в нестационарном тепловом режиме без нее. Помимо снижения градиентов температур в стационарном тепловом режиме, система терморегулирования за счет постоянного поддержания температуры входящего в термостатируемый объем воздуха с погрешностью $\pm 0,1$ К и использования тепловой изоляции обеспечивает постоянный уровень температур по внешним поверхностям интерферометра даже при существенных внешних тепловых воздействиях. Следовательно, можно сделать вывод о том, что обеспечение термостатирования внутреннего объема бесплатформенной инерциальной навигационной системы на базе волоконно-оптических гироскопов с помощью предложенного способа является обоснованным. Опытный образец разработанной системы термостабилизации находится в стадии изготовления. Конкретные значения точности показаний навигационной системы можно будет оценить лишь по результатам испытаний. Но ожидается, что совместно с использованием методов температурной компенсации и термостатирования непосредственно волоконно-

оптического контура в интерферометре будет достигнута точность показаний навигационной системы лучше 0,01 %/ч.

References

1. Peshekhonov V.G. Gyroscopic systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no.3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
2. Lefèvre H.C. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective. *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 223–226. doi: 10.1134/S2075108712040062
3. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. *Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroeniya v usloviyakh teplovykh vozdeistvii* [Sensors, instruments and systems of aerospace and marine instrumentmaking in terms of thermal effects]. St. Petersburg, CNII Elektropribor Publ., 2005, 404 p.
4. Shen C., Chen X. Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 14, pp. 2541–2547. doi: 10.1364/AO.51.002541
5. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A., Deineka G.B., Sharkov I.A., Deineka I.G. Reducing the effect of temperature variations on FOG output signal. *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 92–98. doi: 10.1134/S2075108713020041
6. Kolevatov A.P., Nikolaev S.G., Andreyev A.G, Ermakov V.S., Kel O.L., Shevtsov D.I. Volokonno-opticheskii giroskop besplatformennykh inertial'nykh system navigatsionnogo klassa. Razrabotka, termokompensatsiya, ispytaniya [Fiber optical gyroscope of navigation class strapdown inertial systems. Development, temperature compensation, and tests]. *Gyroscopy and Navigation*, 2010, no. 3, pp. 49–60.
7. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Barulina M.A. Mathematical models of thermal stress-strain state and scale factor error of fiber optic gyro sensors. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, vol. 42, no. 2, pp. 124–131. doi: 10.3103/S1052618813020040
8. Gromov D.S., Sharkov A.V. Teplovye rezhimy giroskopicheskikh priborov na baze volokonno-opticheskikh giroskopov [Heat regimes of gyroscopic instruments on the base of fiber optical gyroscopes]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 1, pp. 62–67.
9. Gromov D.S., Untilov A.A., Chapurskiy A.P. Issledovanie teplovykh rezhimov giroskopicheskikh priborov na baze volokonno-opticheskikh giroskopov [Investigation of thermal modes of gyroscopic devices based on fiber-optic gyroscopes] // *Materialy XIV konferentsii molodykh uchenykh "Navigatsiya i upravlenie dvizheniem"* [Proc. XIV conference of young scientists "Navigation and motion control"] / Ed. O.A. Stepanov, V.G. Peshekhonov. St. Petersburg, CNII Elektropribor Publ., 2012, pp. 453–459.
10. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. Methods of improving the accuracy of fiber-optic gyros. *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol. 3, no.2, pp. 132–143. doi: 10.1134/S2075108712020071
11. Vahrameev E.I., Galyagin K.S., Ivonin A.S., Oshivalov M.A. Prognoz i korrektsiya teplovogo dreifa volokonno-opticheskogo giroskopa [Prediction and Correction of Fiber-Optic Gyroscope Thermal Drift]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 79–84.
12. Berman Z.M., Kanushin V.M., Mironov Yu.V. Mokhov V.P., Sharygin V.P., Sharygin B.L. Inertial and stabilization navigation system "Ladoga-M": results of the development and testing. *Gyroscopy and Navigation*, 2002, no. 4 (39), pp. 29–38. (In Russian)
13. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. Application of elementary balances method for the analysis and synthesis of the thermal control system based on Peltier's modules for SINS on FOG. *Gyroscopy and Navigation*, 2013, no. 2 (81), pp. C. 84–103. (In Russian)
14. *Kryotherm. Thermoelectric, Peltier cooler*. Available at: <http://www.kryotherm.com> (accessed 19.12.2013).
15. Takhistov F.Yu. Metodika vybora konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov termoelektricheskogo termostata s neizotermicheskoi kameroi [Selection methodology of the design and conditions selection for thermoelectric thermostat with non-isothermal chamber]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 3 (26), pp. 263–267.
16. *Autodesk. Programmnoe obespechenie dlya raschetov i analiza* [Autodesk. Software for engineering and analyzes]. Available at: <http://www.autodesk.ru/products/autodesk-simulation-family/> (accessed 19.12.2013).
17. Gromov D.S. Teplovoi rezhim dvukhstepennogo poplavykovogo giroskopa [Thermal mode of a two-range floating gyro]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 3 (79), p. 119–123.

Громов Дмитрий Сергеевич

– аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Россия, Санкт-Петербург; инженер первой категории, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», dmitrygromov17@gmail.com

Dmitry S. Gromov

– postgraduate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia; engineer, State Research Center of the Russian Federation Concern «CSRI Elektropribor», JSC, dmitrygromov17@gmail.com

Принято к печати 03.02.14

Accepted 03.02.14