

А. В. ГОЛИКОВ, В. М. ПАНКРАТОВ, М. В. ЕФРЕМОВ

## АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ БЛОКА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

*Построены и реализованы математические модели трехмерных нестационарных температурных полей блока измерения угловых скоростей (БИУС) и входящих в его состав волоконно-оптических гироскопов как в базовой конструкции, так и с реверсивной системой терморегулирования (СТР). Проведен сравнительный анализ температурных полей в условиях сложных температурных воздействий. Дана оценка эффективности применения двухконтурной реверсивной СТР.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, блок измерения угловых скоростей, система терморегулирования, температурное поле.

### Постановка задачи исследования

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) и бесплатформенные инерциальные навигационные системы на их основе в настоящее время находят широкое применение в системах управления и ориентации подвижных объектов на Земле и в космическом пространстве. Несмотря на достаточно хорошо разработанную теорию и практику БИУС на основе ВОГ, задача повышения их точности и надежности не теряет актуальности [1, 2, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 14]. Известно, что одним из важных факторов, оказывающих влияние на точность как отдельного ВОГ, так и БИУС в целом, являются температурные воздействия [2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 14].

Для существенного повышения точности ВОГ и БИУС на их основе кардинальным решением является применение активных методов, заключающихся в создании многоконтурных реверсивных СТР отдельных ВОГ (внутренний контур для стабилизации температуры его элементов) и всего БИУС (внешний контур). Активный метод регулирования температуры позволит уменьшить погрешности ВОГ в составе БИУС, хотя и требует внесения изменений в конструкцию прибора, что повлечет за собой ухудшение массогабаритных характеристик и увеличение энергопотребления. Введение в конструкцию прибора СТР позволит существенно сократить время выхода на заданный тепловой режим.

Для обеспечения заданного температурного режима работы ВОГ и БИУС на их основе предлагается рассмотреть реверсивную СТР с исполнительными устройствами – термоэлектрическими полупроводниковыми батареями [16, 19], которые в зависимости от направления тока в них служат источниками тепла либо холода.

---

**Голиков** Алексей Викторович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов).

**Панкратов** Владимир Михайлович. Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем точной механики и управления РАН. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

**Ефремов** Максим Владимирович. Исполнительный директор ООО НПП «Антарес» (г. Саратов).

В настоящей работе в качестве базовой конструкции рассматривается модернизированный блок измерения угловых скоростей на основе ВОГ «БИУС-М-1» производства ООО НПП «Антарес» (г. Саратов), используемый в системах управления, навигации и стабилизации космических аппаратов.

Цель работы – сравнительный анализ температурных полей БИУС в базовой конструкции без СТР и с реверсивной СТР в условиях сложных тепловых воздействий на поверхности Земли и в космическом пространстве.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- построены математические модели тепловых процессов, протекающих как в целом в БИУС, так и в отдельном ВОГ;
- построены математические модели двухконтурной реверсивной СТР на термоэлектрических модулях Пельтье;
- реализован специализированный программный комплекс (СПК), позволяющий рассчитывать и визуализировать неоднородные, нестационарные температурные поля БИУС и отдельных ВОГ в базовой конструкции и с реверсивной двухконтурной СТР;
- с помощью разработанного СПК проведены компьютерные эксперименты и сделан подробный тепловой анализ функционирования прибора БИУС-М-1 в условиях детерминированных (ступенчатых и гармонических), а также случайных тепловых воздействий на Земле и в условиях космоса. Получены качественные и количественные оценки рассматриваемых тепловых процессов.

### Математические модели и исходные данные

Математическая модель тепловых процессов, предназначенная для расчета неоднородных, трехмерных, нестационарных температурных полей, их производных и других температурных характеристик с учетом применения реверсивной системы терморегулирования на термоэлектрических модулях Пельтье, построена на основе модифицированного метода «элементарных балансов» (МЭБ) [5, 6, 15, 16, 18, 19]. Основным алгоритм расчета температурного поля имеет вид [5]:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[ 1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^N q_{ij} + q_{ic} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^N q_{ij} T_j + q_{ic} T_{ci} + Q_i \right),$$

где  $T_i(t)$ ,  $T_i(t + \Delta t)$ ,  $c_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) – температуры  $i$ -го элемента в настоящий и последующий момент времени и его теплоемкость;  $q_{ij}$  – теплопроводности между элементами  $i, j$  ( $j=1, \dots, N$ );  $q_{ic}$  – теплопроводность между  $i$ -м элементом и окружающей средой;  $T_{ci}$  – температура среды;  $Q_i$  – мощность источника тепла;  $M$  – количество элементов;  $N$  – количество элементов, имеющих тепловой контакт с  $i$ -м элементом;  $\Delta t$  – шаг расчета.

Приближенное решение, полученное с помощью основного разностного алгоритма МЭБ, при правильном выборе [5] количества точек разбиения и стремлении шага расчета  $\Delta t$  и пространства  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  к нулю сходится, как это показано на модельной задаче [6], к точному решению соответствующей дифференциальной краевой задачи с погрешностью  $O(\Delta t + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$ .

Температуры внешней и внутренней окружающей среды БИУС и термоплаты, на которой он устанавливается, могут изменяться по детерминированным (ступенчатым или гармонически изменяющимся) и случайным законам.

Компоновка основных элементов исследуемого прибора БИУС-М-1 показана на рис. 1.

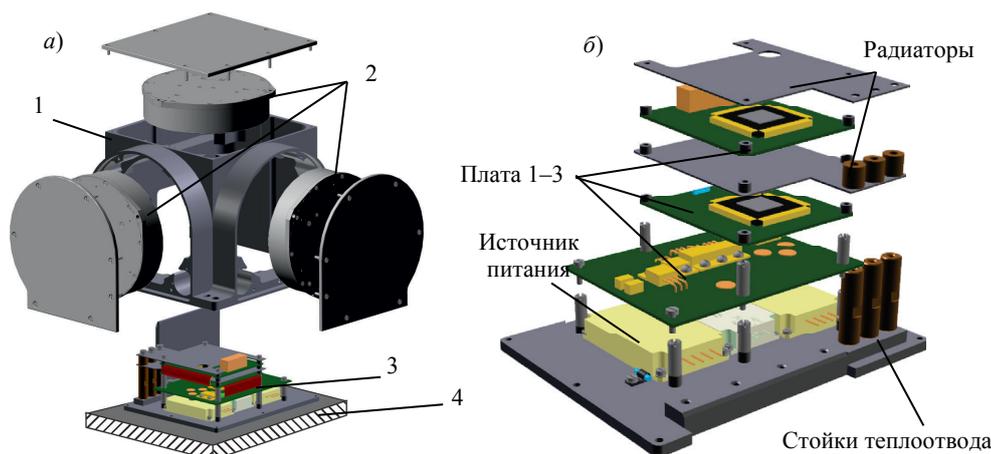


Рис. 1. Компоновка (а) и блок электроники (б) прибора БИУС-М-1 в базовой (без СТР) конструкции: 1 – корпус, 2 – ВОГ, 3 – блок электроники, 4 – термоплата

Прибор представляет собой моноблок, содержащий три измерительных канала. В состав каждого измерительного канала входит чувствительный элемент – ВОГ (2) с соответствующей сервисной электроникой (3) – и источник питания.

БИУС-М-1 имеет модульную структуру и содержит элементы (ВОГ, электронные платы и др.) с источниками тепловыделения заданной мощности. Электронные платы размещены на стойке одна под другой в виде этажерной конструкции, находящейся внутри блока и прикрепленной к его основанию (дну). Основание (дно) блока имеет хороший тепловой контакт по максимальной площади с термоплатой, температура которой при моделировании изменяется в заданном диапазоне.

Базовая конструкция блока выполнена в негерметичном варианте, без системы термостатирования и без принудительной вентиляции. Теплоотвод блока – пассивного типа, осуществляется через корпус в окружающую среду и через узлы крепления блока к термоплате. В блоке предусмотрено тепловое шунтирование тепловыделяющих элементов отдельных плат на основании через стойки теплоотвода, шунты и пластины радиатора (рис. 1) и далее на термоплату. Общая масса прибора – 4,7 кг, суммарная мощность тепловыделения – до 6,7 Вт.

Окружающая внешняя и внутренняя (заполняющая внутренние полости) среда – воздух при заданном атмосферном давлении (или вакуум). Температура окружающей среды может изменяться в диапазоне от  $-10$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

В рамках исследования на основе МЭБ [5, 6] были построены и реализованы в СПК математические модели тепловых процессов всего БИУС (верхний уровень) в базовой конструкции без СТР и с двухконтурной реверсивной СТР, а также отдельного ВОГ (нижний уровень) в базовой конструкции и с реверсивной СТР. При построении моделей использован иерархический принцип [15–17].

Математическая модель БИУС, реализованная в СПК, соответствует реальным тепловым процессам, что обосновано в [15–17] и других работах авторов, а также сравнительным анализом результатов численного моделирования температурных полей блока с данными тепловых испытаний, предоставленными разработчиками измерительного блока. Данный анализ показал полное совпадение эксперимента с результатами моделирования.

Разработанный СПК позволяет моделировать изменение температуры окружающей среды во времени в указанных выше пределах по заданному алгоритму по ступенчатому, гармоническому и случайному законам. Под ступенчатым воздействием понимается заданная циклограмма изменения температуры внешней среды, имитирующая изменение температуры в термокамере при тепловых испытаниях исследуемого объекта.

Коэффициенты теплопроводимости  $q_{i,j}$  между элементарными объемами тепловой модели и окружающей среды рассчитываются в соответствии с фундаментальными законами теплообмена [5, 6, 18] и учитывают все его виды (конвекция, кондукция и т.д.).

В данной тепловой модели принято, что температура внутренней среды БИУС отличается от температуры среды снаружи и определяется как среднее значение температур элементов конструкции, контактирующих с окружающей средой [16, 17].

Количество элементарных объемов для БИУС (расчетных точек, в каждой из которых определяется температурное поле с течением времени) выбрано 90, а в конструкции с СТР – 102. Для ВОГ эти значения равны соответственно 82 и 85.

### Компьютерные эксперименты и анализ результатов

На основе построенных математических моделей с помощью разработанного программного обеспечения проведена серия компьютерных экспериментов по моделированию тепловых процессов в исследуемом приборе при различных возмущающих тепловых воздействиях и условиях окружающей среды, а именно: температура внешней среды изменяется в пределах от  $-10$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  при нормальном атмосферном давлении и силе тяжести или 10-кратном понижении давления и невесомости.

Моделирование тепловых процессов в базовой конструкции БИУС-М-1 показало, что в экстремальных условиях вакуума и невесомости температура плат электроники может превышать температуру окружающей среды и термоплаты на  $20^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Время прогрева прибора составило  $\leq 140$  мин.

В нормальных, «земных», условиях температура плат электроники превышает температуру окружающей среды на  $9^{\circ}\text{C}$ , а время прогрева прибора составляет примерно 60 мин.

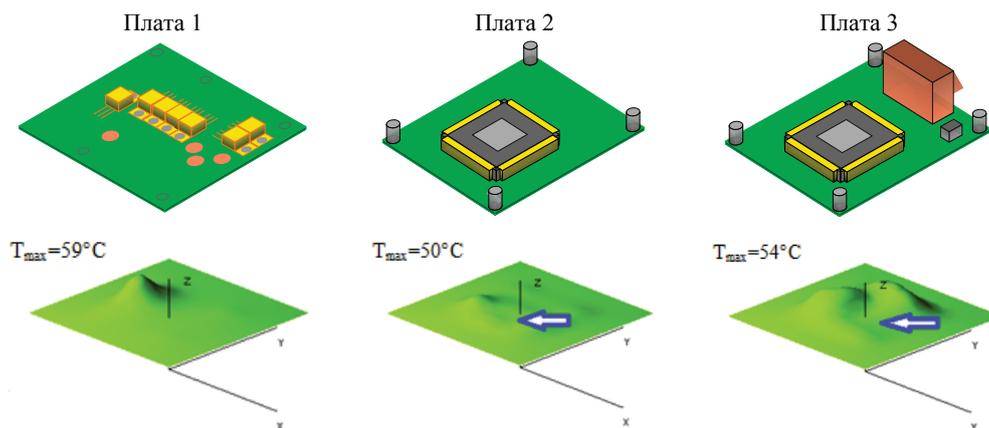


Рис. 2. Температурные поля в платах блока электроники при  $T$  внешней среды  $40^{\circ}\text{C}$ . Стрелкой обозначена область теплового шунтирования тепловыделяющих элементов плат

Анализ показал, что в исследуемом БИУС в *базовой конструкции предусмотрены меры* пассивного характера для максимально возможного снижения температурных перегревов по сравнению с окружающей средой и термоплатой. Эта задача решена в базовой конструкции БИУС-М-1 за счет применения теплосъемных шунтирующих устройств для основных тепловыделяющих элементов плат 2 и 3 (чипы микропроцессоров, рис. 2), а также благодаря использованию элементной базы с малой мощностью тепловыделения. Проведенное математическое моделирование показало эффективность этих мер.

Представляется также целесообразным применить тепловое шунтирование для всех основных тепловыделяющих элементов на плате 1 и оставшихся незашунтированными тепловыделяющих элементов на платах 2 и 3.

В проведенных исследованиях три ВОГ в составе БИУС-М-1 моделировались (верхний уровень) как однородные твердотельные элементы, содержащие источники тепла с заданной постоянной мощностью тепловыделения  $\leq 1$  Вт каждый. Полагалось, что эти элементы имеют хороший тепловой контакт с металлическим корпусом и через него с термоплатой, на которой прибор установлен.

При таком подходе средние перегревы гироскопов по сравнению с температурой термоплаты по данным компьютерных экспериментов оказались  $\leq 3^\circ\text{C}$ . Далее проведен более детальный тепловой анализ отдельных гироскопов в составе прибора БИУС-М-1 (нижний уровень).

В процессе моделирования тепловых процессов в отдельном ВОГ в составе БИУС *базовой конструкции* при *постоянной* температуре окружающей среды и термоплаты выявлено следующее.

*В условиях нормального атмосферного давления и силы тяжести* максимальные перегревы элементов ВОГ по сравнению с температурой окружающей среды принимают значения  $\leq 4^\circ\text{C}$ . Максимальные значения температурных перепадов  $\Delta T_{\psi}$  в зоне оптоволоконной бухты ВОГ не превышают  $0,3^\circ\text{C}$ . Время переходных тепловых процессов в элементах ВОГ составляет  $\approx 120$  мин.

Анализ тепловой ситуации в зависимости от ориентации ВОГ относительно вектора силы тяжести показал, что этот фактор влияет незначительно в условиях нормального атмосферного давления и силы тяжести. Изменения температурных показателей находятся в пределах 2%.

*В условиях вакуума и невесомости* температурные условия в ВОГ *ухудшаются* по сравнению с условиями нормального атмосферного давления и силы тяжести.

Максимальные перегревы элементов прибора по сравнению с температурой среды во всех вариантах не превышают  $10^\circ\text{C}$ , что в 2,5 раза больше перегревов в условиях нормального давления и силы тяжести. Уровень максимальных температурных перепадов в зоне оптоволоконной бухты ВОГ составляет в среднем  $\Delta T_{\psi} = 0,6^\circ\text{C}$ , что в 2 раза превышает уровень этих перепадов в условиях нормального давления и силы тяжести. Время переходных тепловых процессов в элементах ВОГ в условиях вакуума и невесомости *существенно возросло* и составило  $\approx 350$  мин.

В процессе моделирования тепловых процессов в ВОГ при *гармонически* изменяющейся температуре среды и плиты выявлено, что гармонически изменяющаяся внешняя температура с рассмотренными характеристиками, близкими к полетам по круговой орбите спутников Земли, *улучшает* температурную ситуацию в ВОГ при определенных частотах колебаний внешней температуры.

Таким образом, проведенные исследования показали, что тепловые условия в ВОГ в базовой конструкции – *удовлетворительные*, однако для повышения

термоинвариантности и сокращения времени прогрева прибора рекомендовано предусмотреть меры активного характера, например применение реверсивных систем терморегулирования.

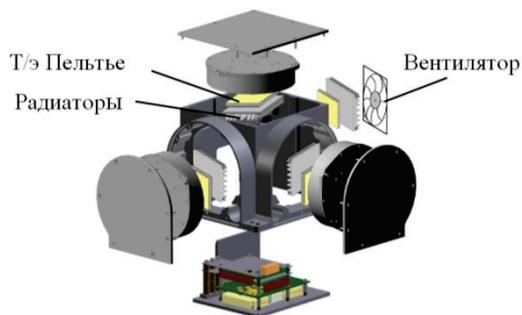


Рис. 3. Компоновка прибора БИУС-М-1 с элементами СТР

через теплопроводящую пасту и корпус с ВОГ и другими элементами БИУС. На наружной поверхности модуля установлен с использованием теплопроводящей пасты радиатор с вытяжным вентилятором для обеспечения эффективного теплообмена между наружной поверхностью модуля Пельтье и окружающей средой. Такая конструктивная схема расположения исполнительных элементов СТР позволяет непосредственно стабилизировать температуру корпуса БИУС.

Основной тепловой поток от исполнительных элементов СТР к внутренним элементам БИУС (в том числе к ВОГ) идет через корпус и дно.

Волоконно-оптические гироскопы закреплены на корпусе. На внешней плоской поверхности каждого ВОГ расположены модули Пельтье с радиатором, образующие внутренний контур СТР. Главная особенность внутреннего контура СТР каждого ВОГ заключается в том, что отсутствуют вентиляторы и радиаторы шунтируются на корпус, т.е. имеют с ними максимально возможный тепловой контакт.

Построенная и реализованная в СПК тепловая модель БИУС с СТР позволяет имитировать расположение термодатчика в любом элементарном объеме. Моделирование показало, что оптимальным вариантом расположения термодатчиков СТР является место установки исполнительных элементов СТР – на корпусе БИУС, крышках ВОГ.

Для достижения точности на уровне  $<0,01$  град/час необходима стабилизация абсолютных температур в ВОГ около заданного значения не хуже  $\approx 0,4^\circ\text{C}$ , температурных перепадов в зоне волокна бухты – не хуже  $\approx 0,04^\circ\text{C}$ , скорости изменения температуры – на уровне  $\approx 3^\circ\text{C}/\text{час}$  [8, 15].

В рассматриваемой в работе СТР используется релейно-пропорциональный закон регулирования, аналогичный описанному в [16, 17], в котором в силу особенностей термозащитных элементов Пельтье в качестве оптимальной температуры термостабилизации  $T_z$  необходимо выбирать температуру, близкую к верхней границе диапазона (от  $-10$  до  $40^\circ\text{C}$ ). В данной работе  $T_z$  принята равной  $30^\circ\text{C}$ .

В этом случае моделирование тепловых процессов показало следующее. При тепловых воздействиях по заданной циклограмме и включенной СТР имеет место существенное снижение максимальных перегревов по отношению к температуре среды в сравнении с базовой конструкцией. При температуре термостабилизации  $T_z = 30^\circ\text{C}$  температура самого «горячего» элемента на плате 1 не превышает температуру внешней среды (рис. 4).

Существенно снижается время прогрева. В случае применения СТР время выхода на заданную температуру  $T_z < 30$  мин (в 3,5 раза меньше базового). При этом в зоне гироскопов это время составляет менее 5 мин.

Точность стабилизации температуры в установившемся режиме на корпусе блока (внешний контур) не хуже  $0,3^\circ\text{C}$ , а в зоне установки ВОГ (внутренний контур) – не хуже  $0,1^\circ\text{C}$ . Суммарная дополнительная потребляемая мощность обоих контуров СТР в установившемся режиме не превышает 3 Вт, а ток – 0,2 А. Иными словами, имеет место увеличение общей потребляемой мощности прибора на  $\approx 45\%$  по сравнению с базовой конструкцией.

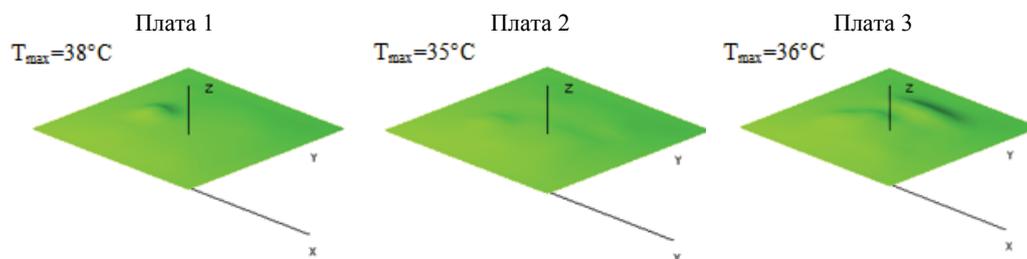


Рис. 4. Температурные поля в платах блока электроники при  $T$  внешней среды  $40^\circ\text{C}$  и при включенной СТР

В процессе моделирования тепловых процессов в БИУС-М-1 с СТР при гармонических тепловых воздействиях и воздействиях по заданной циклограмме выявлено, что реверсивная система терморегулирования с выбранными параметрами обеспечивает поддержание заданной температуры при таких видах воздействия в зоне ВОГ на уровне  $0,02^\circ\text{C}$ .

При моделировании случайного теплового воздействия выявлено, что реверсивная СТР с выбранными параметрами также обеспечивает поддержание заданной температуры. Стабильность поддержания заданной температуры и потребляемая мощность при этом не хуже, чем в предыдущих режимах.

Анализ различных температурных режимов БИУС-М-1 показал, что применение реверсивной двухконтурной СТР существенно улучшает во всех элементах БИУС температурные условия. Диапазон изменения температуры ВОГ составил  $\approx 0,21^\circ\text{C}$  при диапазоне изменения температуры среды и термоплаты, на которой крепится БИУС, от  $-10$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Следовательно, влияние внешних перепадов температуры на температуру корпуса снизилось в  $\approx 250$  раз.

Увеличение массогабаритных характеристик и энергопотребления – это плата за улучшение ситуации с температурными условиями в БИУС. Пиковая суммарная потребляемая мощность СТР (в режиме выхода на температуру термостабилизации) не превышает 13 Вт при нормальной силе тяжести и нормальном давлении среды. Масса и габаритные размеры увеличиваются за счет исполнительных элементов СТР и применения теплоизоляции примерно на 5-10% по сравнению с базовым вариантом БИУС без системы терморегулирования.

Для получения более детальных результатов сделан подробный тепловой анализ отдельного ВОГ с СТР (внутренний контур) с использованием результатов, полученных при расчете температурного поля всего блока на верхнем уровне. Важно отметить, что при моделировании тепловых процессов температура внутренней среды БИУС является температурой окружающей среды для ВОГ.

При ступенчатых тепловых воздействиях выявлено следующее. При включенной СТР существенно снижается время прогрева (в случае применения СТР – время выхода на заданную температуру  $T_z$ ) в зоне оптоволокну (более чем в 2,5 раза меньше базового). При этом в зоне элементов крышки ВОГ, имеющей непосредственный тепловой контакт с термоэлементом Пельтье, это время составляет менее 7 мин, что хорошо согласуется с результатом, полученным на предыдущем этапе.

Потребляемая мощность СТР отдельного ВОГ в установившемся режиме не превышает десятых долей Вт. Точность стабилизации абсолютных температур в зоне волоконной бухты при этом не хуже  $0,1^\circ\text{C}$ .

В экстремальных условиях (10-кратное уменьшение давления окружающей среды и невесомость) система регулирования температуры остается работоспособной при незначительном увеличении времени прогрева и других показателей (температурные перепады, производные температур  $\dot{T}_i$ ).

В процессе моделирования тепловых процессов в ВОГ при воздействиях по заданной циклограмме и гармонических тепловых воздействиях было показано, что реверсивная СТР с выбранными параметрами наиболее эффективна и обеспечивает поддержание заданной температуры в зоне волоконной бухты на уровне сотых долей градуса ( $\approx 0,02^\circ\text{C}$ ).

Применение реверсивной двухконтурной СТР позволяет более чем на два порядка ( $\approx$  в 180 раз) уменьшить температурные перепады в зоне волоконной бухты и производные по времени от текущих температур при потребляемой дополнительно мощности СТР отдельного ВОГ не более сотых долей Вт в установившемся режиме.

Моделирование случайного внешнего теплового воздействия показало, что реверсивная СТР с выбранными параметрами также обеспечивает поддержание заданной температуры. Точность поддержания заданной температуры и потребляемая мощность при этом не хуже, чем в предыдущих режимах.

Основные результаты сравнительного анализа тепловых режимов в БИУС в базовой конструкции и с применением реверсивной двухконтурной СТР в условиях нормального атмосферного давления и силы тяжести сведены в таблицу.

Т а б л и ц а

Моделирование тепловых процессов на верхнем уровне иерархии (БИУС)		
	Базовая конструкция без СТР	Реверсивная СТР $T_z = 30^\circ\text{C}$
Время прогрева БИУС при $T$ окр. среды $+40^\circ\text{C}$	60 мин	30 мин
Время прогрева в зоне ВОГ на верхнем уровне иерархии при $T$ окр. среды $+40^\circ\text{C}$	120 мин	5 мин
Максимальная температура в самом «горячем» элементарном объеме (плата 1) БИУС при $T$ окр. среды $+40^\circ\text{C}$	$59^\circ\text{C}$	$38^\circ\text{C}$
Максимальная температура ВОГ	$44^\circ\text{C}$	$30^\circ\text{C}$
Точность термостабилизации внешнего контура СТР (БИУС)	–	не хуже $0,3^\circ\text{C}$
Точность термостабилизации внутреннего контура СТР (ВОГ)	–	не хуже $0,02^\circ\text{C}$
Суммарная дополнительная потребляемая мощность БИУС с СТР в установившемся режиме	–	3 Вт

Моделирование тепловых процессов на нижнем уровне иерархии (отдельный ВОГ)		
Время прогрева в зоне термодатчика СТР при $T$ окр. среды $+40^{\circ}\text{C}$	120 мин	7 мин
Время прогрева в зоне оптоволоконна при $T$ окр. среды $+40^{\circ}\text{C}$	120 мин	40 мин
Максимальная температура в самом «горячем» элементарном объеме ВОГ при $T$ окр. среды $+40^{\circ}\text{C}$	$44^{\circ}\text{C}$	$30^{\circ}\text{C}$
Точность термостабилизации в зоне волоконной бухты ВОГ	–	не хуже $0,1^{\circ}\text{C}$
Окружной температурный перепад в волокне ВОГ $\Delta T_{\psi}$	$3,5^{\circ}\text{C}$	$0,04^{\circ}\text{C}$
Радиальный температурный перепад в волокне ВОГ $\Delta T_{\text{R}}$	$3,5^{\circ}\text{C}$	$0,04^{\circ}\text{C}$
Потребляемая мощность СТР в <i>установившемся режиме</i>	–	$0,01$ Вт

Таким образом, применение СТР существенно улучшает тепловую ситуацию в БИУС в условиях детерминированных и случайных нестационарных тепловых воздействий.

В базовой конструкции тепловые процессы всех элементов БИУС и ВОГ носят нерегулируемый характер, определяемый в основном характером изменения температуры внешней среды и термоплаты. Температуры элементов с различными постоянными времени «отслеживают» изменения температуры внешней среды и термоплаты, стремясь к некоторым установившимся значениям, а окружные  $\Delta T_{\psi}$  и радиальные  $\Delta T_{\text{R}}$  перепады в оптоволоконне в соответствии с изменениями температуры внешней среды принимают значения до  $3,5^{\circ}\text{C}$ .

В случае применения двухконтурной реверсивной СТР тепловые процессы являются управляемыми. Температуры ВОГ и его элементов от начального значения  $T_0$  принимают с высокой точностью заданную температуру термостабилизации  $T_{\text{Z}}$ . Абсолютные значения температурных перепадов  $\Delta T_{\psi}$  и  $\Delta T_{\text{R}}$  в оптоволоконне в установившемся режиме при всех рассматриваемых видах воздействия не превышают  $0,04^{\circ}\text{C}$ .

В целом, при работе двух контуров СТР, определенной теплоизоляции наружных поверхностей БИУС и ВОГ (по крайней мере в 4 раза больше базового варианта прибора без СТР), нормальной силе тяжести и давлении среды и расположении «идеального» термодатчика ВОГ в зоне корпуса, а также при изменении внешней температуры в пределах от  $-10$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  при гармоническом воздействии с периодом 90 мин диапазон изменения температуры в зоне волоконной бухты составил  $<0,04^{\circ}\text{C}$  (уменьшился в  $>1000$  раз), так что коэффициент качества стабилизации [19] температуры в ВОГ при работе двух контуров СТР составил  $1/1000 \approx 0,001$ .

### Заключение

Исследования качественных и количественных характеристик функционирования БИУС-М-1 при сложных температурных воздействиях и различных условиях окружающей среды позволяют сделать следующий основной вывод: в базовой конструкции максимальные перегревы элементов прибора не превышают критических значений за счет применения теплосъемных шунтирующих устройств для тепловыделяющих элементов и использования элементной базы с малой мощностью тепловыделения. Однако имеющие место перегревы требуют внимания и оценки возможностей их уменьшения.

Показано, что при реализации двухконтурной реверсивной СТР температурная ситуация в отдельных гироскопах и других элементах БИУС значительно улучшится. Диапазон изменения температуры на ВОГ составил  $\approx 0,2^{\circ}\text{C}$  при диапазоне изменения температуры внешней среды и термоплаты, на которой

крепится БИУС, 50°C, то есть влияние внешних перепадов температуры на температуру на корпусе снизилось в  $\approx 250$  раз.

Получено *существенное* сокращение времени выхода на заданный тепловой режим (в 3,5 раза меньше базового). При этом в зоне гироскопов это время составляет менее 5 мин.

Детальное исследование температурного поля отдельного ВОГ с СТР показало, что применение реверсивной двухконтурной СТР позволяет более чем на два порядка ( $\approx$  в 180 раз) уменьшить температурные перепады в зоне волоконной бухты по сравнению с базовой конструкцией, а также производные по времени от текущих температур при дополнительной потребляемой мощности СТР отдельного ВОГ, не превышающей сотых долей Вт в установившемся режиме. При этом точность стабилизации заданной температуры в зоне волоконной бухты ВОГ будет не хуже 0,4°C при работе двух контуров реверсивной СТР, диапазоне изменения температуры внешней среды и термоплаты, равном 50°C, и определенной степени теплоизоляции внешней поверхности ВОГ и БИУС.

Однако улучшение температурных условий в ВОГ и БИУС требует дополнительной потребляемой мощности СТР (три ВОГ и БИУС) до 13 Вт при выходе на заданный тепловой режим и приводит к увеличению массы и габаритных размеров за счет исполнительных элементов СТР и применения теплоизоляции примерно на 20-40% по сравнению с базовым вариантами ВОГ и БИУС без системы терморегулирования.

Уменьшение диапазона изменения температур в зоне волоконной бухты ВОГ за счет термостабилизации более чем в 1000 раз, согласно результатам исследования теплового дрейфа ВОГ [1, 2, 7, 10, 13], позволит существенно повысить точность и эффективность работы прибора, то есть выйти на уровни точности не хуже 0,01 град/час.

Авторы выражают благодарность руководству и коллективу ООО НПП «Антарес» за активное участие и предоставленные исходные данные, необходимые для выполнения данной работы.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту 16-08-00328.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Волоконно-оптические датчики.** Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. Москва: Техносфера, 2008. 500 с.
2. **Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Киселев Е.В., Ошивалов М.А., Ульрих Т.А.** Тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа // *Приборостроение*. 2011. № 1. С. 32–37.
3. **Yonggang Zhang et al.** Modeling of thermal-induced rate error for FOG with temperature ranging from  $-40$  to  $+60$  °C, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 305–310.
4. **Quatraro E., Pizzarulli A., Catasta M., Crescenti G., Spinozzi E., Cingolani A.** High Performance FOG for Non Temperature Stabilized Environment, *Inertial Sensors and Systems – Symposium Gyro Technology*, 20–21 September, 2011, Karlsruhe, Germany.
5. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М.** Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. 150с.
6. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. 404 с.
7. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Губанов А.Г., Ефремов М.В.** Пути обеспечения термoinвариантности волоконно-оптического гироскопа // *Гироскопия и навигация*. 2011. № 4 (75). С. 42–56.

8. Колеватов А.П., Николаев С.Г., Андреев А.Г., Ермаков В.С. и др. Успехи в разработке БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов // Сборник материалов XVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, 2009. С. 13–20.
9. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А. Математические модели термоупругого напряженно-деформированного состояния и погрешности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопического датчика // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 2. С. 43–52.
10. Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. № 4 (79). С. 10–20.
11. Пылаев Ю.К., Губанов А.Г., Ефремов М.В., Круглов С.А., Романов А.В. Волоконно-оптический гироскоп космического применения. Опыт разработки, производства и эксплуатации // Сборник материалов XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, 2013. С.22–31.
12. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е. и др. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Сборник материалов XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, 2007. С.141–150.
13. Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Г.Б., Пешехонов В.Г. и др. Трехосный волоконно-оптический гироскоп. Результаты разработки // Сборник материалов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, 2011. С. 8–14.
14. Лефевр Э.К. Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы // Гироскопия и навигация. 2012. № 4 (79). С. 3–9.
15. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В. Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами // Гироскопия и навигация. 2013. № 1 (80). С. 49–63.
16. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Применение метода элементарных балансов для анализа и синтеза системы терморегулирования на модулях Пельтье для БИНС на ВОГ // Гироскопия и навигация. 2013. № 2 (81). С. 84–103.
17. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Управление температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах // Изв. РАН. Теория и системы управления (ТиСУ). 2014. № 4. С. 565–575.
18. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
19. Ингберман М.И., Фромберг Э.М., Грабой Л.П. Термостатирование в технике связи. М.: Связь, 1979. 144 с.

---

**Golikov A.V., Pankratov V.M.** (Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia), **Efremov M.V.** (Antares R&D Company, LLC, Saratov, Russia). Analysis of Temperature Fields of a FOG-Based Angular Rate Measurement Unit. *Гироскопия и Навигация*. 2017. Vol. 25. No. 4. P. 60–71.

**Abstract.** Mathematical models of three-dimensional nonstationary temperature fields of an angular rate measurement unit and the fiber optic gyroscopes included in it are constructed and implemented, both in the basic design and that with a reverse thermal control system. Comparative analysis of temperature fields under conditions of complex temperature effects is performed. The effectiveness of using the two-circuit reverse thermal control system is estimated.

**Key words:** fiber optic gyro, angular rate measurement unit, thermal control system, temperature field.

## REFERENCES

1. **Volokonno-opticheskie datchiki** (Fiber Optic Sensors), Introductory course for engineers and researchers, E. Udda, Ed., Moscow: Tekhnosfera, 2008.
2. **Vakhrameev, E.I., Galyagin, K.S., Kiselev, E.V., Oshivalov, M.A., and Uprikh, T.A.**, Thermal Drift of the Fiber Optic Gyroscope, *Priboostroenie*, 2011, no. 1, pp. 32–37.
3. **Yonggang Zhang et al.**, Modeling of Thermal-Induced Rate Error for FOG with Temperature Ranging from –40 to +60 °C, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 305–310.
4. **Quatraro, E., Pizzarulli, A., Catasta, M., Crescenti, G., Spinozzi, E., and Cingolani, A.** High Performance FOG for Non Temperature Stabilized Environment, *Inertial Sensors and Systems – Symposium Gyro Technology*, 20–21 September, 2011, Karlsruhe, Germany.
5. **Dzhashitov, V.E. and Pankratov, V.M.**, *Matematicheskie modeli teplovogo dreifa giroskopicheskikh datchikov inertial'nykh sistem* (Mathematical Models of Thermal Drift of Gyroscopic Sensors in Inertial Systems), Peshekhonov, V.G., Ed., St. Petersburg, Elektropribor, 2001.
6. **Dzhashitov, V.E., and Pankratov, V.M.**, *Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priboroostroeniya v usloviyakh teplovykh vozdeistvii* (Sensors, Instruments and Systems for Aerospace and Marine Instrument-Engineering in Conditions of Thermal Effects), Peshekhonov, V.G., Ed., St. Petersburg, Elektropribor, 2005.
7. **Dzhashitov, V.E., Pankratov, V.M., Golikov, A.V., Gubanov, A.G., and Efremov, M.V.**, Reducing Thermal Sensitivity of a Fiber-Optic Gyros, *Gyroscopy and Navigation*, 2012, no. 1, pp. 56–65.
8. **Kolevatov, A.P., Nikolaev, S.G., Andreev, A.G., Ermakov V.S. et al.**, Progress in the Development of Strapdown Inertial Navigation Systems on Fiber-Optic Gyroscopes, *16<sup>th</sup> St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2009, pp. 12–17.
9. **Dzhashitov, V.E., Pankratov, V.M., and Barulina, M.A.**, Mathematical Models of the Thermoelastic Stress-Strain State and the Scale Factor Error of Fiber Optic Gyro Sensor, *Problemy mashinoostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 2, pp. 43–52.
10. **Dranitsyna, E.V., Egorov, D.A., Untilov, A.A., Deineka, G.B., Sharkov, I.A., and Deineka I.G.**, Reducing the Effect of Temperature Variations on FOG Output Signal, *Gyroscopy and Navigation*, 2013, no. 2, pp. 92–98.
11. **Pylaev, Yu.K., Gubanov, A.G., Yefremov, M.V., Kruglov, S.A., and Romanov, A.V.**, Fiber-Optic Gyroscope for Space Applications. Designing, Production and Operating Experience, *20<sup>th</sup> St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2013, pp. 50–58.
12. **Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E. et al.**, Navigation-Grade Interferometric Fiber Optical Gyroscope, *14<sup>th</sup> St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2007, pp. 138–143.
13. **Meshkovskii, I.K., Strigalyov, V.E., Deineka, G.B., Peshekhonov, V.G. et al.**, Three-axis Fiber-Optical Gyroscope. The Results of Development and Tests, *18<sup>th</sup> St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg: Elektropribor, 2011, pp. 7–12.
14. **Lefevr, E.K.**, The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement and Perspective, *Gyroscopy and Navigation*, 2012, no. 4, pp. 223–226.
15. **Dzhashitov, V.E., Pankratov, V.M., Golikov, A.V., Nikolaev, S.G., Kolevatov, A.P., Plotnikov, A.D., and Koffer, K.V.**, Hierarchical Thermal Models of FOG-based Strapdown Inertial Navigation System, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, no. 3, pp. 162–173.
16. **Dzhashitov, V.E., and Pankratov, V.M.**, Using the Method of Elementary Balances for Analysis and Synthesis of the Thermal Control System for FOG SINS based on Peltier Modules, *Gyroscopy and Navigation*, 2014, no. 4, pp. 245–256.
17. **Dzhashitov, V.E., and Pankratov, V.M.**, Control of Temperature Fields of a FOG-based Strapdown INS, *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2014, no. 4, pp. 565–575.
18. **Dul'nev, G.N., Parfenov, V.G., and Sigalov, A.V.**, *Metody rascheta teplovogo rezhima priborov* (Methods for Calculating the Thermal Conditions of Devices), Moscow: Radio i svyaz', 1990.
19. **Ingberman, M.I., Fromberg, E.M., and Graboi L.P.**, *Termostatirovanie v tekhnike svyazi* (Thermostating in Communication Technology), Moscow: Svyaz', 1979.

Материал поступил 26.06.2017