

В. Э. ДЖАШИТОВ, В. М. ПАНКРАТОВ, А. В. ГОЛИКОВ,
С. Г. НИКОЛАЕВ, А. П. КОЛЕВАТОВ, А. Д. ПЛОТНИКОВ, К. В. КОФФЕР

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ МОДЕЛИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

Построены и исследованы иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами. Построены и идентифицированы модели теплового дрейфа гироскопов и акселерометров по экспериментальным выходным сигналам, разработаны подходы к минимизации и алгоритмической компенсации теплового дрейфа. Проведена температурная калибровка по сигналам термодатчиков на основе построенных математических моделей термокомпенсации, осуществлена минимизация дрейфа гироскопов.

Введение и постановка задач

Проблема существенного повышения точности современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) с акселерометрами и волоконно-оптическими гироскопами является актуальной [1–8].

Объект исследования – БИНС Пермской научно-производственной приборостроительной компании, предназначенная для использования в системах управления, навигации и стабилизации подвижных объектов.

Цель работы – построение и исследование иерархических математических моделей тепловых процессов БИНС и ее элементов, анализ температурной ситуации и путей повышения точности пассивными методами.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- построение и анализ адекватных математических моделей тепловых процессов всей БИНС (верхний уровень иерархии) и отдельных волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и акселерометров (нижний уровень иерархии) в составе БИНС с учетом выходных сигналов этих чувствительных элементов (ЧЭ);

Джашитов Виктор Эммануилович. Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией Института проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Панкратов Владимир Михайлович. Доктор технических наук, профессор, зам. директора по науке Института проблем точной механики и управления РАН. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Голиков Алексей Викторович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН

Николаев Станислав Георгиевич. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Колеватов Андрей Петрович. Кандидат технических наук, начальник сектора ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Плотников Александр Дмитриевич. Аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Коффер Кирилл Викторович. Аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Статья по докладу на XXVIII конференции памяти Н.Н.Острякова.

- построение и идентификация моделей теплового дрейфа гироскопов и акселерометров в составе БИНС по экспериментально полученным выходным сигналам, разработка подходов к минимизации и алгоритмической компенсации теплового дрейфа;
- температурная калибровка БИНС по сигналам термодатчиков на основе построенных математических моделей термокомпенсации и минимизация дрейфа гироскопов.

Для построения и исследования математических моделей нестационарных тепловых процессов сложных многокомпонентных БИНС и ее элементов применяется хорошо апробированный модифицированный метод элементарных балансов, основные положения и алгоритмы которого представлены в работах [2, 3, 6].

Суть его в том, что блок приборов, устройство разбиваются на элементарные объемы со своими тепловыми связями, теплофизическими характеристиками и возможными источниками тепла. Далее на основе фундаментальных законов теплопроводности, конвекции и излучения составляются алгоритмы и уравнения тепловых балансов. Реализованные на компьютере в комплексах программ эти алгоритмы позволяют рассчитывать температурные поля в каждом объеме с течением времени.

Объекты исследования представлены на рис. 1.

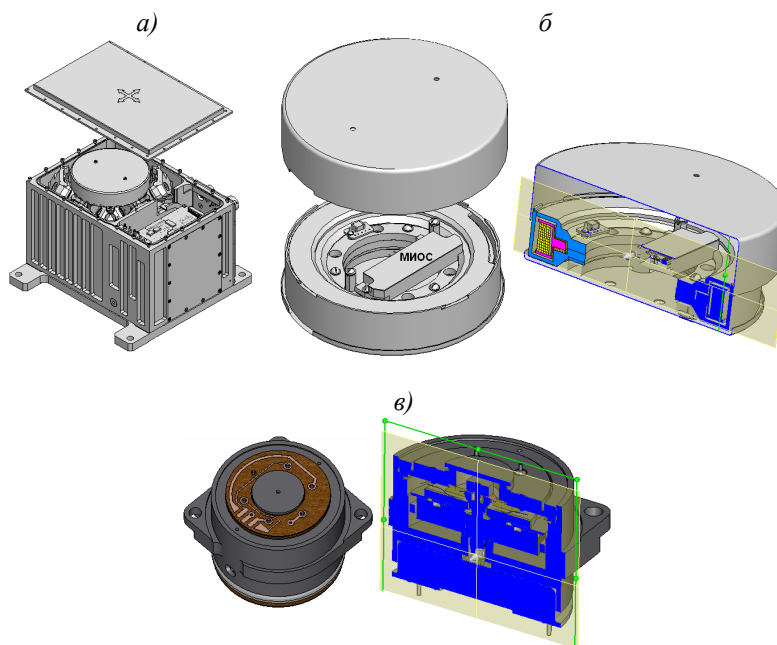


Рис. 1. Объекты исследования: а) на верхнем уровне иерархии – весь блок БИНС; б), в) на нижнем уровне иерархии – ВОГ и акселерометр

1. Тепловой анализ всей БИНС

Объект исследования– БИНС, содержащая три ВОГ, три акселерометра, корпус БИНС, корпус с амортизаторами, на котором крепятся гироскопы и акселерометры, этажерную конструкцию с электронными платами и другие элементы.

Основные элементы БИНС, существенные для исследования в ней тепловых процессов, ее укрупненная и детализированная в части этажерной конструкции тепловая модель с нумерацией объемов и основными тепловыми связями показаны на рис.2.

Гироскопы и акселерометры жестко закреплены на гранях кубического корпуса. Этот корпус прикреплен в четырех местах (два крепления вверху и два внизу по диагоналям граней) через амортизаторы к корпусу БИНС. Базовая конструкция БИНС выполнена без системы термостатирования и без принудительной вентиляции. Теплоотвод БИНС – пассивного типа через корпус в окружающую среду и через узлы крепления к термоплате с заданной температурой. В базовой конструкции предусмотрено тепловое шунтирование тепловыделяющих элементов плат преобразователей напряжения и излучателя.

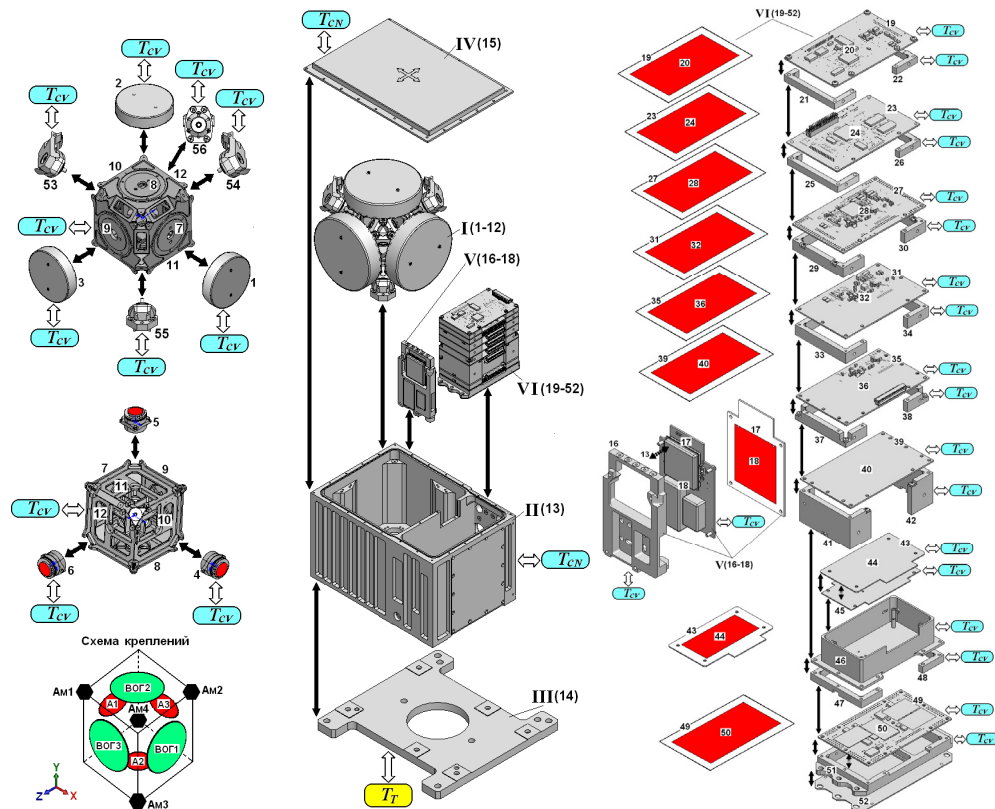


Рис. 2. Тепловая модель БИНС с декомпозицией на объемы: I (1–12) – корпус с ЧЭ в сборе – ВОГ (1–3), акселерометры (4–6), корпус для ЧЭ (7–12), амортизаторы (53–56); II (13), III (14), IV (15) – корпус, дно и крышка БИНС; V (16–18) – преобразователь напряжения в сборе (16–18); VI (19–52) – стойка с платами; T_{cv} , T_{cn} , T_t – температуры среды внутри и снаружи БИНС и термоплат; $\longleftrightarrow$ – тепловые связи между объемами; $\rightleftharpoons$ – тепловые связи с окружающей средой

Окружающая среда – воздух (азот) при заданном давлении. Температура среды и термоплат изменяется по заданному закону с течением времени. Предельный диапазон изменения температуры среды и термоплат $-60 \dots +60^\circ\text{C}$.

В соответствии с разработанной общей методикой [2, 3, 6] и конструктивными особенностями БИНС разбивается на твердотельные элементарные объемы. Мощности внутренних источников тепла в БИНС представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Мощности источников тепла в БИНС

Источники тепла в БИНС		Мощность, Вт, не более
1	Акселерометр 1х (объем 4)	0,4
2	Акселерометр 2у (5)	0,4
3	Акселерометр 3z (6)	0,4
4	Плата (18) шунт	1,41
5	Плата (20)	1,4
6	Плата (24)	1,5
7	Плата (28)	0,3
8	Плата (32)	0,75
9	Плата (36)	0,75
10	Плата (40)	0,75
11	Плата излучателя (44) шунт	0,9
12	Плата (50) шунт	1,45
Σ		10,41

Важные особенности построенной тепловой модели БИНС

- Коэффициенты теплопроводимости между объемами тепловой модели рассчитываются по формулам для неоднородных многослойных или однородных структур [2 6].
- Учет в теплопроводимостях от элементов БИНС в окружающую среду теплоотдачи кондукцией (места крепления к термоплате), излучением и свободной конвекцией при наличии силы тяжести и атмосферного давления [2, 6].
- Возможность учета внутренних источников тепла.
- Для более полного анализа тепловых процессов и проверки адекватности математической модели тепловых процессов предусмотрено моделирование различных заданных (линейно-ступенчатых, гармонических и др.) законов изменения температуры среды.
- Наряду с расчетом нестационарных полей температур $T_i(t)$ по объему БИНС в тепловой модели предусмотрен расчет производных температур $\dot{T}_i(t)$, заданных температурных перепадов между элементами и их производных.

Построенная и реализованная в программном комплексе BINS-C++ математическая модель позволила провести тепловой анализ БИНС.

Проверка адекватности построенной модели на верхнем уровне иерархии и расчет температурного поля БИНС при нестационарном изменении температуры среды

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных в условиях линейно-ступенчатого изменения температуры среды показаны на рис. 3.

Как видим, построенные модели тепловых процессов в БИНС достаточно хорошо отражают температурную ситуацию в блоке, и их можно считать адекватными реальным физическим процессам.

Полные картины нестационарных температурных полей $T_i(t)$ всех элементов БИНС и их производных в режиме линейно-ступенчатого изменения внешней температуры $T_c(t)$ показаны на рис. 4. Здесь $T_s(t)$ – экспериментальные значения температур гироскопов и акселерометров в составе БИНС.

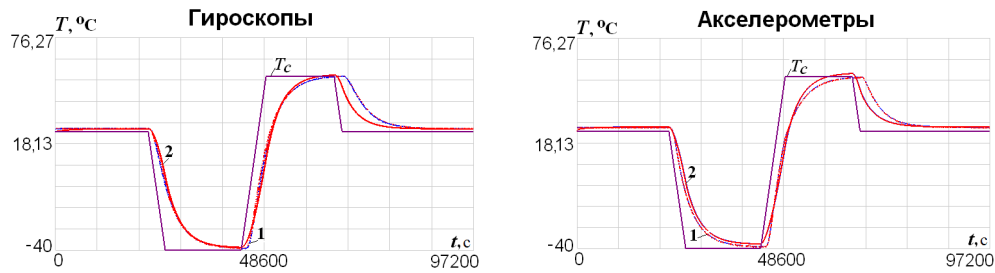


Рис. 3. Текущие температуры в акселерометрах и гироскопах БИНС при моделировании тепловых процессов на верхнем уровне иерархии: 1 – эксперимент; 2 – модель; T_c – температура среды

В процессе моделирования тепловых процессов всей БИНС при линейно-ступенчатых тепловых воздействиях $(+25 \dots -40 \dots +55 \dots +25)^\circ\text{C}$ по заданной циклограмме выявлено, что максимальные перегревы над температурой среды и термоплаты могут достигать $\sim 21^\circ\text{C}$ на незашунтированных верхних платах. Максимальные значения производных от температуры по времени $\sim 0,04^\circ\text{C}/\text{с}$, максимальные перепады температур между гироскопами и акселерометрами $\sim 4\text{--}6^\circ\text{C}$, максимальные значения перепадов температур между гироскопами и корпусом $\sim 18\text{--}25^\circ\text{C}$.

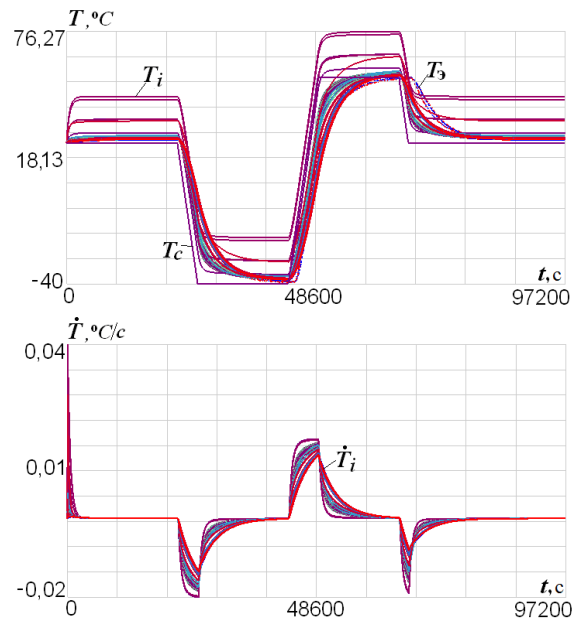


Рис. 4. Текущие температуры и их производные во всех элементах БИНС на верхнем уровне иерархии при линейно-ступенчатых изменениях температуры среды

Построение и идентификация модели теплового дрейфа ВОГ и акселерометров в составе БИНС по экспериментально полученным выходным сигналам

Для решения этой задачи важным является вопрос о корреляции выходных сигналов гироскопов и акселерометров с температурными характеристиками.

Экспериментальные данные по выходным сигналам ЧЭ и соответствующие им рассчитанные на модели данные по тепловым процессам показаны на рис.5.

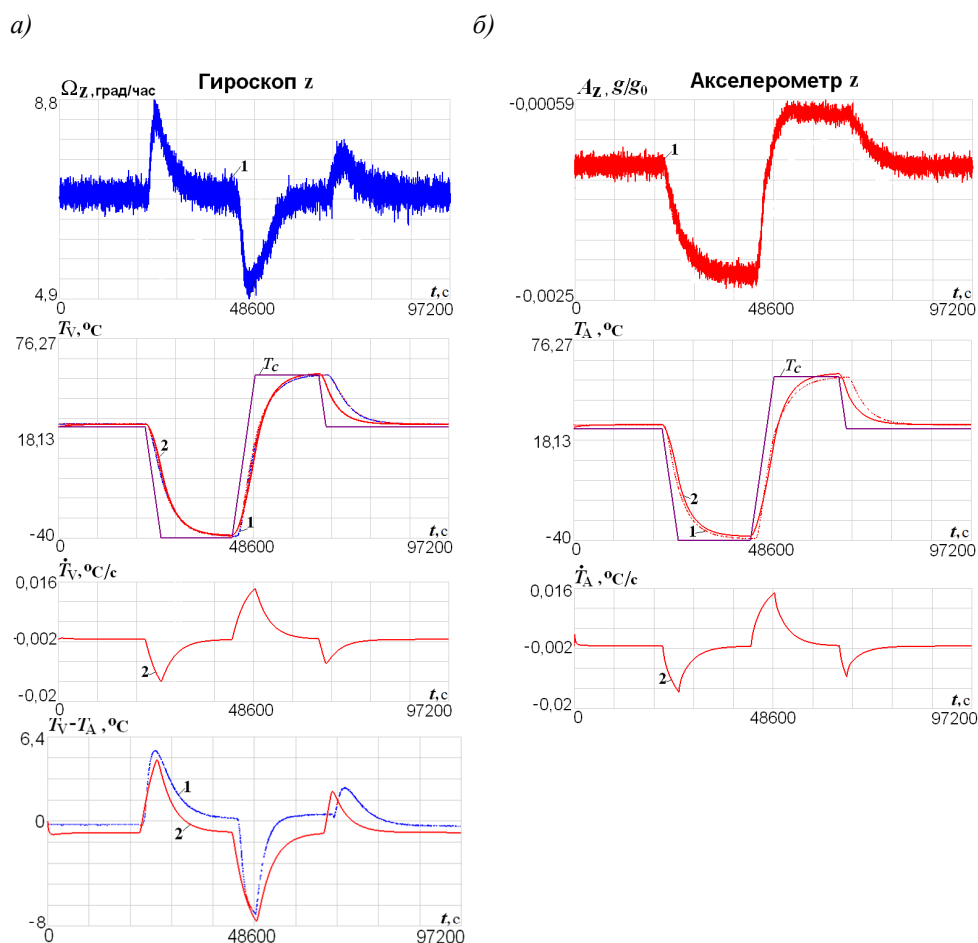


Рис. 5. Выходные сигналы и характеристики тепловых процессов в ВОГ (а) и акселерометрах (б) БИНС на верхнем уровне иерархии: 1 – эксперимент; 2 – математическая модель

Характер изменения дрейфа гироскопов *коррелируется* с характером изменения температурных перепадов между гироскопами и акселерометрами, между гироскопами и корпусом и характером изменения производной по времени от температуры гироскопов. Характер изменения дрейфа акселерометров *коррелируется* с характером изменения их температуры.

Для построения математических моделей теплового дрейфа гироскопов и акселерометров воспользуемся методами регрессионного анализа [9].

Полученные качественные оценки позволяют приближенно представить модели теплового дрейфа гироскопа и акселерометра БИНС в следующем линейном виде (уравнение регрессии):

$$y(t) = b_0 + b_1 x(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – изменяющийся фактор (температура, ее производная по времени, температурный перепад), $y(t)$ – функция отклика (дрейф гироскопа или акселерометра), b_0 , b_1 – коэффициенты модели.

Задача идентификации модели (1) теплового дрейфа заключается в определении неизвестных коэффициентов b_0 , b_1 по полученным экспериментально и

численно зависимостям $y(t)$, $x(t)$. Эти зависимости представляются в дискретном виде $y_i(t_i)$, $x_i(t_i)$, где $i = 1, 2, \dots, N$; N – число точек разбиения.

Для решения задачи идентификации применим метод наименьших квадратов (МНК) [9]. Согласно МНК формулы для коэффициентов модели:

$$b_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum y_i x_i \sum x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad b_1 = \frac{N \sum y_i x_i - \sum y_i \sum x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (2)$$

После проведения расчетов и решения задач идентификации в соответствии с (1), (2) и численными данными рис. 5 получены следующие математические модели теплового дрейфа:

А) Модель дрейфа гироскопа по производной от температуры, $x = \dot{T}_V$ [°C/c], $y = \Omega_1(\dot{T}_V)$ [град/ч]:

$$\Omega_1(\dot{T}_V) = 6,9 - 120,7 \cdot \dot{T}_V. \quad (3)$$

Б) Модель дрейфа гироскопа по температурному перепаду между гироскопом и акселерометром, $x = \Delta T_{VA} = T_V - T_A$ [°C], $y = \Omega_2(\Delta T_{VA})$ [град/ч]:

$$\Omega_2(T_V - T_A) = 6,97 + 0,24 \cdot (T_V - T_A). \quad (4)$$

В) Модель дрейфа акселерометра по температуре, $x = T_A$, $y = A(T_A)$ [g/g₀]:

$$A(T_A) = -0,001543 + 0,000013 \cdot T_A. \quad (5)$$

Графическое решение задач идентификации показано на рис. 6.

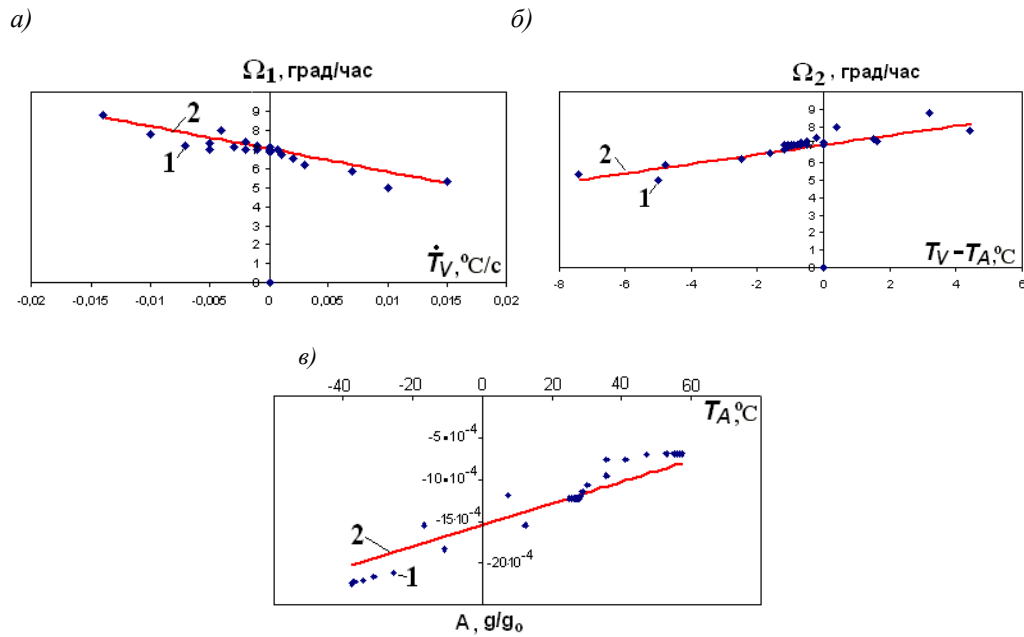


Рис. 6. Модели теплового дрейфа гироскопа (а), (б) и акселерометра (в):
1 – эксперимент; 2 – математическая модель

Построенные и идентифицированные модели (3)–(5) позволяют получить количественные оценки и разработать подходы к минимизации теплового дрейфа.

Например, согласно (3) составляющая теплового дрейфа гироскопа $\Omega_1(\dot{T}_V) \approx 0,1$ град/ч обуславливается изменениями температуры $\dot{T}_V \approx 3^\circ\text{C}/\text{ч}$. Или, например, согласно (4), составляющая теплового дрейфа гироскопа $\Omega_2(T_V - T_A) \approx 0,1$ град/ч обуславливается температурными перепадами $(T_V - T_A) \approx 0,4^\circ\text{C}$.

Отсюда становятся понятными примерные требования к термодатчикам по скорости и точности измерения температуры для обеспечения компенсации составляющих теплового дрейфа.

Что касается теплового дрейфа акселерометра, то согласно модели (5) он составляет $g/g_0 \approx 0,05\text{--}0,08\%$, при температуре $T_A = -40\dots+60^\circ\text{C}$.

2. Тепловой анализ гироскопов и акселерометров в составе БИНС

По результатам моделирования всей БИНС все ЧЭ находятся в одинаковой температурной ситуации по перегревам, перепадам температуры и их производным.

Поэтому для построения и исследования математической модели тепловых процессов может быть выбран ВОГ и акселерометр с измерительной вертикальной осью y (базовая ориентация относительно g) или с горизонтальными измерительными осями x, z , и это будет учитываться в построенной модели.

Таким образом, объекты исследования на нижнем уровне иерархии:

- волоконно-оптический гироскоп, содержащий многофункциональную интегральную оптическую схему (МИОС), корпус и другие элементы;
- акселерометр, содержащий маятник, магнит, усилитель, корпус и другие элементы.

В соответствии с разработанной общей методикой [2, 3, 6] и конструктивными особенностями ВОГ и акселерометр разбиваются на твердотельные элементарные объемы. Основные элементы ВОГ и акселерометра, существенные для исследования в них тепловых процессов, их тепловые модели, с нумерацией объемов и основными тепловыми связями представлены на рис. 7 и 8.

В рассматриваемой конструкции ВОГ *отсутствуют* внутренние источники тепла, так как тепловыделение МИОС, входящей в состав волоконно-оптического гироскопа, составляет микроватты, что пренебрежимо мало по сравнению с мощностями других элементов БИНС (см. табл. 1).

В акселерометре *имеются* внутренние источники тепла: усилитель – IX(67) – мощность до 0,2 Вт; намотка провода – V(32-37) – мощность до 0,2 Вт.

Базовые конструкции гироскопов и акселерометров выполнены без системы термостатирования и принудительной вентиляции. Температура окружающей среды для ЧЭ может изменяться по заданному *ступенчатому, гармоническому, линейному, экспоненциальному* или другому закону с течением времени в предельном диапазоне $-60\dots+60^\circ\text{C}$. Температура корпуса для ЧЭ рассчитывалась на модели верхнего уровня и мало отличается (выше на $1\div 2^\circ\text{C}$) от температуры термоплаты БИНС. Конструкция МИОС ВОГ может быть выполнена как в корпусе с крышкой, так и без корпуса и крышки.

Особенности построенных тепловых моделей гироскопов и акселерометров в основном такие же, как для модели всей БИНС. Дополнительно возможен учет в тепловых моделях ориентации относительно g , учет конструктивного исполнения МИОС в корпусе и без него, предусмотрена возможность варьирования коэффициентов теплопроводности в окружающую среду от основных элементов гироскопов и акселерометров, возможность обеспечения связи между моделями тепловых процессов на верхнем (БИНС) и нижнем (гироскоп и акселерометр) уровнях иерархии и др.

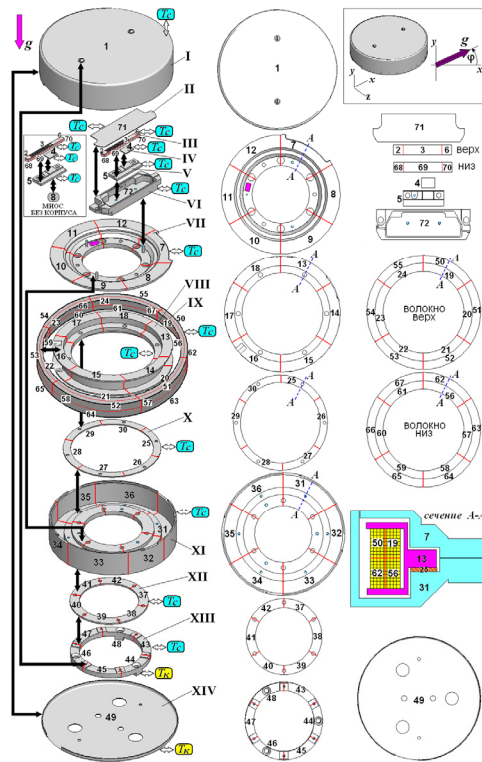


Рис. 7. Тепловая модель ВОГ с МИОС с декомпозицией на объемы: I (1) – ЕКРАН-ТОР2; элементы МИОС: II (71) – крышка, III (2,3,6,68,69,70) – модулятор, IV (4) – плата, V (5) – подставка, VI (72) – корпус; VII (7-12, 11-термодатчик) – внутренний корпус; VIII (13-18) – катушка для волокна; IX (19-24, 50-55, 56-61, 62-67) – волоконная бухта; X (25-30) – прокладка; XI (31-36) – внешний корпус; XII (37-42) – промежуточное кольцо; XIII (43-48) – посадочное кольцо; XIV (49) – дно; T_C , T_K – температуры окружающей среды и корпуса для крепления ЧЭ; $\longleftrightarrow$ – тепловые связи между объемами; $\longleftrightarrow$ – тепловые связи с окружающей средой

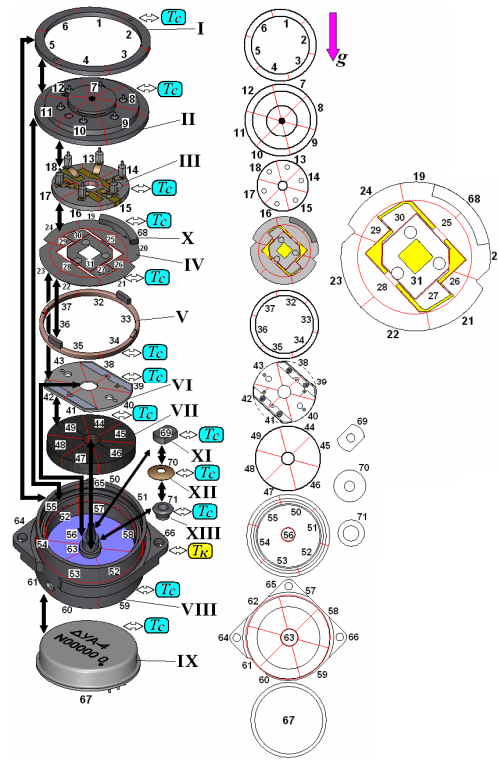


Рис. 8. Тепловая модель акселерометра с декомпозицией на объемы: I (1-6) – гайка; II (7-12) – крышка; III (13-18) – подложка с пружинами и контактами; IV (19-31) – маятник; V (32-37) – намотка провода; VI (38-43) – пластина; VII (44-49) – магнит; VIII – корпус (50-66); IX (67) – усилитель; X (68) – груз; XI (69) – гайка на оси корпуса; XII (70) – пружина на оси корпуса; XIII (71) – втулка на оси корпуса; T_C , T_K – температуры среды и корпуса для крепления ЧЭ; $\longleftrightarrow$ – тепловые связи между объемами; $\longleftrightarrow$ – тепловые связи с окружающей средой

Реализованные в программных комплексах VOG-C++, AKS-C++ математические модели позволили провести тепловой анализ ЧЭ в составе БИНС.

Проверка адекватности построенной модели на нижнем уровне иерархии

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных в условиях линейно-ступенчатого изменения температуры среды показаны на рис. 9.

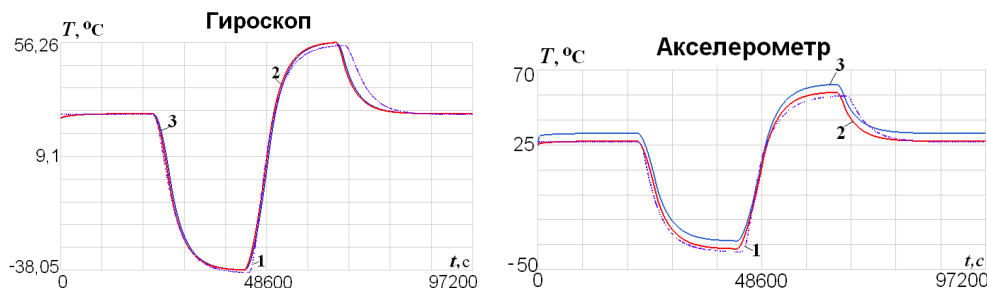


Рис. 9. Текущие температуры в акселерометрах и гироскопах при моделировании на нижнем уровне иерархии: 1 – температура гироскопа или акселерометра, полученная в эксперименте с БИНС; 2 – температура корпуса для крепления ЧЭ, полученная на тепловой модели БИНС верхнего уровня иерархии; 3 – температура в месте расположения термодатчика гироскопа или акселерометра, полученная на их тепловых моделях нижнего уровня иерархии

Построенные модели тепловых процессов в ВОГ и акселерометре на нижнем уровне иерархии полностью отражают температурную ситуацию в этих ЧЭ, и их можно считать адекватными реальным физическим процессам.

Моделирование на нижнем уровне иерархии тепловых процессов с учетом выходных сигналов, выявило следующее (рис. 10).

Температуры в ВОГ – не выше 57°C и не ниже -39°C при его нагреве или охлаждении по заданной циклограмме в пределах $+55 \dots -40^{\circ}\text{C}$. Среди рассмотренных температурных перепадов в зоне волоконной бухты гироскопа наибольшего значения достигает перепад между катушкой и волокном $\sim 1,25^{\circ}\text{C}$.

Температуры в акселерометре, содержащем внутренние источники тепла $< 0,4$ Вт не более 65°C и не менее -37°C при его нагреве или охлаждении по заданной циклограмме в пределах $+55 \dots -40^{\circ}\text{C}$. Максимальный перегрев элементов акселерометра над температурой среды достигает $\Delta T_{\max} \approx 10^{\circ}\text{C}$.

Полученные данные существенно уточняют результаты моделирования тепловых процессов в акселерометре на верхнем уровне иерархии, когда акселерометр представлялся как один объем (тогда было получено $\Delta T_{\max} \approx 2^{\circ}\text{C}$).

Максимальные значения производных температур имеют место в моменты линейно-ступенчатого переключения заданных внешних тепловых воздействий и достигают для гироскопа $0,01^{\circ}\text{C}/\text{с}$, для акселерометра $0,03^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Выявлены следующие важные для идентификации и минимизации теплового дрейфа гироскопов и акселерометров БИНС обстоятельства:

- характер изменения дрейфа гироскопа коррелируется с характером изменения как производных по времени от температур элементов гироскопа, так и температурных перепадов;
- характер изменения дрейфа акселерометра коррелируется с характером изменения «абсолютных» температур элементов акселерометра.

Результаты полностью согласуются с данными, полученными на тепловой модели верхнего уровня (всего БИНС).

Применение корпуса для МИОС *улучшает* температурную ситуацию в ВОГ, перегрев между катушкой и волокном уменьшается на 8% по сравнению с МИОС без корпуса, снижается на 1% и средняя температура гироскопа.

Наиболее неблагоприятной с тепловой точки зрения ориентацией гироскопа и акселерометра относительно g является базовое положение $\varphi = -90^\circ$. В этом положении температурные характеристики акселерометра и гироскопа отличаются от «благоприятного» положения $\varphi = 90^\circ$ на $\sim 3\text{--}9\%$.

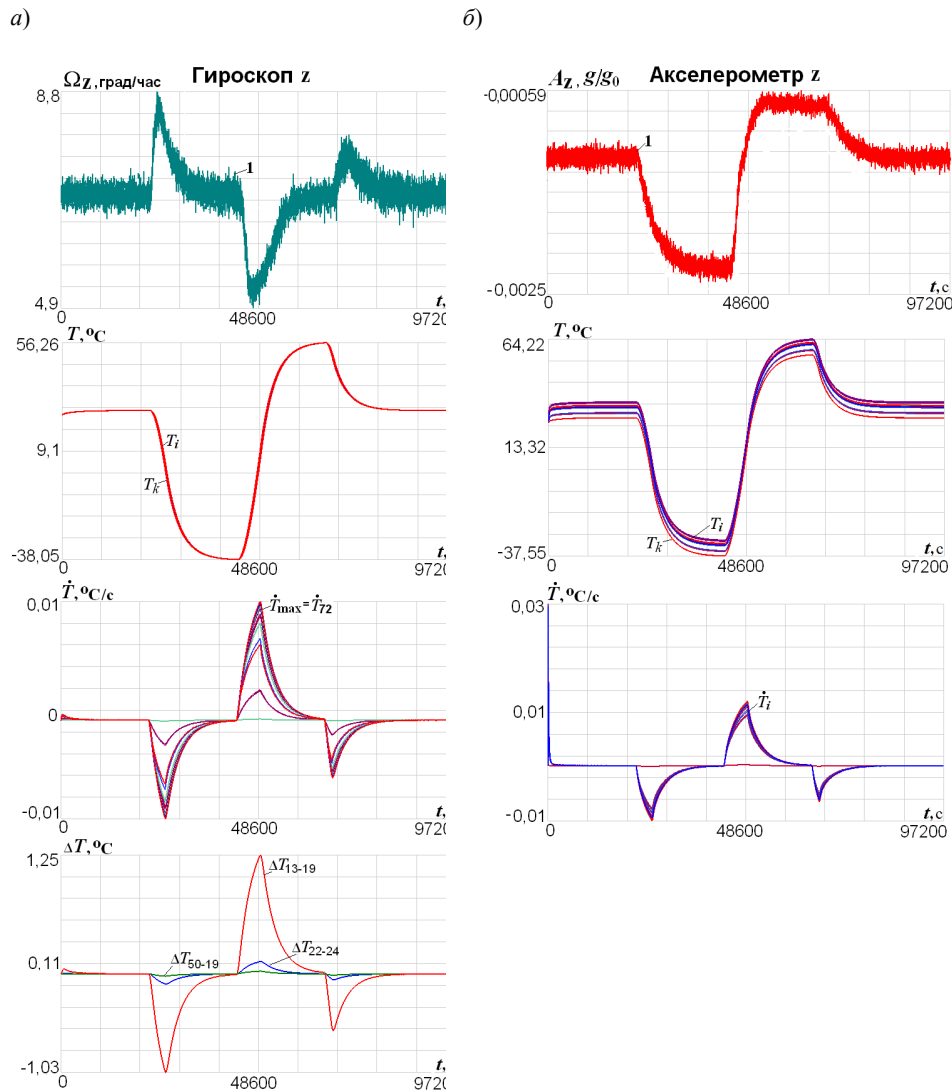


Рис. 10. Экспериментальные выходные сигналы (1) и характеристики тепловых процессов в ВОГ (а) и акселерометрах (б) БИНС при моделировании на нижнем уровне иерархии

На основании проведенных исследований представляется необходимым применение и методов алгоритмической термокомпенсации.

3. Температурная калибровка БИНС по сигналам термодатчиков на основе построенных математических моделей термокомпенсации и минимизация дрейфа гироскопов

Рассмотрим алгоритмическую компенсацию теплового дрейфа ВОГ по показаниям распределенной системы термодатчиков, позволяющей в реальном времени контролировать стационарное и нестационарное температурное поле.

Температурные испытания и моделирование

Температурные испытания БИНС проводятся с использованием специального оборудования: наклонно-поворотных столов типа Acutronic, оснащенных термокамерами.

Предполагается, что 6 термодатчиков установлены в волоконно-оптические гироскопы и акселерометры, 1 термодатчик крепится на внутренней стенке корпуса БИНС.

Линейно-ступенчатое изменение температуры среды по заданной циклограмме в пределах $+20 \dots -10 \dots +50 \dots +20^\circ\text{C}$. Температурные характеристики элементов БИНС при испытаниях и моделировании показаны на рис. 11.

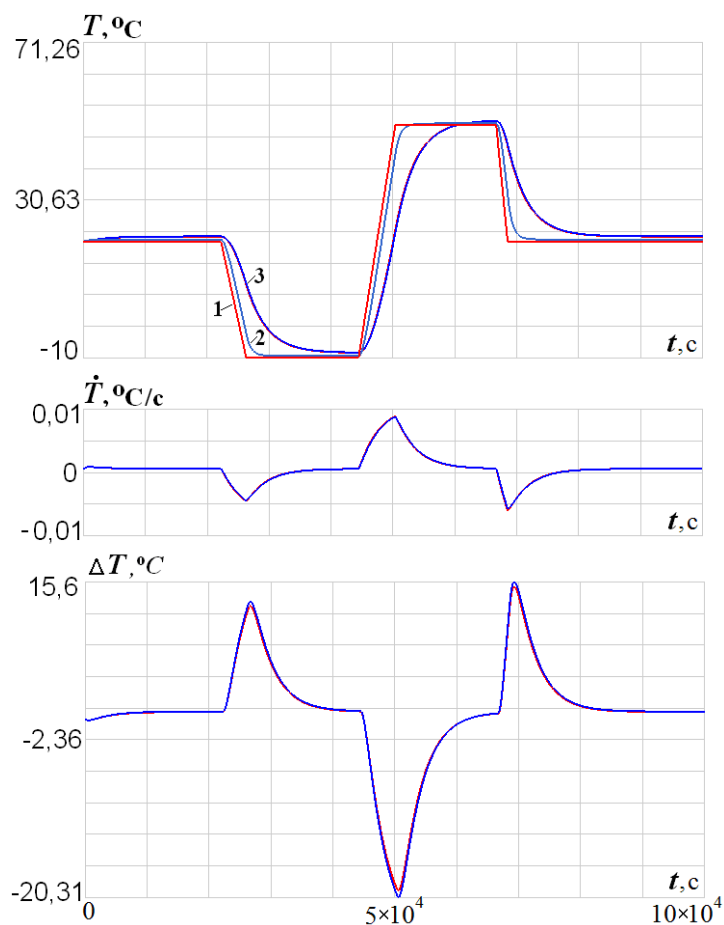


Рис. 11. Температурные характеристики элементов БИНС при испытаниях и моделировании: 1 – температура среды; 2, 3 – температуры внутренней стенки и гироскопов; dT/dt – производные температур гироскопов; ΔT – перепады температур между внутренней стенкой и гироскопами

В качестве параметров для построения алгоритма компенсации температурных погрешностей используются перепад температур, измеренных термодатчиком гироскопа и термодатчиком, установленным в выбранном месте внутри корпуса БИНС, и производная этого температурного перепада по времени, полученная численным дифференцированием в реальном времени.

Приняты следующие математические модели термокомпенсации:

- температурный перепад: $\Delta T_i = T_i - T_k$, где T_i – температура гироскопа ($i=x, y, z$); T_k – температура внутренней стенки корпуса;
- динамический температурный перепад: $\Delta T_{di} = \Delta T_i - \Delta T_{si}$, где ΔT_{si} – статический перепад температур между стенкой и каждым из трех гироскопов.
- остаточный дрейф: $\delta W_i = W_i - W_{ki}$, где W_i – исходные тепловые дрейфы гироскопов; W_{ki} – компенсирующие сигналы.

Зависимость статических температурных дрейфов гироскопов от статических перепадов принята в виде полиномов и определяется экспериментально:

$$W_{si}(\Delta T_{si}) = a_{0i} + a_{1i}\Delta T_{si} + a_{2i}\Delta T_{si}^2.$$

Формулы компенсирующего сигнала, представляющие собой различные варианты реализации алгоритма термокомпенсации температурного дрейфа из множества возможных вариантов:

$$W_{ki} = W_{si}(\Delta T_{si}) + d_{1i}\Delta T_{di}, \quad (6)$$

$$W_{ki} = W_{si}(\Delta T_{si}) + d_{1i}\Delta T_{di} + d_{2i}\Delta \dot{T}_{di}, \quad (7)$$

$$W_{ki} = W_{si}(\Delta T_{si}) + \sum_{n=1}^3 d_{1ni}(\Delta T_{di})^n + \sum_{n=1}^3 d_{2ni}(\Delta \dot{T}_{di})^n, \quad (8)$$

где коэффициенты корреляции d_{1i} динамических перепадов и дрейфов гироскопов находятся с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты термокомпенсации и минимизации теплового дрейфа представлены в табл. 2 и на рис. 12. Здесь σ – среднеквадратическое отклонение.

В результате компенсации по нелинейному алгоритму (8) среднеквадратическое отклонение остаточного дрейфа по отношению к исходному дрейфу уменьшилось более чем в 3 раза для гироскопа X; более чем в 10 раз для гироскопа Y; более чем в 2 раза для гироскопа Z.

Т а б л и ц а 2

Сравнительные характеристики алгоритмов компенсации

Алгоритм	Гироскоп X		Гироскоп Y		Гироскоп Z	
	град/ч					
	σ	Мах дрейф	σ	Мах дрейф	σ	Мах дрейф
До компенсации	0,0367	0,1650	0,0776	0,3121	0,0138	0,0826
Формула (6)	0,0245	0,1084	0,0170	0,0844	0,0089	0,0390
Формула (7)	0,0135	0,0651	0,0091	0,0540	0,0087	0,0392
Формула (8)	0,0100	0,0600	0,0056	0,0404	0,0060	0,0344

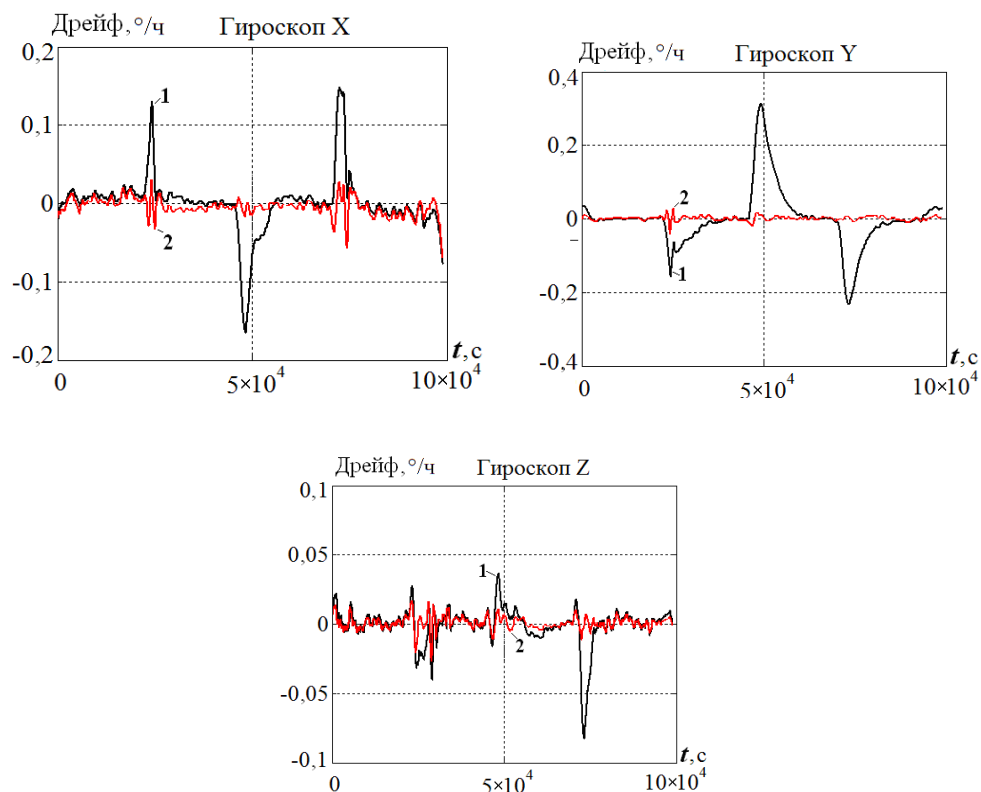


Рис. 12. Тепловой дрейф гироскопов: 1 – до компенсации; 2 – после компенсации (8)

Заключение

- Построены и исследованы иерархические математические модели тепловых процессов всей БИНС и отдельных ВОГ и акселерометров в составе БИНС с учетом выходных сигналов этих чувствительных элементов.
- Построены и идентифицированы модели теплового дрейфа гироскопов и акселерометров по экспериментально полученным выходным сигналам.
- Экспериментально и теоретически реализована температурная калибровка БИНС по сигналам термодатчиков на основе построенных математических моделей термокомпенсации, и проведена минимизация дрейфа гироскопов.
- Применение комплекса мер пассивного характера позволит, по данным моделирования, существенно улучшить температурную ситуацию в БИНС и ее чувствительных элементах. Достаточно эффективно применение теплового шунтирования и термокомпенсации среди других мер для достижения уровня точности $< 0,1$ град/ч.
- Для достижения инерциальной точности $< 0,01$ град/ч кардинальным решением, на взгляд авторов, является, наряду с термокомпенсацией и другими пассивными методами, применение реверсивных или нагревательных систем терморегулирования чувствительных элементов БИНС (особенно волоконно-оптических гироскопов). Данное утверждение требует проведения дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту 10-08-00119а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волоконно-оптические датчики.** Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. - М.: Техносфера, 2008. - 500 с.
2. **Джашитов, В.Э.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2005. - 404 с.
3. **Джашитов, В.Э.** Общая и прикладная теория гироскопов с применением компьютерных технологий / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. - 154 с.
4. **Волоконно-оптический гироскоп** навигационного класса точности / Ю.Н. Коркишко [и др.] // XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: «ЦНИИ «Электроприбор», 2007. - С.141-150.
5. **Успехи** в разработке БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов / А.П. Колеватов // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. - С.13-20.
6. **Обеспечение** термоинвариантности волоконно-оптического гироскопа / В.Э.Джашитов [и др.] //Гироскопия и навигация. - 2011. - № 4. - С. 42-56.
7. **Трехосный волоконно-оптический гироскоп.** Результаты разработки / И.К. Мешковский [и др.] // XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. - С.8-14.
8. **Сущенко, О.А.** Обзор современного состояния волоконно-оптических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, В.В. Пальчик //Электроника и системы управления. - 2011. - №3(29). - С.74-84.
9. **Адлер, Ю.А.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Изд. второе, переработ. и дополненное / Ю.А. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский.-М.: Наука, 1976. - 280 с.

Abstract. Hierarchical thermal models of strapdown inertial navigation system with fiber-optical gyros and accelerometers, fig.1-4, 7-9, tabl.1 are constructed and researched. Models of thermal drift of gyros and accelerometers on experimental output signals are constructed and identified. Approaches to minimization and algorithmic compensation of thermal drift, fig. 5, 6, 10, formulas (1)-(5) are developed. Temperature calibration on signals of thermal sensors on the basis of the constructed mathematical models thermal compensation is conducted, minimization of drift of gyros, fig. 11, 12 formulas (6) - (8), tabl.2 is realized .

Key words: hierarchical thermal models, strapdown inertial navigation system, fiber-optical gyro, accelerometer, thermal drift, algorithmic compensation