

*С.Ю. ПОГОРІЛОВ, В.Л. ХАВІН***МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЄЮ ПРИСКОРЕНОГО ПРОГРІВУ**

В даний час у сучасній авіаційно-космічній техніці широко використовуються безплатформні інерційні навігаційні системи (БІНС) на основі волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ). У зв'язку з високою чутливістю ВОГ до впливу змін температури забезпечення стабільних теплових режимів роботи є актуальною проблемою. Найважливішим завданням підвищення точності роботи системи є розробка способів теплового захисту та термостабілізації ВОГ. Робота присвячена моделюванню температурного поля безплатформного інерційного блоку (БІБ), що входить до складу БІНС з метою забезпечення мінімального перепаду температур на платформі ВОГ із застосуванням термостабілізації. Метою роботи є моделювання температурного поля вимірювального блоку БІБ та визначення умов, які забезпечують мінімум перепадів температур на платформі ВОГ в умовах термостабілізації. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: створення розрахункової схеми та кінцевоелементної моделі приладу БІБ, моделювання впливу зміни зовнішніх температур на температурне поле приладу БІБ, чисельне визначення температурних градієнтів у заданих точках приладу. За наслідками чисельного моделювання проведено дослідження параметрів температурного поля приладу, характеристик системи термостабілізації. Розглянуто тепловий режим приладу із системою термостабілізації для прискореного прогріву та зменшення градієнтів зміни температур на датчиках ВОГ з керуючим законом, відповідним змінам температури основи. Чисельно визначено температурні градієнти у заданих точках приладу. Встановлено, що закон термостабілізації має забезпечувати стабільність температурного поля (малість градієнта температури). Саме значення температури ВОГ істотно впливає на величину дрейфу не надає. Систему термостабілізації доцільно використовувати тільки для виведення системи на робочий температурний режим протягом не більше 30 хвилин, а в робочому режимі не використовувати.

**Ключові слова:** волоконно-оптичний гіроскоп; безплатформна інерційна навігаційна система; метод скінченних елементів; термостабілізація.

Currently, platformless inertial navigation systems (IBS) based on fiber optic gyroscopes (FOG) are widely used in modern aviation and space technology. In connection with the high sensitivity of VOG to the influence of temperature changes, ensuring stable thermal modes of operation is an urgent problem. The most important task of increasing the accuracy of system operation is the development of methods of thermal protection and thermostabilization of VOG. The work is devoted to the modeling of the temperature field of the platformless inertial unit (BIB), which is part of the BINS, in order to ensure a minimum temperature difference on the VOG platform with the use of thermal stabilization. The purpose of the work is to simulate the temperature field of the BIB measuring unit and determine the conditions that ensure a minimum of temperature differences on the VOG platform under thermal stabilization conditions. To achieve the goal, the following tasks were solved: creation of a calculation scheme and finite element model of the BIB device, modeling of the effect of changes in external temperatures on the temperature field of the BIB device, numerical determination of temperature gradients at given points of the device. According to the results of numerical modeling, the parameters of the temperature field of the device and the characteristics of the thermal stabilization system were studied. The thermal mode of the device with a thermostabilization system for accelerated heating and reduction of temperature change gradients on VOG sensors with a governing law corresponding to base temperature changes is considered. The temperature gradients at the given points of the device are numerically determined. It was established that the law of thermostabilization should ensure the stability of the temperature field (the smallness of the temperature gradient). The value of the VOG temperature itself does not have a significant effect on the amount of drift. It is advisable to use the thermal stabilization system only to bring the system to the working temperature mode for no more than 30 minutes, and not to use it in the working mode.

**Key words:** fiber optic gyroscope; strapdown inertial navigation system; finite element method; thermal stabilization.

**Вступ.** В даний час у сучасній авіаційно-космічній техніці широко використовуються безплатформні інерційні навігаційні системи (БІНС) на основі волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ).

У зв'язку із високою чутливістю ВОГ до впливу змін температури забезпечення стабільних теплових режимів їхньої роботи є актуальною проблемою. Найважливішим завданням підвищення точності роботи системи є розробка способів теплового захисту та термостабілізації ВОГ.

Ця робота присвячена моделюванню температурного поля безплатформного інерційного блоку (БІБ), що входить до складу БІНС з метою забезпечення мінімального перепаду температур на платформі ВОГ за умов застосування термостабілізації.

**Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.** До сучасних волоконно-оптичних гіроскопів пред'являються високі експлуатаційні вимоги, найважливішою з яких є забезпечення інерційної точності ВОГ менше 0.01 град/год за умов температур діапазону ( $-60...+60$ )°C, що істотно змінюються. [1]. Внаслідок цього виникає необхідність урахування кількісного впливу теплового на робочі характеристики ВОГ [2,3]. Істотно важливою є необхідність урахування

теплових впливів, що призводять до виникнення так званого теплового дрейфу (фіктивних, термічно індукованих змін показань приладу) та термічних деформацій елементів БІНС [1,3,4].

Для забезпечення необхідної точності ВОГ на практиці застосовують як пасивні методи боротьби з впливом температурного поля (термокомпенсація, спеціальні способи намотування волокна котушки ВОГ, теплове шунтування, конструктивні вдосконалення котушки ВОГ та ін.) [5,6,7], так і активні методи, які полягають у створенні багатоконтурних реверсивних систем терморегулювання як окремих ВОГ, і всієї БІНС. [1,8].

Найчастіше з метою підвищення точності вимірювання кутової швидкості волоконно-оптичними та лазерними гіроскопами використовується підхід, заснований на постобробці вимірювань кутової швидкості згідно з алгоритмічною моделлю, званою температурною моделлю помилок вимірювання. При цьому широкого поширення набуло використання залежності помилок виміру (дрейфів) волоконно-оптичного гіроскопа у вигляді полінома третього ступеня [9]. При реалізації цього підходу у пристроях для виміру кутової швидкості виникає проблема оцінки величини температурного градієнта.

Найбільший вплив на дрейф сигналу ВОГ має котушка волоконного контуру, який, хоч і не має власного тепловиділення, але дуже чутливий до зміни температури. При цьому градієнт і швидкість зміни температури значно більше впливають на дрейф корисного сигналу, ніж рівень температури. [10,11].

У роботі [12, 13] для волоконно-оптичного гіроскопа ОГУС501 температурний градієнт запропоновано визначати шляхом обчислення різниці між показаннями температурного датчика в заданій точці та температурного датчика, що знаходиться в іншій точці того ж об'єкта. Цей підхід використовується у даній роботі для чисельної оцінки градієнта температурного поля оригінальної системи БІБ за умов термостабілізації.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є моделювання температурного поля вимірювального блоку БІБ та визначення умов, які забезпечують мінімум перепадів температур на платформі ВОГ в умовах термостабілізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- створити розрахункову схему і скінченоеlementну модель приладу БІБ,
- здійснити моделювання впливу зміни зовнішніх температур на температурне поле приладу БІБ,
- чисельно визначити температурні градієнти в заданих точках приладу.

**Опис конструкції та фізичного процесу.** Спрощена геометрична модель БІБ (Рис.1,2), включає наступні компоненти:

1. тепловідвідну основу;
2. емулятор блоку електроніки;
3. 4 теплоізолюючі втулки;
4. платформа ВОГ;
5. 4 емулятори ВОГ, кожен з яких складається з основи ВОГ та кришки ВОГ;
6. бічні теплоприймаючі панелі та верхня кришка відсіку ВОГ (на малюнках не показано).

У процесі роботи БІБ мають місце такі теплові джерела (Рис.3):

– 3 джерела емулятора блоку електроніки, що являють собою три площини (з площею поверхні тепловиділення кожен по  $85 \text{ см}^2$ ), на кожній з яких здійснюється тепловиділення потужністю  $12 \text{ Вт}$ ;

– 4 джерела ВОГ, (у кожному ВОГ дві теплогенеруючі поверхні), що мають наступні характеристики тепловиділення:

а) установча поверхня ( $6.27 \text{ см}^2$ ) випромінюючого лазера на підставі ВОГ –  $1.2 \text{ Вт}$ ;

б) решта внутрішня поверхня основи ВОГ ( $71.74 \text{ см}^2$ ) –  $0.6 \text{ Вт}$ ;

– 4 елементи системи термостабілізації (площа поверхні тепловиділення  $27 \text{ см}^2$ ), розташовані на платформі ВОГ під місцями установки ВОГ потужністю по  $23 \text{ Вт}$ .

Фізичний процес теплопередачі моделювався таким чином:

Тепловідведення від комірок блоку електроніки на тепловідвідну основу здійснюється за допомогою кондуктивної теплопередачі;

Тепловідведення від платформи ВОГ на теплоприймаючі панелі та внутрішню поверхню тепловідвідної основи здійснюється за допомогою випромінювання платформи ВОГ на теплоприймаючі панелі, внутрішню поверхню тепловідвідної основи та кришку відсіку;

Теплообмін між теплоприймаючими панелями та тепловідвідною основою здійснюється за допомогою кондуктивної теплопередачі у місцях кріплення панелей до основи;

Теплообмін між контактуючими компонентами платформи ВОГ здійснюється за допомогою ідеального теплового контакту.

Внаслідок експлуатації ВОГ в умовах вакууму теплообмін з навколишнім середовищем не враховується, за винятком теплообміну нижньої площини теплопровідної основи, що задається у вигляді функції зміни температури.

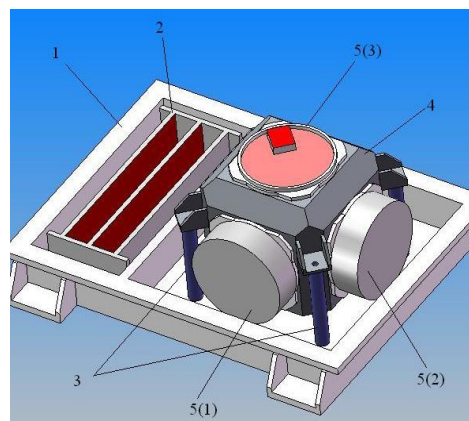


Рис.1. Геометрична модель з прибраними бічними панелями, верхньою кришкою відсіку ВОГ та кришкою гіроскопа №3.

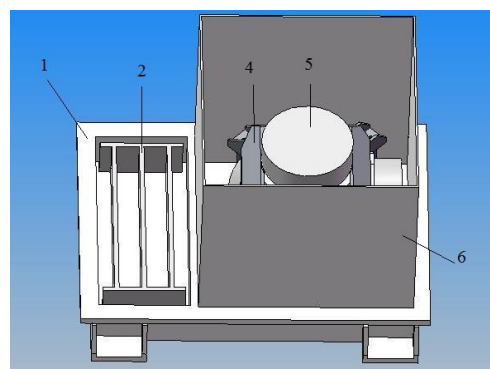


Рис.2. Геометрична модель без верхньої кришки відсіку ВОГ.

**Математична постановка задачі та метод вирішення.** Моделювання процесу теплопередачі та температурного поля в даній роботі здійснюється шляхом вирішення нестационарного завдання

теплопровідності у тривимірній постановці. Детально математична модель викладена у [13].

Як метод вирішення поставленої задачі теплопровідності було використано підхід, заснований на використанні методу скінчених елементів [14].

Скінчено-елементна модель БІБ складається з:

362392 елементів у вигляді 10-вузлового тетраедра для вирішення задачі теплопередачі;

54533 допоміжних плоских 4-вузлових елементів для збору параметрів випромінювання;

45867 допоміжних плоских 4-вузлових елементів для реалізації теплового контакту.

Скінчено-елементна сітка не оптимізувалась.

Тепловідведення випромінюванням з зовнішніх поверхонь платформи ВОГ та кришок ВОГ зі ступенем чорноти 0.89 здійснювалося на теплоприймаючі поверхні тепловідвідної основи, кришки відсіку та теплоприймаючі панелі, що мають ступінь чорноти 0.90. Тепловідведення через теплоізолюючі втулки було мінімізовано шляхом завдання малого коефіцієнта теплопровідності матеріалу.

Зовнішній теплообмін моделюється функцією зміни температури настановної площини тепловідвідної основи в часі.

### Результати моделювання.

Перевірка адекватності підходу шляхом порівняння з експериментом мала місце в [15,16], де порівнювалося температурне поле приладу аналогічного призначення, а саме кільцевого лазерного гіроскопа (КЛГ), отримане в результаті розрахунків за моделлю, створеною аналогічними методами, та результатами серій термографічних (теплових) знімків працюючого КЛГ.

Параметрами порівняння розрахункової моделі та отриманих в результаті експерименту термограм є якісний збіг виду температурного поля резонатора у всіх ракурсах, а також збіг значень температур моделі та термограм у вибраних точках.

За результатами моделювання теплового режиму приладу із системою термостабілізації для прискореного прогріву з використанням циклограми зміни зовнішньої температури у вигляді періодичної функції було проведено дослідження параметрів температурного поля (часу виходу на режим, величини перегріву, часових градієнтів, величини потужності керованих теплових джерел).

Для цього розрахункового експерименту були активовані такі теплові джерела:

1. два джерела емулятора блоку електроніки, далекі від відсіку платформи ВОГ;
2. 3 джерела ВОГ: ВОГ1, ВОГ2, ВОГ3.
3. 3 елементи системи термостабілізації, розташовані на платформі ВОГ у виточках під місцями установки ВОГ1, ВОГ2, ВОГ3 по 23Вт кожен.

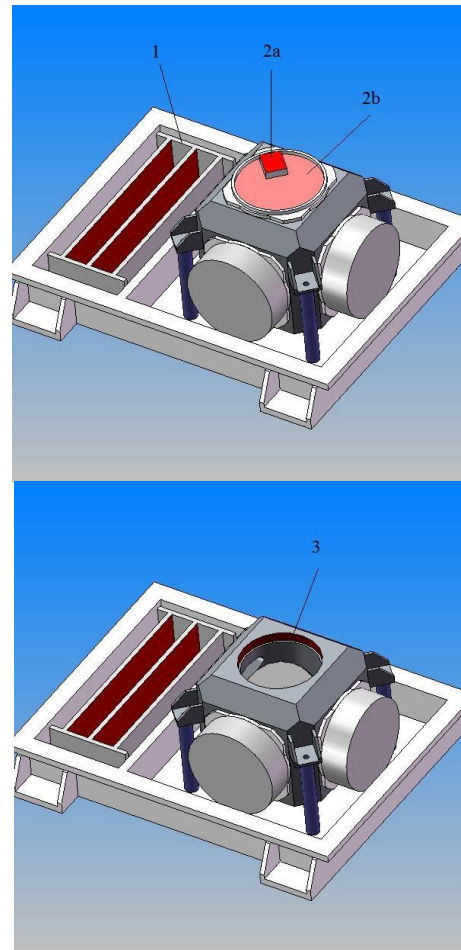


Рис.3. Теплові джерела.

У ході розрахункового експерименту вирішувалося нестационарне завдання теплопередачі тривалістю 17641 секунд (три цикли зміни по 98 хвилин) з постійним кроком 120 секунд. Розрахунковий експеримент проводився з початковими умовами, що відповідають нижній межі температурного діапазону експлуатації. Початкова температура моделі БІБ приймалася 268 К (-5 °С).

Температура тепловідвідної основи змінювалася за законом

$$T(t) = T_A * \sin(2 * \pi * t / t_{\max} + \varphi) + T_0, \quad (1)$$

де:

t, сек – час моделювання [0, 17641] секунд;

T<sub>A</sub>, град – амплітуда зміни температури, 20 градусів;

t<sub>max</sub>, сек – період зміни температури, 5880 секунд;

φ, рад – фаза зміни температури, 3 \* π / 4 рад;

T<sub>0</sub>, К – зсув температури, 288 К.

Модель системи термостабілізації описується наступним рівнянням:

$$\dot{Q}_{\text{стаб}}(T_{\text{ВОГ}}) = \begin{cases} 69, T_{\text{ВОГ}} < T_{\text{ЦЕЛ}} \\ 0, T_{\text{ВОГ}} \geq T_{\text{ЦЕЛ}} \end{cases}, \quad (2)$$

де

$\dot{Q}_{\text{стаб}}$ , Вт – сумарна потужність трьох активних елементів термостабілізації;

$T_{\text{ВОГ}}$ , градусів Кельвіна – середньо-арифметичне значення температур ВОГ1, ВОГ2, ВОГ3;

$T_{\text{ЦЕЛ}} = 298$  К – цільове значення середньої температури ВОГ, по досягненню якої прилад вважається прогрітим.

Управління всіма елементами термостабілізації відбувається одночасно.

У результаті розрахункового експерименту отримано такі результати.

Графіки зміни температур, представлені на Рис.4:

1. Графік зміни зовнішньої температури (TEMP\_ext\_0) у вузлі, який відповідає точці на нижній поверхні тепловідвідної основи на перетині діагоналей між місцями кріплень теплоізолюючих втулок. та температури ВОГ.
2. Графіки зміни температур на підставах ВОГ-ів (TEMP\_vog1\_b, TEMP\_vog2\_b, TEMP\_vog3\_b, TEMP\_vog4\_b).

З даних результатів видно, що стабілізація теплового режиму відбувається приблизно 1800 секунд, проти 3

циклами зміни зовнішньої температури (17640 з) без системи термостабілізації [13].

Також було отримано значення градієнтів температур для точок, зазначених вище:

1. Градієнт зовнішньої температури Grad\_ext\_0;
2. Градієнт температури основи ВОГ1-4 (Grad\_vog1\_b, Grad\_vog2\_b, Grad\_vog3\_b, Grad\_vog4\_b);

Градієнти зовнішньої температури та температури основи ВОГ1–ВОГ4 вважають методом диференціювання в часі, описаному в [12]. Градієнти зовнішньої температури та основи ВОГ1–ВОГ4 представлені на Рис.5.

З цих графіків видно, що градієнти ВОГ1-ВОГ4 не перевищують 0.27 градуси за хвилину після періоду прискореного прогріву.

Також було отримано графіки зміни потужності системи термостабілізації  $\dot{Q}_{\text{стаб}}$  в часі.

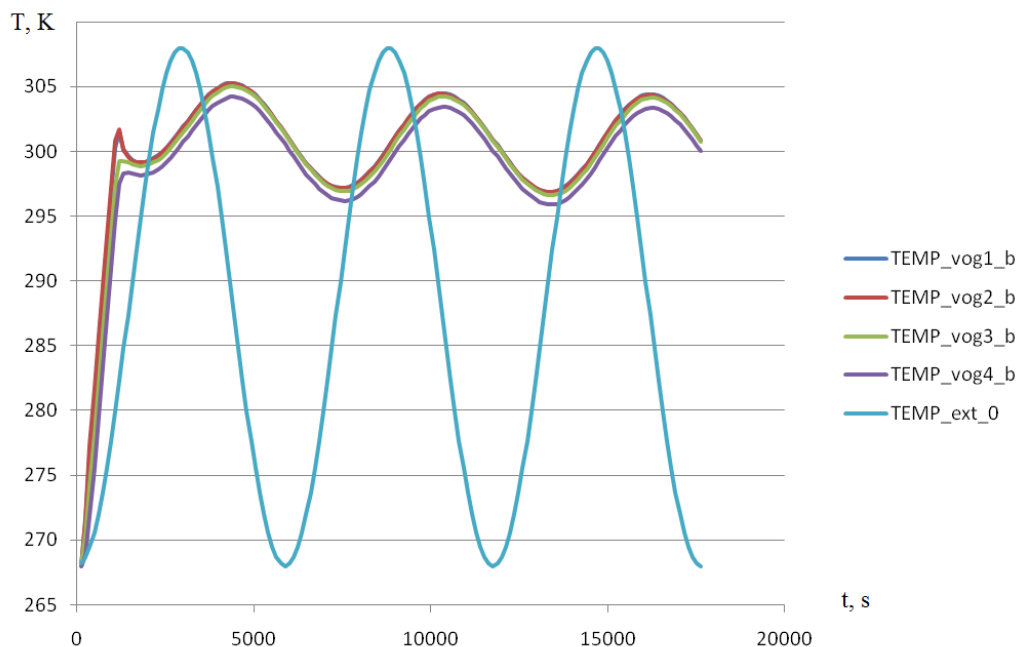


Рис.4. Зміна температури ВОГ та зовнішньої температури у часі.

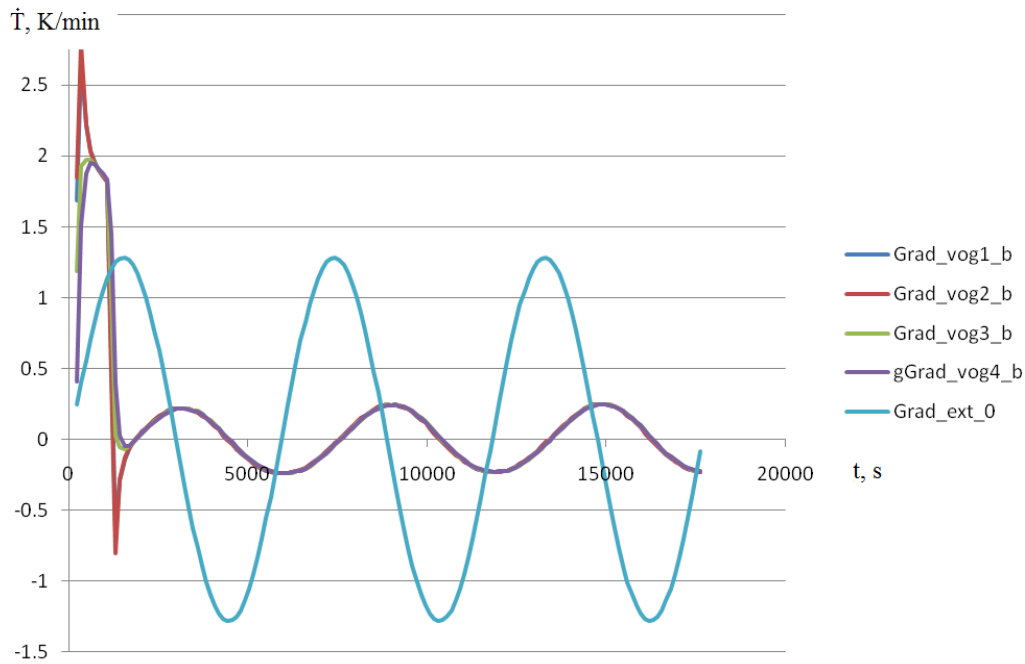
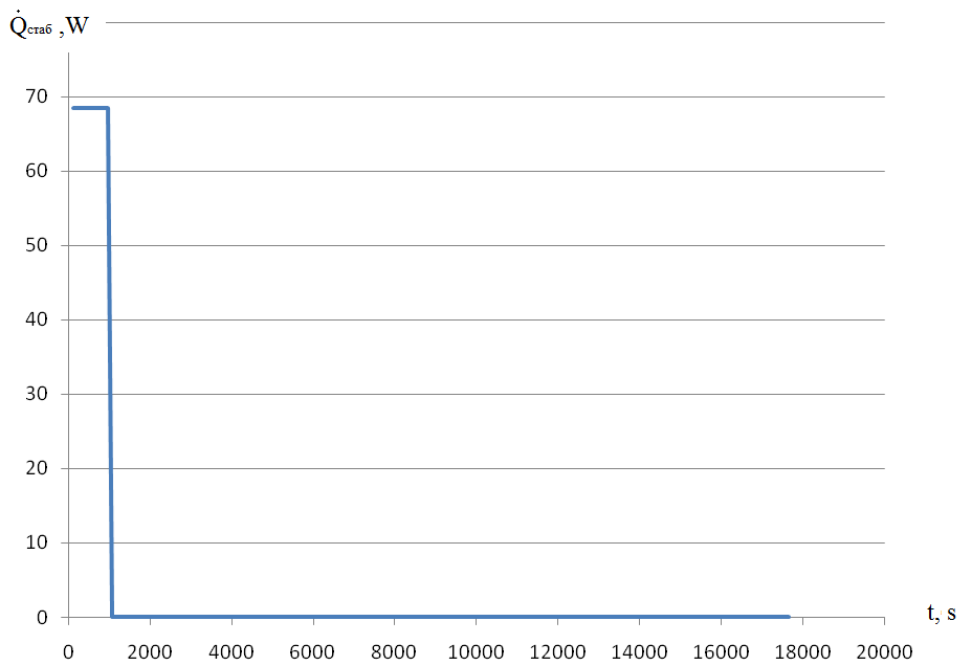


Рис.5. Градієнти зовнішньої температури та основи ВОГ1–ВОГ4.

Рис.6. Зміна теплової потужності системи термостабілізації ( $\dot{Q}_{\text{стаб}}$ ) у часі.

### Висновки.

До основних результатів належить таке.

Створено розрахункову схему та кінцевоелементну модель приладу БІБ. Здійснено моделювання температурного поля вимірювального блоку БІБ та визначення умов, які забезпечують мінімум перепадів

температур на платформі ВОГ в умовах термостабілізації.

Розроблено та верифіковано розрахункову теплову модель приладу.

Визначено теплові режими приладу та проведено їх чисельне моделювання. Здійснено моделювання впливу

зміни зовнішніх температур на температурне поле приладу БІБ.

За результатами чисельного моделювання проведено дослідження параметрів температурного поля приладу, характеристик системи термостабілізації. Чисельно визначено температурні градієнти у заданих точках приладу.

Встановлено, що закон термостабілізації має забезпечувати стабільність температурного поля (мала величина градієнта температури). Саме значення температури ВОГ істотно впливає на величину дрейфу не надає.

Систему термостабілізації доцільно використовувати тільки для виведення системи на робочий

температурний режим протягом не більше 30 хвилин, а в робочому режимі не використовувати.

Виявлено, що застосування термостабілізації у розглянутій конструкції приладу БІБ (БАІБ) з тепловідведенням від платформи ВОГ за допомогою випромінювання дозволяє сформувати на платформі ВОГ температурне поле з перепадом температури в 2°K, що дозволяє забезпечити мінімальний рівень температурних деформацій платформи ВОГ та зменшити коливання швидкості зовнішньої температури 8 K/хв. до рівня 0.2 K/хв. на платформі ВОГ.

#### Список литературы

1. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. *Управление температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах*. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления.–2014.–№4.–с.100-110.
2. 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. 150 с.
3. Джашитов В.Э. *Влияние тепловых процессов на точность прецизионных волоконно-оптических инерциальных датчиков*. //ИФЖ. 1994. Т.66, №1. С.61-68.
4. Галягин К. С., Ошивалов М. А., Селянинов Ю. А., Савин М. А. *Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях* // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 979—984.
5. Shen C., Chen X. *Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature*. Appl. Opt. 2012;51:2541–2547. doi: 10.1364/AO.51.002541.
6. Wang X., Ma S. *Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG*. J. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut. 2009;25:28–31.
7. Zhang Y.S., Wang Y.Y., Yang T., Yin R., Fang J.C. *Dynamic angular velocity modeling and error compensation of one-fiber fiber optic gyroscope (OFFOG) in the whole temperature range*. Meas. Sci. Technol. 2012;23:1–6.
8. Zhang Y., GuoY., Li C., Wang Y., Wang Z. *A new open-loop Fiber Optic Gyro error compensation method based on angular velocity error modeling*. Sensors (Basel). 2015 Mar; 15(3): 4899–4912.
9. *Method for in-field updating of the gyro thermal calibration of an inertial navigation system*/ US Patent №5527003, 1996.
10. 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
11. Громов Д.С. *Тепловая защита и термостабилизация волоконно-оптического гироскопа в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы*. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics 2014, №2 (90), с. 136-142.
12. Бреславский Д.В., Погорелов С.Ю., Счастливцев К.Ю. и др. *Разработка методики определения температурных градиентов волоконно-оптического гироскопа ОИУС501/Механика та машинобудування–2012.–№1.–С.90-101.*
13. Sergiy Yu. Pogorilov, Valeriy L. Khavin, Konstantin Naumenko, and Kyryll Yu. Schastlivets *Heat Transfer Analysis in the Strapdown Inertial Unit of the Navigation System* © Springer Nature Switzerland AG 2020

H. Altenbach et al. (eds.), *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials, Advanced Structured Materials 121*, pp.119-133.

14. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. и др. *Математическое моделирование трехмерных неоднородных нестационарных температурных полей электронных плат и многофункциональных программируемых контроллеров систем ориентации космических аппаратов*.// Гироскопия и навигация.-2004.-№2, с.68-80.
15. Погорелов С.Ю., Счастливцев К.Ю. *Уточнение расчетной модели кольцевого лазерного гироскопа на основе экспериментальных данных*./ НТУ «ХПИ».- Харьков, 2005.-№47,- с.153 -158.
16. Автономова Л.В., Погорелов С.Ю., Счастливцев К.Ю. и др. *Температурное поле резонатора кольцевого лазерного гироскопа при различной конфигурации теплоотводящих элементов* / НТУ «ХПИ».- Харьков, 2005.-№20,- с. 3 -8.

#### References (transliterated)

1. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. *Upravlenie temperaturnimi polyami besplatformennoi inercialnoi navigacionnoi sistemi na volokonno-opticheskikh gioskopah*. // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemi upravleniya.–2014.–№4.–s.100-110. [in Russian].
2. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. *Matematicheskie modeli teplovogo dreifa gioskopicheskikh datchikov inercialnih sistem* /Pod obsh'ei redakciei akademika RAN V.G. Peshehonova. SPb.: GNC RF CNII «Elektroprigor», 2001. 150 s. [in Russian].
3. Dzhashitov V.E. *Vliyanie teplovi processov na tochnost precizionnih volokonno-opticheskikh inercialnih datchikov*. //IFZH. 1994. T.66, №1. S.61-68. [in Russian].
4. Galyagin K. S., Oshivalov M. A., Selyaninov YU. A., Savin M. A. *Kompyuternaya model pogreshnostei vihodnogo signala volokonno-opticheskogo gioskopa pri vneshnih vozdeistviyah* // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2015. T. 58, № 12. S. 979—984. [in Russian].
5. Shen C., Chen X. *Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature*. Appl. Opt. 2012;51:2541–2547. doi: 10.1364/AO.51.002541.
6. Wang X., Ma S. *Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG*. J. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut. 2009;25:28–31.
7. Zhang Y.S., Wang Y.Y., Yang T., Yin R., Fang J.C. *Dynamic angular velocity modeling and error compensation of one-fiber fiber optic gyroscope (OFFOG) in the whole temperature range*. Meas. Sci. Technol. 2012;23:1–6.
8. Zhang Y., GuoY., Li C., Wang Y., Wang Z. *A new open-loop Fiber Optic Gyro error compensation method based on angular velocity error modeling*. Sensors (Basel). 2015 Mar; 15(3): 4899–4912.
9. *Method for in-field updating of the gyro thermal calibration*
10. 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

11. Gromov D.S. *Teplovaya zash'ita i termostabilizaciya volokonno-opticheskogo giroskopa v sostave besplatformenoi inercialnoi navigacionnoi sistemi*. Nauchno-tehnicheskii vestnik informacionnih tehnologii, mehaniki i optiki. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics 2014, №2 (90), s. 136-142. [in Russian].
12. Breslavskii D.V., Pogorelov S.YU., Schastlivec K.YU. i dr. *Razrabotka metodiki opredeleniya temperaturnih gradientov volokonno-opticheskogo giroskopa OIUS501*/Mehanika ta mashinobuduvannya–2012.–№1.–S.90-101. [in Russian].
13. Sergiy Yu. Pogorilov, Valeriy L. Khavin, Konstantin Naumenko, and Kyrill Yu. Schastlivets *Heat Transfer Analysis in the Strapdown Inertial Unit of the Navigation System* © Springer Nature Switzerland AG 2020 H. Altenbach et al. (eds.), *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials*, *Advanced Structured Materials* 121, pp.119-133.
14. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. i dr. *Matematicheskoe modelirovanie trehmernih neodnorodnih nestacionarnih temperaturnih polei elektronnih plat i mnogofunkcionalnih programiruemih kontrollerov sistem orientacii kosmicheskikh apparatov*// *Giroskopiya i navigaciya*.-2004.-№2, s.68-80.. [in Russian].
15. Pogorelov S.YU., Schastlivec K.YU. *Utochnenie raschetnoi modeli kolceвого lazernogo giroskopa na osnove eksperimentalnih dannih*./ NTU «HPI».- Harkov, 2005.-№47,- s.153 -158. [in Russian].
16. Avtonomova L.V., Pogorelov S.YU., Schastlivec K.YU. i dr. *Temperaturnoe pole rezonatora kolceвого lazernogo giroskopa pri razlichnoi konfiguracii teplootvodyash'ih elementov* / NTU «HPI».- Harkov, 2005.-№20,- s. 3 -8. [in Russian].

## Відомості про авторів / About the Authors

**Погорілов Сергій Юрійович (Pogorilov Sergij Yuriyovich)** кандидат технічних наук, доцент, кафедра « Теоретична механіка та опір матеріалів», Національний технічний університет « Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-61-78; e-mail: pogorilovsy@gmail.com

**Хавін Валерій Львович (Khavin Valerij Lvovich)** кандидат технічних наук, професор, кафедра « Теоретична механіка та опір матеріалів», Національний технічний університет « Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-61-78; e-mail: vkhavin@kpi.kharkov.ua