



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39

EDN: DSOCIG

УДК 629.7.054.07

Научная статья / Research article

Моделирование температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика

Я.А. Зубарев^a, А.О. Синельников^b, В.У. Мнацаканян^c

^aНаучно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха, Москва, Российская Федерация

^bГосударственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Российская Федерация

^cНациональный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация

✉ mr.sinelnikov.a@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 декабря 2022 г.

Доработана: 21 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 26 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

кольцевой лазер, компьютерное моделирование, оптический ситалл, амплитуда частотной подставки, MATLAB, термокомпенсация

Аннотация. Представлены результаты моделирования температурного дрейфа периметра резонатора лазерного гироскопического датчика на базе кольцевого гелий-неонового лазера с круговой поляризацией излучения и магнитооптической частотной подставкой на эффекте Зеемана при помощи математического пакета MATLAB. Разработанный и реализованный в среде MATLAB алгоритм позволяет моделировать температурные деформации периметра зеемановского лазерного гироскопического датчика при изменении конфигурации его конструктивных элементов. В результате можно оценить качество поставляемого материала для изготовления резонатора кольцевого лазера, а также совокупный вклад конструктивных элементов в результирующий дрейф периметра зеемановского гироскопического датчика. Полученная модель является аналитическим инструментом дополнительного контроля качества оптического ситалла СО-115М, из которого изготавливается резонатор, и оптимизации конструкции зеемановского лазерного гироскопического датчика как локально, так и комплексно. Это необходимо для повышения эффективности стабилизации периметра кольцевого лазера в диапазоне рабочих температур с помощью активной системы регулировки периметра и пассивной термокомпенсации путем подбора конструктивных элементов с противоположными по знаку температурными коэффициентами линейного расширения. Использование разработанной модели в производстве лазерных гироскопов дает возможность осуществлять подбор конструктивных элементов зеемановского гироскопического датчика, что существенно увеличивает время его непрерывной работы в одномодовом режиме в широком температурном диапазоне при сохранении требуемой точности для систем ориентации, стабилизации и навигации различных летательных аппаратов.

Для цитирования

Зубарев Я.А., Синельников А.О., Мнацаканян В.У. Моделирование температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 30–39. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39>



Simulation of the temperature drift of the laser gyroscope path length

Yaroslav A. Zubarev^a , Anton O. Sinelnikov^b  , Victoria U. Mnatsakanyan^c 

^aPolyus Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russian Federation

^bState Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russian Federation

^cNational Research Technological University "MISIS"; Moscow, Russian Federation

✉ mr.sinelnikov.a@mail.ru

Article history

Received: December 28, 2022

Revised: February 21, 2023

Accepted: February 26, 2023

Keywords:

ring laser, computer simulation, optical glass-ceramic, frequency bias amplitude, MATLAB, thermal compensation

Abstract. The authors present the results of modeling the temperature drift of the resonator path length of a laser gyroscope based on a ring helium-neon laser with circular polarization of radiation and a magneto-optical frequency bias based on the Zeeman effect using the MATLAB mathematical package. The algorithm developed and implemented in the MATLAB environment makes it possible to simulate temperature deformations of the path length of a Zeeman laser gyroscope when the configuration of its structural elements changes. This allows to evaluate the quality of the supplied material for the manufacture of the ring laser resonator, as well as to evaluate the total contribution of structural elements to the resulting drift of the perimeter of the Zeeman gyroscope. The model obtained in the work is an analytical tool for additional quality control of the optical glass-ceramic SO-115M, from which the resonator is made, and optimization of the design of the Zeeman laser gyroscope, both locally and comprehensively. This is necessary to increase the efficiency of ring laser perimeter stabilization in the operating temperature range using an active perimeter adjustment system and passive thermal compensation by selecting structural elements with opposite temperature coefficients of linear expansion. The use of the developed model in the production of laser gyroscopes permits to select the structural elements of the Zeeman gyroscope, which significantly increases the time of its continuous operation in a single-mode in a wide temperature range while maintaining the re-quired accuracy for the orientation, stabilization and navigation systems of various aircraft.

For citation

Zubarev YaA, Sinelnikov AO, Mnatsakanyan VU. Simulation of the temperature drift of the laser gyroscope path length. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):30–39. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39>

Введение

Гироскопические датчики [1] на основе кольцевых лазеров (КЛ) [2; 3] являются чувствительными элементами высокоточных систем ориентации [4], стабилизации и навигации различных летательных аппаратов [5; 6]. Стабильность эксплуатационных характеристик данных систем обеспечивается устойчивостью датчиков к внешним температурным воздействиям [7].

Благодаря отсутствию подвижных деталей и узлов лазерные гироскопические датчики с магнитооптической частотной подставкой (ЧП) [3] являются наиболее устойчивыми к жестким эксплуатационным условиям. К данному классу приборов относятся зеemanовские лазерные датчики [8]. Для обеспечения стабильности периметра кольцевого лазера зеemanовского датчика

в широком диапазоне температур используются методы пассивной и активной термокомпенсации [9; 10].

К пассивным методам относится использование материалов с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) [11]. В зеemanовских датчиках таким материалом является ситалл марки СО-115М производства Лыткаринского завода оптических стекол [12]. Недостатком ситалла является нелинейный характер ТКЛР в диапазоне рабочих температур датчика [13; 14]. Это существенно ограничивает диапазон работы активной системы регулировки периметра (СРП) [15; 16].

В процессе работы зеemanовского датчика возникает дрейф периметра КЛ, вызванный разогревом его резонатора и изменением внешней

температуры [17; 18]. При этом в конструкции зеемановского датчика присутствуют элементы, имеющие отличные от ситалла ТКЛР [19], поэтому задача моделирования температурного дрейфа периметра датчика является актуальной.

В различной степени эта проблема свойственна всем лазерным гироскопическим датчикам и для ее решения активно применяются методы математического моделирования [20; 21] и температурной коррекции [22–24].

Цель исследования – разработка алгоритма в среде MATLAB, с помощью которого возможно моделировать температурный дрейф периметра резонатора зеемановских лазерных датчиков угловой скорости.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) получение исходных данных для моделирования;
- 2) разработка модели температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика;
- 3) реализация модели в среде MATLAB.

1. Принцип работы и особенности конструкции зеемановского гироскопического датчика

На рис. 1 представлен резонатор зеемановского датчика, образованный четырьмя зеркалами, закрепленными на корпусе методом оптического контакта.

На двух подвижных зеркалах резонатора установлены пьезокорректоры, обеспечивающие работу СРП. Через полупрозрачное зеркало на смесительный узел выводится часть излучения для формирования выходных сигналов и получения информации о вращении. Резонатор закрепляется на основании и фиксируется с помощью специального крепежа.

Чувствительным элементом зеемановского гироскопического датчика является *He-Ne* КЛ, генерирующий лазерное излучение с круговой поляризацией на длине волны $\lambda = 632,8$ нм. Спектр собственных частот продольных мод неплоского четырехзеркального резонатора КЛ составляет половину длины волны излучения $\lambda/2$, что соответствует 316,4 нм [8].

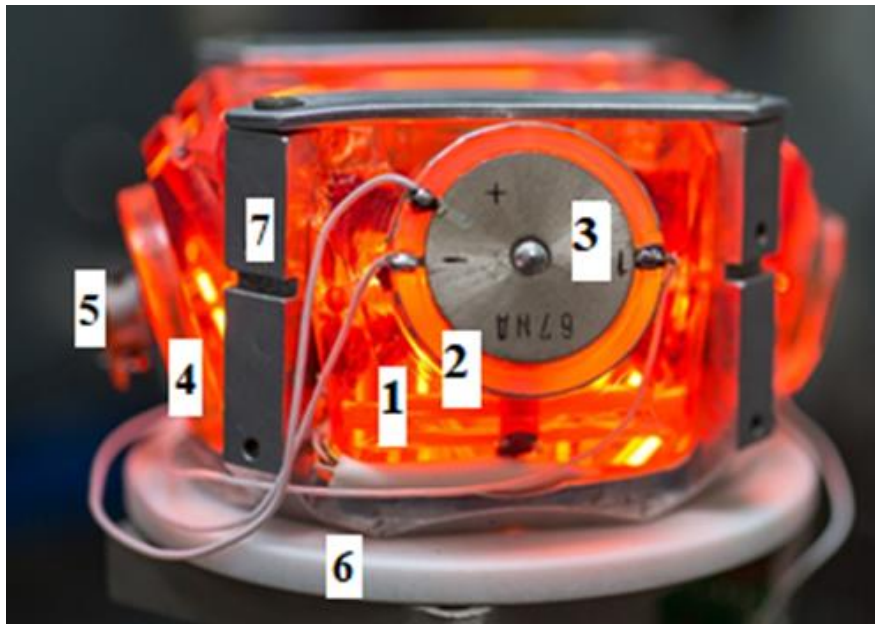


Рис. 1. Резонатор зеемановского датчика:
1 – резонатор; 2 – подвижное зеркало; 3 – пьезокорректор; 4 – полупрозрачное зеркало;
5 – смесительный узел; 6 – основание; 7 – крепежный элемент

Figure 1. Resonator of the Zeeman sensor:
1 – resonator; 2 – movable mirror; 3 – piezoelectric corrector; 4 – translucent mirror;
5 – mixing unit; 6 – base; 7 – fastening element

Благодаря круговой поляризации генерируемого излучения при наложении продольного магнитного поля на активные каналы КЛ в зеемановском гироскопическом датчике реализуется

магнитооптическая ЧП. Амплитуда ЧП является эквивалентом реального вращения и соответствует разности частот встречных волн КЛ $\Delta f = f_{cw} - f_{ccw}$, кГц.

Настройка периметра на центр контура усиления лазера соответствует максимальному значению амплитуды ЧП $\Delta f_{\max} = 70\text{--}90$ кГц, а настройка – минимальному $\Delta f_{\min} < 20$ кГц. Таким образом, по изменению амплитуды ЧП во время работы КЛ можно оценить температурные деформации периметра его резонатора.

2. Выбор исходных данных и построение модели

Для построения модели температурного дрейфа периметра КЛ проведены исследования зеэмановского датчика угловой скорости типа ЗЛК-16 [8] при длительных температурных воздействиях согласно методике, представленной в [9; 10], и получены необходимые исходные данные.

Требуемая информация содержится в текстовом документе WORK.txt, вид которого представлен на рис. 2. В столбец 1 записано время съема данных t , с, в столбец 2 – амплитуда ЧП Δf , кГц, в столбце 3 показания термодатчика T в относительных единицах.

Time, s	Freq. kHz	Temp, с.е.
92.160	69.57330452	360.51063830
152.190	60.28341922	440.00425532
212.220	27.95467088	508.97446809
272.250	21.81220080	573.55744681
332.280	65.29396609	638.15319149
392.320	75.23782414	704.00212766
452.350	83.14398271	769.50212766
512.380	81.36060505	836.04680851
572.410	72.03960273	902.28723404
632.450	62.53284574	969.31914894
692.480	12.67738531	1037.15319149
752.510	31.21958112	1104.48085106
812.540	59.91528424	1172.91276596
872.580	67.70565160	1240.68085106

Рис. 2. Массив данных исследования дрейфа периметра в текстовом формате

Figure 2. An array of perimeter drift research data in text format

Величина амплитуды ЧП Δf при линейно изменяющейся температуре T в диапазоне от -55 до $+75$ °С со скоростью $1^\circ/\text{мин}$ внутри камеры тепла и холода отражает последовательную перестройку спектра частот КЛ относительно центра контура усиления, вызванную дрейфом периметра датчика ΔL , нм.

Типичная величина дрейфа периметра ΔL для зеэмановских гироскопических датчиков в диапазоне рабочих температур составляет $3\lambda\text{--}4\lambda$ (от 2000 до 25000 нм) [9; 10] и может зависеть от множества факторов: ТКЛР ситалла СО-115М и других конструкционных элементов, длины резонатора КЛ, способа накачки активной среды, рабочего тока разряда и т. д.

Таким образом, имея в качестве исходных данных временные зависимости амплитуды ЧП Δf от температуры T , становится возможным создать модель температурного дрейфа периметра при помощи программного метода. Для построения модели разработан специальный алгоритм, реализованный в среде MATLAB [25].

Структурная схема работы алгоритма представлена на рис. 3.

В массив A записываются данные из текстового файла ϕ , полученного в ходе экспериментального исследования и представленного на рис. 2:

$$A = \text{dlmread}('WORK.txt'). \quad (1)$$

В массив t записывается 3-й столбец массива A , содержащий показания термодатчика. В массив e записывается 2-й столбец массива A , содержащий значения амплитуды ЧП Δf :

$$t = A(:,11) * (0.0003051804 * 44.444444) - 61.11111 \\ e = A(:,3). \quad (2)$$

Первые пустые промежуточные массивы $e1$ и $t1$ заполняются значениями из алгоритма поиска точек перегиба. Далее осуществляется поиск точек массива e , значения которых больше либо меньше значений их предыдущих и последующих точек, которые вносятся в промежуточный массив, также придавая этим точкам значения массива t :

$$e1 = [] \\ t1 = [] \\ \text{indx} = 1 \\ \text{for } i = 2:\text{size}(e) - 1 \\ \text{if } ((e(i-1) < e(i)) \&\& (e(i+1) < e(i))) \|\| ((e(i-1) > e(i)) \&\& (e(i+1) > e(i))); \\ e1(\text{indx}) = e(i); \\ t1(\text{indx}) = t(i); \\ \text{indx} = \text{indx} + 1; \\ \text{end} \quad (3)$$

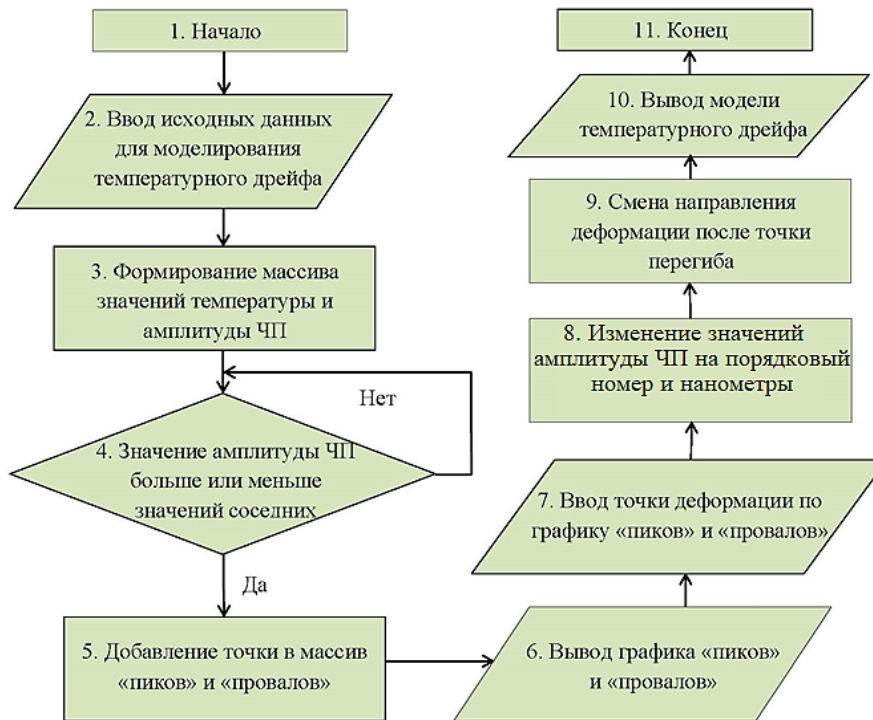


Рис. 3. Структурная схема работы алгоритма

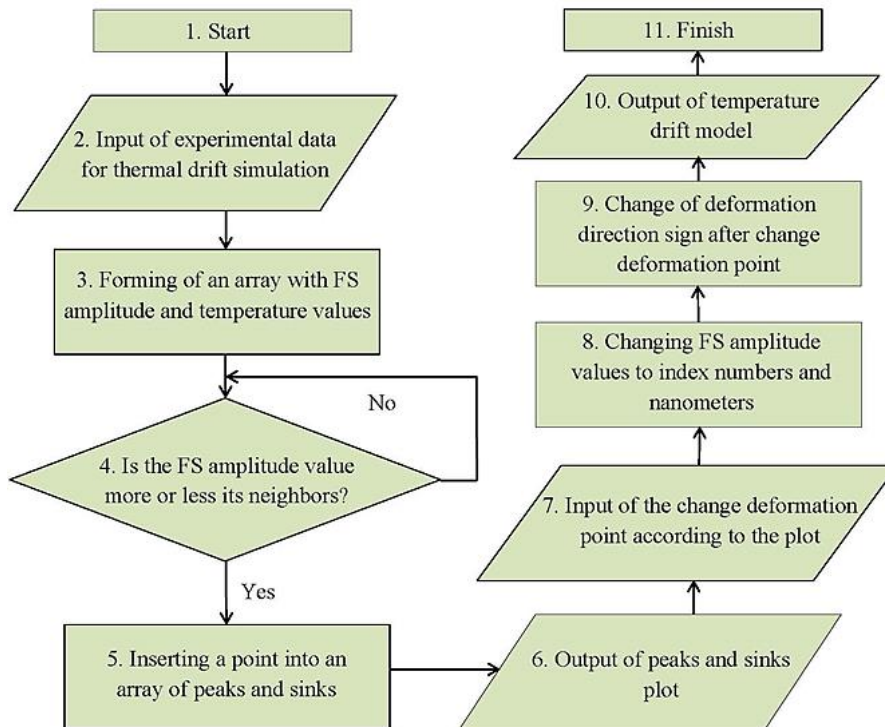


Figure 3. Block diagram of the algorithm (FS – frequency stand)

После этого значения массива $e1$ заменяются на соответствующие им порядковые номера и переводятся в нанометры:

$$\begin{aligned} e1 &= 1: \text{size}(e1'); \\ e1 &= 633 * 0.25 * e1 \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 4 представлен промежуточный график температурной зависимости амплитуды ЧП Δf от температуры T , содержащий ключевые точки «пиков» и «провалов», необходимые для построения конечной модели температурного дрейфа периметра зеэмановского лазерного гироскопического датчика. В точках с нечетными номерами КЛ находится на собственной n -й рабочей моде, попадающей в максимум контура усиления, а с четными – области максимальной

отстройки от контура усиления. Расстояние между двумя соседними точками с нечетными номерами, например между точками 1 и 3, соответствует $\lambda/2 = 316,4$ нм. В свою очередь, расстояние между двумя соседними точками с последовательными номерами, то есть между расстройкой и настройкой (например, между точками 2 и 3), соответствует четверти длины волны излучения $\lambda/4 = 158,2$ нм. В точке 9 происходит изменение направления деформации резонатора. С точки 1 до точки 10 наблюдается сужение периметра КЛ, с точки 10 до точки 18 – расширение. Это связано с нелинейным характером ТКЛР ситалла СО-115М в рабочем диапазоне температур зеэмановского лазерного гироскопического датчика.

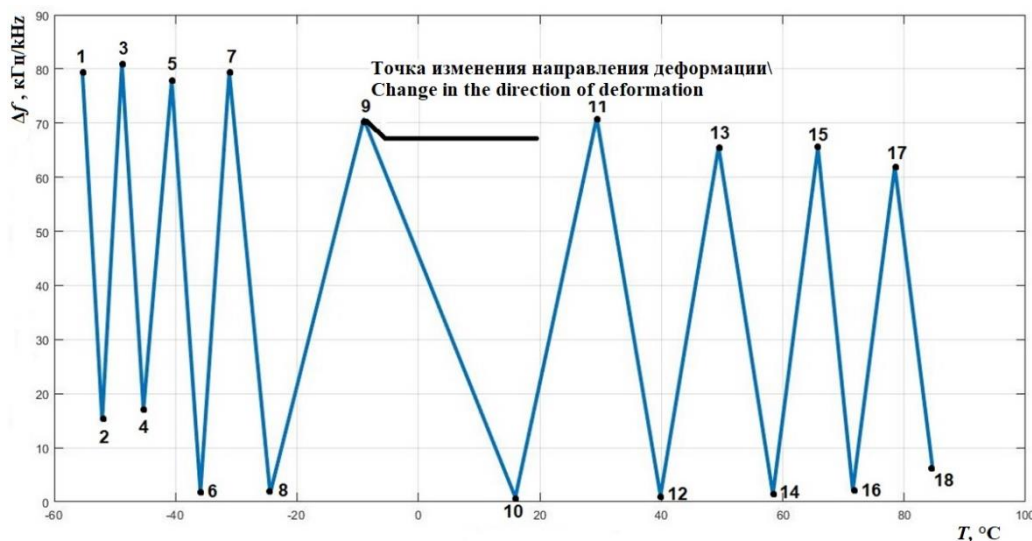


Рис. 4. Промежуточный график зависимости амплитуды ЧП от температуры
Figure 4. Intermediate graph of the dependence of the amplitude of the frequency stand on the temperature

На промежуточном графике (рис. 4) выбирается номер точки перегиба ind , а именно номер 9. Из значений точек массива $e1$ вычитается значение величины изменения амплитуды ЧП в точке изменения направления деформации, что позволяет переместить график к нулю координат в точке перегиба:

$$\begin{aligned} ind &= 9 \\ e1 &= e1 - e1(ind) \end{aligned} \quad (5)$$

Далее в пустые промежуточные массивы ex и te заносятся значения $e1$ и $t1$ из цикла, который отражает значения изменения до точки перегиба относительно оси абсцисс:

$$\begin{aligned} ex &= [] \\ te &= [] \\ i1 &= 1 \\ \text{for } k &= 1: \text{size}(e1') \\ &\text{if } k < ind \\ ex(i1) &= -e1(k)' \\ te(i1) &= t1(k)' \\ i1 &= i1 + 1 \\ &\text{end} \\ &\text{if } k \geq ind \\ ex(i1) &= e1(k)' \\ te(i1) &= t1(k)' \\ i1 &= i1 + 1 \\ &\text{end} \end{aligned} \quad (6)$$

По значениям из массивов ex и te строится конечный график зависимости абсолютного изменения периметра ΔL от температуры t .

На рис. 5 представлена модель температурного дрейфа периметра зеemanовского гироскопического датчика, отражающая зависимость абсолютного изменения длины его периметра от внешней температуры и саморазогрева.

По полученной модели видно, что наибольшую деформацию периметр КЛ имеет в зоне

отрицательных температур, что соответствует характеру ТКЛР ситалла СО-115М в данной области. Эту особенность необходимо учитывать при предварительной регулировке СРП гироскопического датчика, чтобы обеспечить эффективную термокомпенсацию с помощью активных пьезокорректоров.

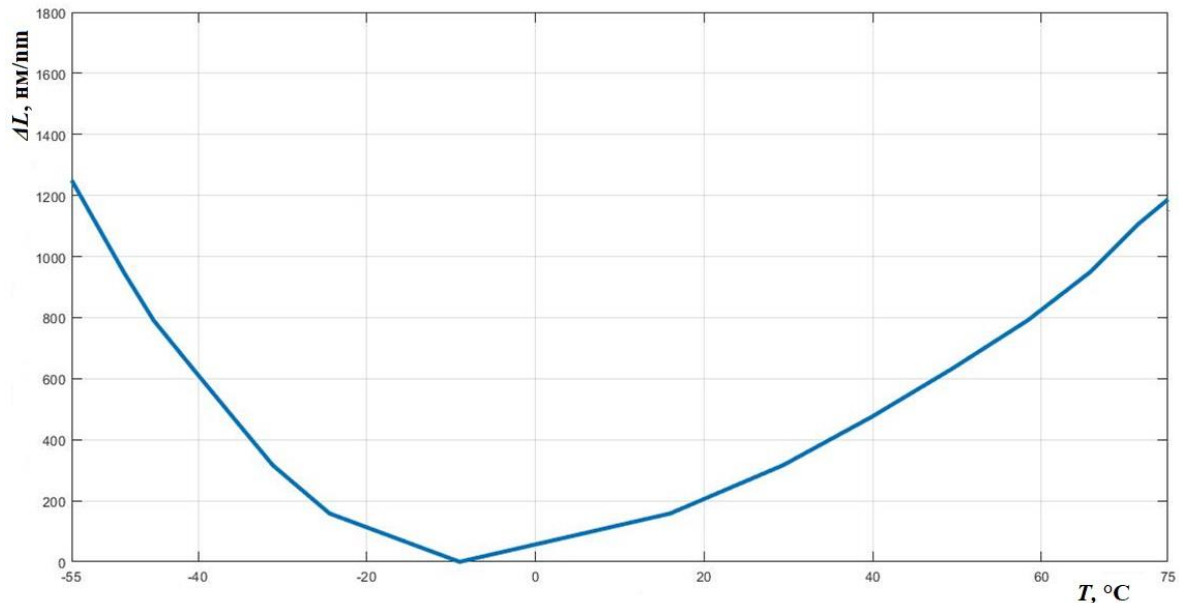


Рис. 5. Модель температурного дрейфа периметра зеemanовского датчика
Figure 5. Model of temperature drift of the perimeter of the Zeeman RLG

3. Реализация моделирования для оценки вклада конструктивных элементов в совокупный температурный дрейф периметра

Имея представление о характере температурного дрейфа периметра ΔL , становится возможным оценить вклад всех конструктивных элементов КЛ, имеющих отличные от ситалла СО-115М ТКЛР, в совокупный уход периметра зеemanовского гироскопического датчика.

На основе исходных данных и благодаря реализованной в среде MATLAB модели температурных дрейфов периметра датчика возможно провести моделирование и получить зависимости изменения периметра резонатора в диапазоне рабочих температур на этапах различной сборки датчика, как показано на рис. 6.

Представленная модель демонстрирует поведение температурного дрейфа периметра гироскопического датчика на разных этапах сборки – от резонатора КЛ до готового изделия. При добавлении новых конструктивных элементов

наблюдается сдвиг точки перегиба и изменение результирующей деформации ΔL . Это позволяет оценить вклад каждого конструктивного элемента в изменение периметра датчика.

Согласно полученной модели, увеличение числа конструктивных элементов КЛ вначале сборки датчика приводит к росту абсолютного удлинения периметра ΔL при частичном закреплении пьезоблоков на подвижных зеркалах. Далее совокупная деформация периметра датчика снижается на 400 нм и ее результирующая величина становится равной $\Delta L = 2000$ нм, что соответствует типовым значениям [9; 10]. При этом на 20 °С смещается точка изменения направления деформации оптического контура датчика из области отрицательных температур в область положительных температур.

Таким образом, благодаря данной модели можно получить достоверную информацию о влиянии всех составных элементов на совокупное изменение периметра зеemanовского гироскопического датчика с целью оптимизации его конструкции и режима работы активной СРП.

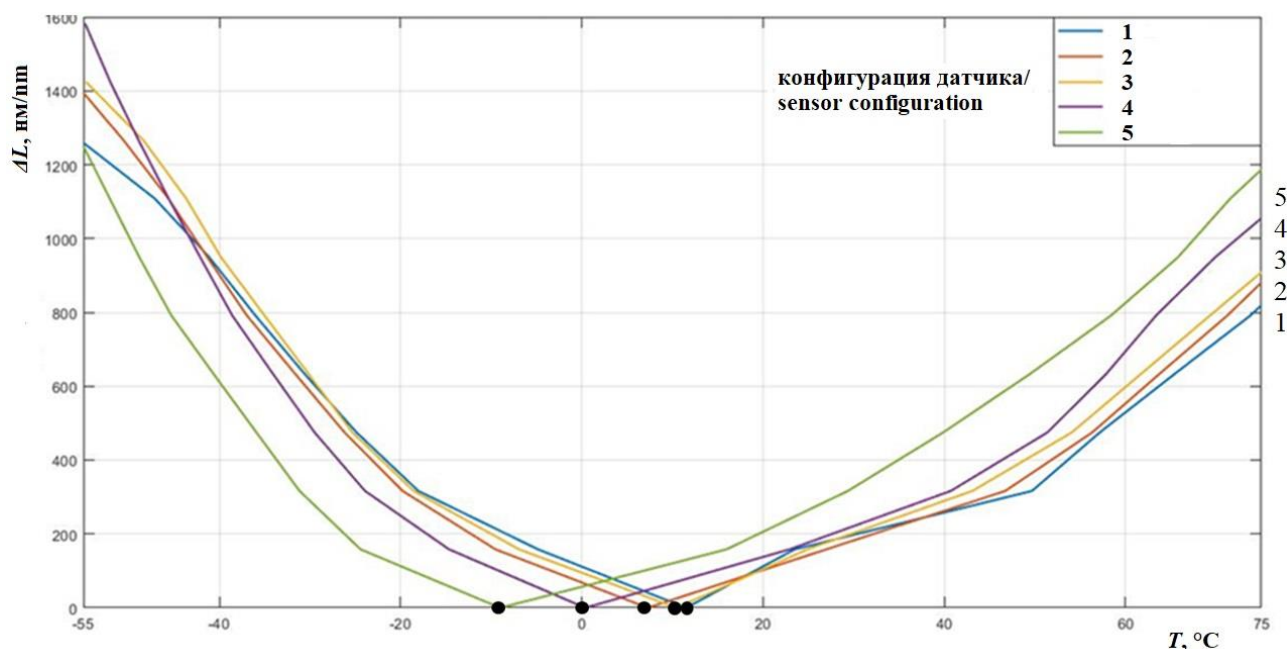


Рис. 6. Модель температурного дрейфа периметра на разных этапах сборки датчика:
 1 – полностью собранный датчик; 2 – датчик без магнитных экранов; 3 – резонатор с полностью припаянными пьезоблоками;
 4 – резонатор с пьезоблоками, отпаянными по образующей; 5 – только резонатор КЛ

Figure 6. A model of the temperature drift of the perimeter at different stages of sensor assembly:
 1 – full sensor; 2 – sensor without magnetic shield; 3 – resonator with fixed piezoelements; 4 – resonator with loose piezoelements; 5 – only resonator

Заключение

Разработанный и реализованный в среде MATLAB алгоритм позволяет моделировать температурные деформации периметра зеемановского лазерного гироскопического датчика при изменении конфигурации его конструктивных элементов. Это дает возможность оценивать качества поставляемого материала для изготовления КЛ, а также – совокупный вклад конструктивных элементов в результирующий дрейф периметра зеемановского датчика.

Таким образом, представленная модель является аналитическим инструментом контроля качества оптического ситалла СО-115М, из которого изготавливается резонатор КЛ, и оптимизации конструкции зеемановского лазерного гироскопического датчика как локально, так и комплексно. Это необходимо для повышения эффективности стабилизации периметра КЛ в диапазоне рабочих температур методами активной и пассивной термокомпенсации.

Использование разработанной модели в производстве лазерных гироскопов позволяет осуществлять подбор конструктивных элементов гироскопического датчика, что существенно

увеличивает время его непрерывной работы в одномодовом режиме в широком температурном диапазоне при сохранении требуемой точности для систем ориентации, стабилизации и навигации различных летательных аппаратов.

Список литературы / References

- Hering E, Schönfelder G, Basler S, Biehl K-E, Burkhardt T, Engel T, Feinäugle A, Fericean S, Forkl A, Giebeler C, Hahn B, Halder E, Herfort Ch, Hubrich S, Reichenbach J, Röbel M, Sester S. Geometric quantities. In: Hering E, Schönfelder G. (eds.) *Sensors in Science and Technology*. Wiesbaden: Springer; 2022. p. 147–372. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34920-2_3
- Chopra KN. Ring laser gyroscopes. *Optoelectronic Gyroscopes: Design and Applications*. Singapore: Springer; 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8380-3_1
- Passaro VMN, Cuccovillo A, Vaiani L, De Carlo M, Campanella CE. Gyroscope technology and applications: a review in the industrial perspective. *Sensors*. 2017;17(10). <https://doi.org/10.3390/s17102284>
- Cheremisenov GV. A gyrocompass based on a rotating laser gyroscope: experience in the development and experimental results. *Gyroscopy and Navigation*. 2018;9:29–34. <https://doi.org/10.1134/S2075108718010054>

Черемисенов Г. В. Опыт разработки гирокомпаса на основе вращающегося лазерного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. № 3 (98). С. 49–59. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2017.25.3.049-059>

5. Bolotnov AS. Application of the laser gyroscope in free-form inertial systems. *Politechnical Student Journal*. 2019;10(39). <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533>

Болотнов А. С. Применение лазерного гироскопа в бесплатформенных инерциальных системах // Политехнический молодежный журнал. 2019. Вып. 10 (39). <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533>

6. Corke P. Navigation. *Robotics and Control*. Cham: Springer; 2022. p. 123–147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79179-7_5

7. Logashina IV, Chumachenko EN, Bober SA, Akse-
nov SA. Thermal stress state of a laser-gyroscope housing for use in space. *Russian Engineering Research*. 2009;29: 751–755. <https://doi.org/10.3103/S1068798X09080012>

8. Azarova VV, Golyaev YD, Savelyev II. Zeeman laser gyroscopes. *Quantum Electronics*. 2015;45(2):171–179.

Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Савельев И. И. Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 2. С. 171–179.

9. Golyaev YD, Zapotylo NR, Nedzvetskaya AA, Sinelnikov AO, Tikhmenev NV. Laser gyros with increased time of continuous operation. *Proceedings of the 18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2011)*. St. Petersburg; 2011. p. 53.

10. Golyaev YuD, Zapotylo NR, Nedzvetskaya AA, Sinelnikov AO. Thermally stable optical cavities for Zeeman laser gyroscopes. *Optics and Spectroscopy*. 2012;113(2): 227–229. <https://doi.org/10.1134/S0030400X12070090>

11. Zubarev YA, Sinelnikov AO, Fetisova NE. A study of the temperature stability of the Zeeman laser gyro ring resonator. *2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE; 2022. p. 1–4. <https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815336>

12. Savvova OV, Bragina LL, Petrov DV, Topchii VL, Ryabinin SA. Technological aspects of the production of optically transparent glass ceramic materials based on lithium-silicate glasses. *Glass and Ceramics*. 2018;75:127–132. <https://doi.org/10.1007/s10717-018-0041-6>

13. Kompan TA, Sharov AA. Monitoring of the uniformity of the thermal linear expansion coefficient of large-size optical components. *Measurement Techniques*. 2009;52:755. <https://doi.org/10.1007/s11018-009-9345-9>

14. Filatov YD, Sidorko VI, Kovalev SV, Kovalev VA. Effect of the rheological properties of a dispersed system on the polishing indicators of optical glass and glass ceramics. *Journal of Superhard Materials*. 2021;43:65–73. <https://doi.org/10.3103/S1063457621010032>

15. Wu F, Zhang M-H, Fu X, Guo X, Wang J-L, Wang J-X. Design of ac laser frequency stabilization system for space three-axis mechanical dithering laser gyro. *Zhongguo Guanxing Jishu Xuebao*. 2017;25(2):265–268.

16. Cygan A, Lisak D, Masłowski P, Bielska K, Wójtewicz S, Domysławska J, Trawiński RS. Pound-Drever-Hall-locked, frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer. *The Review of Scientific Instruments*. 2011;82(6):063107. <https://doi.org/10.1063/1.3595680>

17. Sinelnikov AO, Medvedev AA, Golyaev YD, Grushin ME, Chekalov DI. Thermal zero drifts in magneto-optical Zeeman laser. *Gyroscope and Navigation*. 2021; 129(4):308–313. <https://doi.org/10.1134/S2075108721040076>

Синельников А. О., Медведев А. А., Голяев Ю. Д., Грушин М. Е., Чекалов Д. И. Роль тепловых дрейфов нуля в магнитооптических зеемановских лазерных гироскопах // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 4 (115). С. 46–55. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0079>

18. Savelyev I, Sinelnikov A. The influence of the pumping current on the Zeeman laser rotation sensors output parameters. *Proceedings of the 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015)*. St. Petersburg; 2015. p. 421–424.

19. Zubarev YA, Sinelnikov AO, Katkov AA. Contribution of structural elements to the temperature drift of the Zeeman laser angular velocity sensors perimeter. *Fizicheskoe Obrazovanie v Vuzah*. 2021;27(24):55–58. (In Russ.) https://doi.org/10.54965/16093143_2021_27_S4_55

Зубарев Я. А., Синельников А. О., Катков А. А. Вклад конструкционных элементов в температурный дрейф периметра зеемановского лазерного датчика угловой скорости // Физическое образование в вузах. 2021. Т. 27. № 24. С. 55–58. https://doi.org/10.54965/16093143_2021_27_S4_55

20. Soloveva T, Sinelnikov A, Kuznetsov E, Golyaev Y, Kolbas Y. Computer simulation of processes in the resonator length control system of the Zeeman laser gyro. *Proceedings of the International Conference on Optoelectronic Information and Computer Engineering (OICE 2022)*, China, 15 August 2022 (vol. 12308). <https://doi.org/10.1117/12.2645990>

21. Khandelwal A, Syed A, Nayak J. Mathematical model of semiconductor fiber ring laser gyroscope. *Journal of Optics*. 2017;46:8–15. <https://doi.org/10.1007/s12596-016-0368-8>

22. Weng J, Bian X, Kou K, Lian T. Optimization of ring laser gyroscope bias compensation algorithm in variable temperature environment. *Sensors*. 2020;20(2):377. <https://doi.org/10.3390/s20020377>

23. Liang H, Ren Q, Zhang D, Zhao X, Guo Y. The temperature compensation method for the laser gyro based on the relevance vector machine. In: Jia Y, Zhang W, Fu Y, Yu Z, Zheng S. (eds.) *Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Systems Conference*. Singapore: Springer; 2022. p. 367–375. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6328-4_39

24. Li Y, Fu L, Wang L, He L, Li D. Laser gyro temperature error compensation method based on NARX neural network embedded into extended Kalman filter. In: Yan L, Duan H, Yu X. (eds.) *Advances in Guidance, Navigation and Control*. Singapore: Springer; 2022. p. 3309–3320.

25. Semenov AS, Yakushev IA, Egorov AN. Modeling of technical systems in the MATLAB environment. *Modern High-Tech Technologies*. 2017;8:56–64. (In Russ.)

Семенов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 8. С. 56–64.

Сведения об авторах

Зубарев Ярослав Андреевич, аспирант, ведущий инженер участка 450/4 НПК-470 по лазерной гироскопии, Научно-исследовательский институт «Полус» имени М.Ф. Стельмаха, Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1; ORCID: 0000-0002-4492-338X; zubyar@mail.ru

Синельников Антон Олегович, кандидат технических наук, начальник лаборатории № 251-1, отдел № 250 разработки гироскопических блоков на базе лазерных гироскопов, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Российская Федерация, 129226, Москва, пр-т Мира, д. 125; ORCID: 0000-0002-5579-3509, Scopus Author ID: 55382453500, eLIBRARY SPIN-код: 2442-7507; mr.sinelnikov.a@mail.ru

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-код: 8693-8313; artvik@bk.ru

About the authors

Yaroslav A. Zubarev, postgraduate student, lead engineer of lab. 450/4, scientific and production unit 470 (laser gyroscopy), Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, 3 Vvedenskogo St, bldg 1, Moscow, 117342, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4492-338X; zubyar@mail.ru

Anton O. Sinelnikov, Ph.D., Head of the laboratory No. 255-1, sector 250 (developing of gyro inertial units based on laser gyroscopes), State Research Institute of Instrument Engineering, 125 Prospekt Mira, Moscow, 129226, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5579-3509, Scopus Author ID: 55382453500, eLIBRARY SPIN-код: 2442-7507; mr.sinelnikov.a@mail.ru

Victoria U. Mnatsakanyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, National Research Technological University “MISIS”; 4 Leninskii Prospekt, bldg 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-code: 8693-8313; artvik@bk.ru