
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 53.096
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-8-728-733

МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОНТУРЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

И. А. ЕСИПЕНКО, Д. А. ЛЫКОВ

*ПАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“,
614990, Пермь, Россия
E-mail: esipenkoivan@gmail.com*

Численно и экспериментально исследованы упругие деформации в контуре волоконно-оптического гироскопа, которые являются одним из источников возникновения фиктивной угловой скорости. С целью нахождения локальных деформаций в световоде решена задача стационарной термоупругости для структурно неоднородного волоконного контура. В качестве нагрузки принято термическое воздействие на объект исследования. Задача численно решена методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Представлены распределения расчетных деформаций вдоль волокна. С помощью оптического импульсного анализатора экспериментально установлены сдвиги бриллюэновских частот при двух значениях температуры, из которых получено распределение деформаций. Расчетные значения сопоставлены с экспериментальными данными. Путем вычисления функционала невязки проведена количественная оценка отклонения расчетной кривой от экспериментальной, которая показала удовлетворительное совпадение.

Ключевые слова: *волоконно-оптический гироскоп, волоконный контур, коэффициент преломления, упругие деформации, метод конечных элементов*

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) применяются в системах стабилизации, управления и навигации различных объектов в качестве детектора угловой скорости. Непрерывное совершенствование технологии изготовления компонентов ВОГ позволяет получить высокую точность измеряемых угловых скоростей: погрешность 0,01—0,001 °/ч. Однако обеспечение заданной точности при эксплуатации прибора в условиях воздействия внешних факторов остается главной проблемой для проектировщиков ВОГ. Одной из основных причин возникновения паразитной угловой скорости является нестационарное тепловое воздействие, без учета влияния которого невозможно создать ВОГ навигационного класса точности [1—5].

Появление фиктивной угловой скорости, которая снижает точность прибора, вызвано изменением фазы $\Delta\Phi$ световой волны, распространяющейся вдоль оптического волокна [6]:

$$\Delta\Phi = \Phi \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right), \quad (1)$$

где n — показатель преломления, L — длина волокна.

На волокно ВОГ наносят защитно-упрочняющие покрытия, а квадрупольная намотка на цилиндрическую поверхность с фиксацией эпоксидным компаундом образует волоконный контур (ВК). Конструкция ВК схематично представлена на рис. 1.

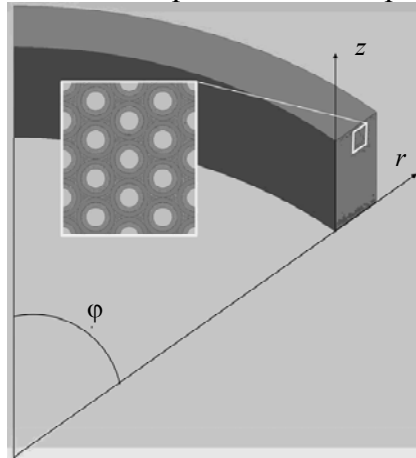


Рис. 1

Авторы работы [7] показали, что воздействие температуры на структурно-неоднородную среду ВК с различными термомеханическими свойствами приводит к возникновению упругих деформаций в волокне, которые вносят дополнительный вклад в фиктивную угловую скорость (упругооптический эффект). Формула (1) при изменении упругих деформаций $\Delta\varepsilon_{\varphi\varphi}$ в системе координат, представленной на рис. 1, дается выражением

$$\Delta\Phi = \Phi \left(1 - \frac{n^2}{2} [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] \right) \Delta\varepsilon_{\varphi\varphi}, \quad (2)$$

где ν — коэффициент Пуассона, p_{11} и p_{12} — упругооптические константы волокна [8].

Целью настоящей работы является расчет упругих деформаций $\Delta\varepsilon_{\varphi\varphi}$, возникающих вдоль оптического волокна при нагреве ВК, экспериментальная верификация которых позволит в дальнейшем достоверно определить кажущуюся угловую скорость в условиях нестационарной работы ВОГ.

В качестве объекта исследования рассматривается поперечное сечение структурно-неоднородного осесимметричного ВК (см. рис. 1) с однородным полем температуры в диапазоне эксплуатации ВОГ от -50 до 60 °С). Волокно, первичное и вторичное покрытия, а также компаунд занимают объемы V_1 , V_2 , V_3 и V_4 соответственно и имеют границы контактов между собой S_{12} , S_{23} , S_{34} . Наружная граница ВК обозначается S .

В цилиндрической системе координат уравнения стационарной задачи термоупругости для изотропного тела с учетом осевой симметрии принимают вид [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial\sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0, \quad \frac{\partial\sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0, \\ \sigma_{rr} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{rr} + \lambda(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T, \\ \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) - 3K\alpha T, \\ \sigma_{rz} &= 2\mu\varepsilon_{rz}, \\ \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \\ r, z &\in V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь σ_{ij} и ε_{ij} — компоненты тензоров напряжений и малых деформаций, u_i — компоненты вектора перемещений, T — температура, $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ и $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ — коэффициенты Ламе, E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ — модуль объемного сжатия, α — коэффициент линейного температурного расширения.

Приведем условия на границах сопряжения материалов

$$\begin{aligned}(\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z)_{V_i} &= (\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z)_{V_{i+1}}, \\(\sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z)_{V_i} &= (\sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z)_{V_{i+1}}, \\(u_r)_{V_i} &= (u_r)_{V_{i+1}}, \quad (u_z)_{V_i} = (u_z)_{V_{i+1}}, \quad i = \overline{1,3}, \\r, z &\in S_{12}, S_{23}, S_{34},\end{aligned}\tag{4}$$

где l_r и l_z — направляющие косинусы вектора нормали к соответствующим поверхностям.

Для формирования условий свободного опирания ВК при $z=0$ поставлены граничные условия

$$u_z|_{z=0} = 0, \sigma_{rz}|_{z=0} = 0.\tag{5}$$

На остальных границах напряжения отсутствуют

$$\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z = 0, \sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z = 0, \quad r, z \in S.\tag{6}$$

Вычислением деформаций при двух температурах находится искомая величина

$$\Delta\varepsilon_{\varphi\varphi}|_{\Delta T=110^\circ\text{C}} = \varepsilon_{\varphi\varphi}|_{T=60^\circ\text{C}} - \varepsilon_{\varphi\varphi}|_{T=-50^\circ\text{C}}.\tag{7}$$

Будем считать, что характеристики материалов являются постоянными в рассматриваемом температурном диапазоне. В таблице представлены термомеханические свойства используемых компонентов.

Параметр	Волокно	Первичное покрытие	Вторичное покрытие	Компаунд
E , МПа	74000	1,2	3000	3000
ν	0,17	0,4993	0,33	0,33
α , $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	0,55	660	40	40

Для численного решения поставленной задачи (3) с краевыми условиями (4)—(6) использован метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS.

На рис. 3 представлено распределение упругих деформаций вдоль волокна при двух температурах.

Для экспериментальной верификации распределения упругих деформаций по длине волокна был использован оптический импульсный анализатор BOTDA Omnisens DiTeSt STAR202, работающий на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюэна [10]. Измерения проводились при $T = -50$ и 60°C после выдержки ВК в течение часа в термокамере. Схема и методика эксперимента подробно описаны в работе [11]. На рис. 3 показаны сдвиги бриллюэновских частот ВК.

Изменение сдвига бриллюэновской частоты при действии температуры и упругих деформаций в принятой системе координат дается выражением [12]:

$$\Delta f_b = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta\varepsilon_{\varphi\varphi},\tag{8}$$

где C_T и C_ε — коэффициенты пропорциональности. В работе [13] экспериментально определены значения C_T и C_ε для волокна, которое по геометрическим характеристикам и концентрации легирующего вещества в жиле совпадает с исследуемым.

Из формулы (8) следует

$$\Delta\varepsilon_{\text{фр}} = \frac{1}{C_\varepsilon}(\Delta f_b - C_T \Delta T). \tag{9}$$

Упругие деформации, найденные из решения задачи термоупругости (7), и деформации, экспериментально определенные по выражению (9), представлены на рис. 4.

Для количественной оценки достоверности упругих деформаций используется функционал невязки

$$\delta = \frac{\int_0^L |\Delta\varepsilon_{\text{фр}}^m - \Delta\varepsilon_{\text{фр}}^e| dl}{\int_0^L \Delta\varepsilon_{\text{фр}}^m dl} \cdot 100\%, \tag{10}$$

где символами m и e обозначены деформации, полученные из модели и эксперимента соответственно. Отклонение экспериментального значения от расчетного составило $\delta = 8,4\%$.

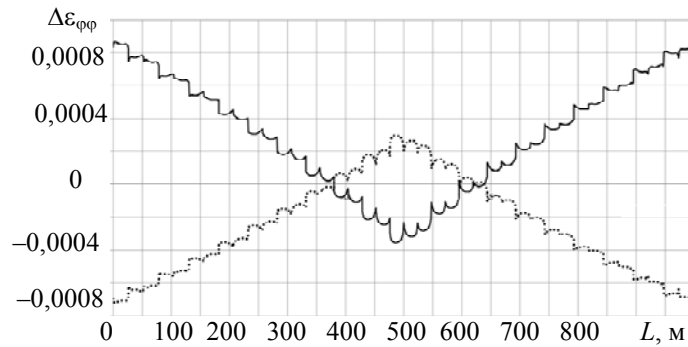


Рис. 2

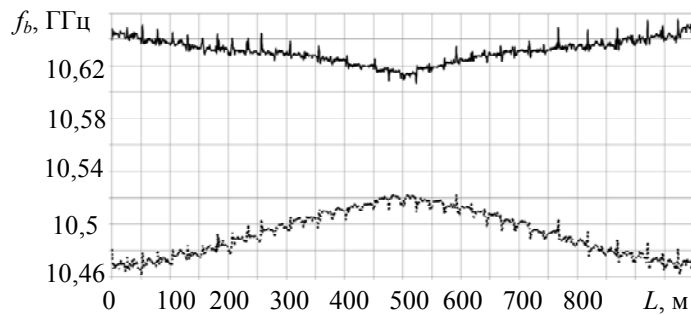


Рис. 3

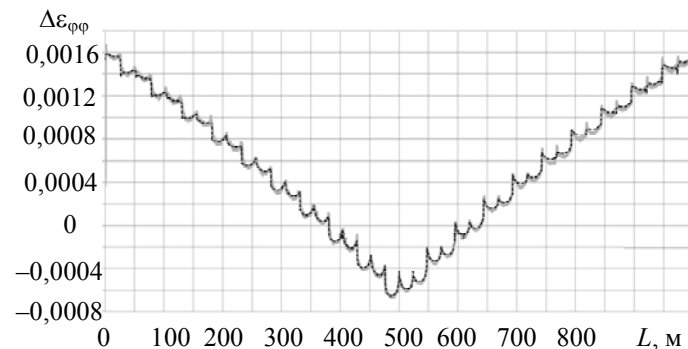


Рис. 4

Решение стационарной задачи термоупругости для сечения структурно неоднородного ВК позволило определить упругие деформации $\Delta \varepsilon_{\text{фр}}$ вдоль оптического волокна. Представление деформации как функции от изменения сдвига бриллюэновской частоты позволило верифицировать данные расчета. Количественное сравнение расчетных значений с экспериментальными данными говорит об удовлетворительном совпадении.

Достоверное определение упругих деформаций в структурно неоднородном волоконном контуре позволит в дальнейшем с высокой точностью спрогнозировать фиктивную угловую скорость в условиях нестационарной работы ВОГ на этапе проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов Д. С., Шарков А. В. Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 1. С. 62—67.
2. Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ошивалов М. А., Савин М. А. Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 32—38. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-32-38.
3. Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В. Математическое моделирование управления температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических датчиках // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 92—100.
4. Шарков И. А., Рупасов А. В., Стригалева В. Е., Волковский С. А. Влияние температурной неустойчивости характеристик источника на показания волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 86. С. 31—35.
5. Антонова М. В., Матвеев В. А. Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа при воздействии тепловых и магнитных полей // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 3. С. 73—80.
6. Lagakos N., Bucaro J. A., Jarzynski J. Temperature-induced optical phase shifts in fibers // Appl. Opt. 1981. Vol. 20, N 13. P. 2305—2308. DOI: 10.1364/AO.20.002305.
7. Mohr F., Schadt F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5502. P. 410—413. DOI: 10.1117/12.566654.
8. Butter C. D., Hocker G. B. Fiber optics strain gauge // Appl. Opt. 1978. Vol. 17, N 18. P. 2867—2869. DOI: 10.1364/AO.17.002867.
9. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
10. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
11. Беспрозванных В. Г., Кривошеев А. И., Кель О. Л. Исследование влияния температурного фактора на состояние контура волоконно-оптического гироскопа методом бриллюэновской рефлектометрии // Прикладная фотоника. 2016. Т. 2, № 4. С. 329—341.
12. Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application / S. Minakuchi, T. Sanada, N. Takeda, S. Mitani, T. Mizutani, Y. Sasaki, K. Shinozaki // J. of Lightwave Technology. 2014. Vol. 33, N 12. P. 2658—2662. DOI: 10.1109/JLT.2014.2375198.
13. Zou W., He Z., Hotate K. Investigation of strain and temperature dependences of Brillouin frequency shifts in GeO₂-doped optical fibers // J. of Lightwave Technology. 2008. Vol. 26, N 13. P. 1854—1861. DOI: 10.1109/JLT.2007.912052.

Сведения об авторах

Иван Александрович Есипенко

— ПАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“; инженер-конструктор; E-mail: esipenkoivan@gmail.com

Даниил Андреевич Лыков

— ПАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“; инженер-конструктор; E-mail: lykovdaperm@gmail.com

Рекомендована
Пермской научно-производственной
приборостроительной компанией

Поступила в редакцию
10.05.17 г.

Ссылка для цитирования: Есипенко И. А., Лыков Д. А. Метод верификации упругих деформаций в контуре волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 8. С. 728—733.

METHOD FOR ELASTIC STRAIN VERIFICATION IN FIBER-OPTIC GYROSCOPE CIRCUIT

I. A. Esipenko, D. A. Lykov

Perm Scientific Industrial Instrument-Making Public Joint-Stock Company,
614990, Perm, Russia

E-mail: esipenkoivan@gmail.com

The influence of elastic strain on variation of light wave phase in a fiber-optic gyroscope is studied both numerically and experimentally. Solution to the stationary thermos-elasticity problem for a structurally inhomogeneous fiber circuit is derived to determine local elastic strains in the fiber. The temperature effect on the object under investigation is taken as a load. The numerical solution to the problem is found out by the finite element method in the ANSYS software. Calculated distributions of elastic strain along the fiber are presented. The frequencies of stimulated Brillouin scattering at two temperatures are determined experimentally using an optical time domain analyzer. The influence of temperature variations and elastic strain on the Brillouin frequency shift is established. The calculated strain values are shown to be in accordance with the experimental data.

Keywords: fiber-optic gyro, fiber circuit, refractive index, elastic strain, finite element method

Data on authors

Ivan A. Esipenko — Perm Scientific Industrial Instrument-Making Public Joint-Stock Company;
Design Engineer; E-mail: esipenkoivan@gmail.com
Daniil A. Lykov — Perm Scientific Industrial Instrument-Making Public Joint-Stock Company;
Design Engineer; E-mail: lykovdaperm@gmail.com

For citation: Esipenko I. A., Lykov D. A. Method for elastic strain verification in fiber-optic gyroscope circuit. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 8. P. 728—733 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-8-728-733