DOI: 10.17117/na.2016.01.01.370

Поступила (Received): 25.01.2016

<http://ucom.ru/doc/na.2016.01.01.370.pdf>

Беспрозванных В.Г.
Распределенный мониторинг теплофизического
состояния волоконно-оптических компонентов

Besprozvannykh V.G.
Distributed monitoring of fiber-optic
components thermophysical state

Представлены экспериментальные данные о влиянии температуры окружающей среды на теплофизическое состояние волоконно-оптической катушки гироскопа, полученные в ходе тепловых испытаний с применением бриллюэновской рефлектометрии для различных схем квадрупольной технологии намотки контура. Получены эмпирические зависимости для распределения температурного коэффициента показателя преломления волокна по длине контура

Ключевые слова: волоконно-оптическая катушка, метод бриллюэновской рефлектометрии, температурный коэффициент показателя преломления

In this paper we propose Brillouin reflectometry based experimental heat tests about ambient temperature influence upon the thermophysical state of fiber gyro coil for different variants of quadrupolar winding technology. Empirical dependences of refraction temperature coefficient linear distribution have been found

Key words: fiber-optic coil, Brillouin optical time-domain reflectometry, refraction temperature coefficient

Беспрозванных Владимир Геннадьевич
Кандидат физико-математических наук, доцент
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Besprozvannykh Vladimir Gennadjevich
Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor
Perm national research polytechnic university
Perm, Komsomol ave., 29

Одним из основных направлений развития волоконно-оптических информационно-измерительных систем последнего десятилетия является разработка датчика угловой скорости (волоконно-оптического гироскопа) навигационного класса точности при достижении высокой стабильности его работы с учетом чувствительности выходного сигнала к температуре. Современный уровень развития техники и волоконно-оптических технологий выдвигает высокие требования к точности таких приборов на уровне от $0,01^\circ/\text{ч}$ до $0,001^\circ/\text{ч}$ [1, с. 129; 2, с. 2].

Ключевым компонентом датчика угловой скорости является его чувствительный элемент – волоконно-оптический контур, представляющий волоконную катушку, в которой оптическое волокно наматывается на специальный каркас определенным образом. Для достижения высокой точности выходного сигнала датчика необходим детальный анализ влияния тепловых воздействий и

распределения теплофизических характеристик по длине волокна на техническое состояние волоконной катушки. Аналогичные задачи актуальны и для других волоконно-оптических компонентов.

В работах [3, с. 191; 4, с. 33] рассматривается влияние температурных нестабильностей на работу чувствительного элемента гироскопа. Проводится анализ термически индуцированных ошибок выходного сигнала. В основе этих публикаций лежит разработка способов компенсации возникающего дрейфа угловой скорости при помощи методов математического моделирования температурных дрейфов, воздействующих на чувствительный элемент. Данные исследования нуждаются в дополнительном физическом моделировании.

В статье [5, с. 2525] разрабатываются линейные модели минимизации дрейфовых ошибок и повышения эффективности конструкции волоконно-оптических катушек в условиях действия радиального градиента температуры.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния температуры окружающей среды на теплофизическое состояние волоконной катушки датчика угловой скорости с квадрупольной технологией намотки при помощи метода бриллюэновской рефлектометрии и обоснованию предлагаемого распределенного мониторинга теплофизических характеристик волоконно-оптических компонентов.

Как известно, явление вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна с применением бриллюэновского оптического импульсного анализатора BOTDA может быть использовано для распределенного измерения температуры и эффективного контроля теплофизического состояния оптического волокна. Величина частотного бриллюэновского сдвига f в зависимости от деформации $\Delta\varepsilon$ и изменения температуры ΔT может быть найдена по формуле [6, с. 97]:

$$f = f_0 + \Delta f = \frac{2V_a n}{\lambda} + K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T, \quad (1)$$

где f_0 – смещение частоты в отсутствие натяжения волокна и при $T = \text{const.}$, n – эффективный показатель преломления сердцевины волоконного световода; V_a – скорость звука в волокне; λ – длина волны подаваемого сигнала. В работе [7, с. 145] зависимость (1) обобщена для исследования напряженно-деформированного состояния волоконных световодов.

В соответствии с (1), при $\Delta\varepsilon = 0$ бриллюэновский сдвиг частоты пропорционален изменению температуры оптического волокна, что позволяет оценить влияние температурных нестабильностей на волоконную катушку. Структура температурного коэффициента K_T , характеризующего зависимость частотного бриллюэновского сдвига от температуры, определяется формулой [2, с. 6]:

$$K_T = \frac{df}{dT} = \frac{2}{\lambda_p} \cdot \left(V_a \frac{dn}{dT} + n \frac{dV_a}{dT} \right) \quad (2)$$

Здесь λ_p – длина волны накачки.

Модель рефлектометрии (1), (2) позволяет получать распределение температуры вдоль волокна при невысоком уровне мощности оптического излучения и анализировать состояние волоконно-оптического контура. В качестве

примера на рис. 1 приведены полученные автором бриллюэновские рефлектограммы волоконно-оптической катушки для двух различных способов намотки по квадрупольной технологии.

Из бриллюэнограммы на рис. 1а видно, что ее структура соответствует количеству намотанных слоев в контуре. Поскольку намотка производится с середины оптического волокна таким образом, что образуются два одинаковых плеча катушки, то и центр симметрии бриллюэнограммы находится посередине контура. Данный контур намотан на специальный каркас, что обуславливает наличие пиков бриллюэновской частоты, соответствующих границам слоя катушки.

**Рис. 2. Бриллюэновская рефлектограмма волоконной катушки для двух случаев:
а – намотка на специальный каркас; б – намотка бескаркасным способом**

Для сравнения можно рассмотреть бриллюэновскую рефлектограмму волоконной катушки, намотанной бескаркасным способом (рис. 1б). Видно, что бриллюэновская рефлектограмма в этом случае имеет более линейную структуру.

Экспериментальное исследование влияния температуры окружающей среды на волоконно-оптический контур проводилось при помощи настраиваемой термокамеры, в которую помещалась катушка. Контур, в свою очередь, был подключен к бриллюэновскому анализатору BOTDA (рис. 2). Параметры прибора: рабочая длина волны $\lambda = 1550$ нм, максимальное количество усреднений $N = 10^4$, минимальное пространственное разрешение $\Delta L = 1$ м.

Температурный диапазон исследования составил 120°C (от -60°C до $+60^\circ\text{C}$). Для проведения измерения значения температуры фиксировались в ключевых точках: $+20^\circ\text{C}$, $+60^\circ\text{C}$, -40°C и -60°C . Выдержка на выбранных значениях температуры составляла не менее одного часа, чтобы обеспечить полный прогрев/охлаждение волоконного контура и повысить точность показаний бриллюэновского анализатора.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – бриллюэновский анализатор BOTDA, 2 – термокамера, 3 – волоконная катушка

Методика проведения эксперимента заключалась в последовательном снятии бриллюэнограмм для исследуемых волоконных контуров в точках с фиксированной температурой, после чего полученные данные сохранялись и проходили компьютерную обработку для последующего анализа.

На рис. 3 и 4 представлены полученные в результате температурных измерений бриллюэновские рефлектограммы. Каждой кривой соответствует бриллюэнограмма для указанного значения температуры.

Рис. 3. Бриллюэновские рефлектограммы для волоконной катушки, намотанной на специальный каркас, при различных температурах

Рис. 4. Бриллюэновские рефлектограммы для волоконной катушки с бескаркасной намоткой при различных температурах.

Поскольку, в соответствии с (2), функция бриллюэновского сдвига частоты зависит от показателя преломления волокна, можно перевести полученные данные в зависимость показателя преломления от температуры для каждого температурного перехода. Из формулы (2) при $V_a = \text{const.}$ находим:

$$\frac{dn}{dT} = \frac{\lambda_p}{2V_a} \cdot \frac{df}{dT}, \quad (3)$$

где $\frac{df}{dT}$ – коэффициент изменения частоты отраженного стоксова излучения в зависимости от температуры окружающей среды.

Каждому участку оптического волокна в катушке соответствует своя частота бриллюэновского рассеяния, таким образом, каждому участку, согласно (3), соответствует и свое значение температурного коэффициента показателя преломления волоконного контура $\frac{dn}{dT}$. Данный коэффициент зависит от имеющейся неоднородности структуры волоконно-оптического контура и температурных воздействий.

Рис. 5. Распределение температурного коэффициента показателя преломления по длине волокна в катушке

На рис. 5 представлено распределение температурного коэффициента $\frac{dn}{dT}$ по длине оптического волокна в контуре. Волоконному контуру № 1 соответствует контур со специальным каркасом, а контуру № 2 – бескаркасный.

В работах [8, с. 237; 9, с. 305], посвященных моделированию дрейфа чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа, применяются модели, в которых используются постоянные коэффициенты для расчета тепловых полей в катушке. Исходя из проведенного эксперимента, можно сделать вывод о том, что такой подход оказывается недостаточно точным в определении чувствительности прибора, поскольку коэффициенты, отвечающие свойствам используемых материалов, в частности, оптического волокна, оказываются неоднородно распределенными по его длине в контуре.

Поскольку анализ намотки волоконного контура следует проводить относительно центра распределения по длине, то, таким образом, нужно рассматривать зависимость коэффициента показателя преломления волокна от температуры отдельно для левого и правого плеч контура, рассматривая их как независимые элементы.

Рис. 6. Распределение температурного коэффициента показателя преломления по длине волокна в катушке для левого и правого плеч

На рис. 6 представлены соответствующие графики зависимости температурного коэффициента показателя преломления от длины оптического волокна отдельно для левого и правого плеч волоконной катушки.

С помощью линейной аппроксимации полученных данных были построены приближенные зависимости температурных коэффициентов от длины оптического волокна для правого и левого плеч рассматриваемых волоконных контуров (см. таблицу). Длина волокна x выражена в метрах. Соответствующие прямые также проведены на рис. 6.

Таблица 1. Температурные коэффициенты волоконных контуров

Плечо	Катушка со специальным каркасом	Бескаркасная катушка
Правое	$\frac{dn}{dT} = 2,151 \cdot 10^{-7}x + 1,486 \cdot 10^{-5}$	$\frac{dn}{dT} = 1,783 \cdot 10^{-7}x + 3,129 \cdot 10^{-5}$
Левое	$\frac{dn}{dT} = -2,162 \cdot 10^{-7}x + 2,402 \cdot 10^{-4}$	$\frac{dn}{dT} = -1,787 \cdot 10^{-7}x + 2,179 \cdot 10^{-4}$

Заметим, что полученные значения температурного коэффициента показателя преломления в катушке для правого и левого плеч не только характеризуются различным знаком наклона относительно оси абсцисс, но и имеют численное различие, что может оказаться весомым фактором, влияющим на погрешность работы гироскопа из-за дрейфа угловой скорости.

Такой характер распределения температурного коэффициента показателя преломления связан с рядом факторов механического состояния волокна.

Во-первых, имеют место напряжения, возникающие в оптическом волокне во время процесса намотки, однако, в связи с отсутствием каркаса, бескаркасный контур имеет более гладкое распределение температурного показателя преломления.

Во-вторых, напряжения, возникающие ближе к центру оптического волокна в контуре, могут быть связаны с тем, что волокно наматывается с определенным натяжением, поэтому каждый последующий слой намотки начинает оказывать давление на предыдущий, что, в соответствии с (1), обуславливает увеличение бриллюэновского сдвига частоты ближе к центру катушки.

Выводы. Анализ бриллюэновских рефлектограмм показал, что наличие и тип каркаса катушки, используемого в процессе намотки, значительно влияет на качество конечного продукта. В случае использования каркаса наблюдаются, в частности, периодические всплески бриллюэновской частоты в областях, где волокно находится в контакте с каркасом.

В ходе температурных испытаний была выявлена зависимость температурного коэффициента показателя преломления оптического волокна от его длины в катушке. Данная зависимость связана с дополнительными напряжениями, возникающими в середине оптического волокна в контуре (на первых слоях намотки) вследствие самой квадрупольной технологии укладки оптического волокна, и должна учитываться при анализе влияния температурного фактора на состояние волоконно-оптического контура и снижении чувствительности выходного сигнала гироскопа к изменениям температуры.

Изложенная в работе модель распределенного мониторинга теплофизического состояния волоконной катушки, дополненная в общем случае рядом факторов и экспериментальными данными, может применяться для прогнозирования свойств других волоконно-оптических компонентов, что является актуальным для развития современных инновационных технологий в волоконной оптике.

Список используемых источников:

1. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугольников А.П., Поспелов В.И. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-экспресс. 2005. № 6(46). С. 128–140.
2. Кузнецов В.А., Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. Волоконно-оптические информационно-измерительные системы. М.: ЦНИТИ Техномаш-ВОС. 2009. 8 с.
3. Мешковский И.К., Мирошниченко Г.П., Рупасов А.В., Стригалева В.Е., Шарков И.А. Исследование влияния тепловых воздействий на работу волоконно-оптического датчика угловой скорости // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2014. С. 191–202.
4. Галягин К.С., Киселев Е.В., Ошивалов М.А., Ульрих Т.А., Вахрамеев Е.И. Тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение, 2011. Т. 54. №1. С. 32–37.
5. Zhihong Li, Zhuo Meng, Tiegeng Liu, Steve Yao. A novel method for determining and improving the quality of a quadrupolar fiber gyro coil under temperature variations // OPTICS EXPRESS. 2013. Vol. 21. № 2. P. 2521–2530.
6. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
7. Беспрозванных В.Г., Барков Ф.Л., Константинов Ю.А., Кривошеев А.И., Бобровский А.С., Елисеенко Р.Д. Нелинейная рефлектометрия напряженно-деформированного состояния волоконно-оптического кабеля // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2. № 2. С. 144–153.

8. Woo-Seok Choi. *Analysis of temperature dependence of thermally induced transient effect in interferometric fiber-optic gyroscopes* // Journal of the Optical Society of Korea. 2011. Vol. 15. No. 3. P. 237–243.
9. Yonggang Zhang. *Modeling of thermal-induced rate error for FOG with temperature ranging from – 40°C to + 60°C* // IEEE Photonics Technology Letters. 2014. Vol. 26. No. 1. P. 305–310.

© 2016, Беспрозванных В.Г.

Распределенный мониторинг теплофизического состояния волоконно-оптических компонентов

© 2016, Besprozvannykh V.G.

Distributed monitoring of fiber-optic components thermophysical state