

УДК 681.586.5

**ДАТЧИК ИЗНОСА И ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

© 2015 А.А. Кузнецов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Л.М. Фасхутдинов, В.И. Артемьев

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

В работе описан волоконно-оптический датчик износа и температуры изделия при трении. Был предложен метод определения износа щеток электродвигателя с использованием волоконно-оптических технологий, основанных на мультипликативности отклика волоконной решетки Брэгга (ВРБ) и длиннопериодной решетки. Помимо износа можно проводить измерения температуры щетки, скорости оборотов двигателя, осуществлять контроль плотности прилегания щетки к ротору электродвигателя (определять «отскок» щетки от ламелей). Чувствительный элемент встраивается непосредственно в контролируемое изделие. Информация об изменении длины сенсора используется для измерения износа, а положение центральной длины волны – температуры. В работе представлены результаты моделирования и экспериментальные данные.

Ключевые слова: щетка, датчик, износ, волоконная решетка Брэгга, обороты двигателя, тормозные колодки

Уменьшение длины изделия вследствие износа возникает в случае фрикционного контакта деталей, например, в электродвигателях такими узлами могут выступать щетки, подшипники и т.д. Определение величины износа в этих случаях является необходимым для безопасной эксплуатации оборудования [1]. Обычно сенсорные устройства выполняются встроенными в щетку. Например, для порогового определения износа могут быть использованы электрические проводники. Детектирующая аппаратура определяет момент разрыва проводника, что характеризует износ изделия на заданную величину [2]. Второй вариант исполнения датчика основан на использовании двух изолированных электрических проводников, при этом контролируется пороговая величина износа изделия, определяемая глубиной расположения контрольных электрических проводников, при достижении которой трущимися изделиями разрушается изоляция проводников, проводники замыкаются элементами второго трущегося изделия и в систему регистрации поступает электрический сигнал о достижении порога износа [3]. Недостатками

описанных устройств является вероятность попадания высокого напряжения с электродвигателя на детектирующую аппаратуру, что приведет к выходу ее из строя.

Для устранения описанного недостатка в качестве контрольных проводников могут быть использованы оптические волокна. В работе [4] описано устройство, состоящее из петель оптических волокон, расположенных в области износа. Каждая петля образует контур, с источником оптического излучения на одном конце и детектором на другом. По мере износа происходит последовательный обрыв одной или нескольких петель, что фиксируется аппаратурой. Такая конструкция требует большого числа размещенных в изделии петель оптического волокна, а также наличие входных и выходных волокон для них. Другим недостатком является невозможность контроля температуры, а также пороговый характер измерения износа.

Проведенный анализ показал, что на практике существуют лишь отдельные методы определения износа и температуры. Устройство, осуществляющее одновременное определение указанных параметров, представлено в работе [1], его основной элемент – отрезок оптического волокна, конец которого заложен на глубине равной или меньшей, чем до трущейся поверхности. На торец волокна, расположенный в изделии, нанесен переизлучающий материал – фосфор. Импульсный лазерный источник возбуждает в фосфоре люминесценцию, имеющую длину волны отличную от источника возбуждения. Прием-

Кузнецов Артём Анатольевич, аспирант.

E-mail: serius_91@mail.ru

Морозов Олег Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.

E-mail: microoil@mail.ru

Нуреев Ильнур Ильдарович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: n2i2@mail.ru

Фасхутдинов Ленар Маликович, аспирант.

E-mail: fatum.fl@gmail.com

Артемьев Вадим Игоревич, студент

ная аппаратура способна различать спектральные и амплитудные изменения в отклике с датчика. Изменение амплитуды связано с отражением света от переизлучающего материала, интенсивность которого зависит от степени его истирания. Изменения в спектре отраженного сигнала определяются зависимостью длины волны люминесценции от температуры материала. Очевидный недостаток данного метода – сложность, также используется относительно небольшая толщина переизлучающего материала, что приводит к необходимости использования нескольких волокон, расположенных в изделии на различных глубинах, для обеспечения заданного диапазона измерений величины износа.

В работе [5] представлен метод определения износа с использованием оптического волокна. Оптическое излучение поступает в волокно, отражается от его конца и распространяется по тому же волокну в обратном направлении. Отрезок волокна истирается одновременно с изделием, что приводит к уменьшению отражающего участка. Сложность метода связана с необходимостью анализа отклика от истирающейся поверхности, имеющей различную отражательную способность, а также применение интерферометрических методов для исключения опорных измерительных каналов, построенных на элементах объемной оптики. Для измерения температуры используется волоконная решетка Брэгга (ВРБ), встроенная параллельно основному волокну.

В работе представлен ВРБ-датчик для измерения величины износа щеток электродвигателя, также возможно проводить измерения температуры щетки, скорости оборотов двигателя, осуществлять контроль плотности прилегания щетки к ротору электродвигателя (определять «отскок» щетки от ламелей). Впервые (с точки зрения коллектива авторов) представлена возможность измерения износа изделия путем определения длины встроенной в него ВРБ и использование мультипликативного характера отклика для измерения остальных параметров.

Одновременное определение величины износа и температуры на основе мультипликативного отклика ВРБ. Предложенный метод основывается на широко известной зависимости центральной длины волны ВРБ λ_{FBG} от температуры и редко используемой связью длины ВРБ L с ее откликом [6]. Зависимость центральной длины волны отражения ВРБ от температуры [6]:

$$\lambda_{FBG} = 2n_{eff}\Lambda \times \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right] \Delta T, \quad (1)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления, Λ – период ВРБ, ΔT – изменение температуры. Типовое значение смещения длины волны: $\sim 0,01$ nm/°K. Профиль спектра отражения ВРБ в зависимости от длины ВРБ L и расстройки δ [7]:

$$R = \frac{\sinh^2 \left[\kappa L \sqrt{1 - (\delta/\kappa)^2} \right]}{\cosh^2 \left[\kappa L \sqrt{1 - (\delta/\kappa)^2} \right] - (\delta/\kappa)^2}, \quad (2)$$

где κ – коэффициент связи падающей и отраженной волны, (δ/κ) – относительная расстройка, которая для ВРБ с периодом Λ составляет: $\delta = \Omega - (\pi/\Lambda)$, где $\Omega = 2\pi n_{eff} / \lambda$.

В качестве чувствительного элемента может быть использована длиннопериодная волоконная решетка. Профиль спектра пропускания в зависимости от длины L и расстройки δ , выглядит следующим образом [7]:

$$T = \frac{\cos^2 \left[\kappa^{(m)} L \sqrt{1 + (\delta^{(m)}/\kappa^{(m)})^2} + (\delta^{(m)}/\kappa^{(m)})^2 \right]}{1 + (\delta^{(m)}/\kappa^{(m)})^2}, \quad (3)$$

где m – номер связываемой оболочечной моды.

Температурная чувствительность длиннопериодной решетки зависит от числа связанных оболочечных мод и обычно составляет величину $\sim 0,05 \dots 0,1$ nm/°K. Отношение, характеризующее температурную чувствительность, представлено как [6]:

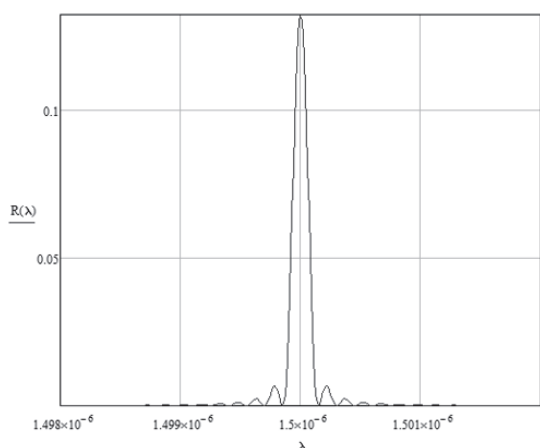
$$\frac{\Delta \lambda_{LPFG}}{\lambda_{LPFG}} = \frac{1}{\Delta n_{eff}} \frac{\partial (\Delta n_{eff})}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T. \quad (4)$$

В работе описаны оба типа волоконных решеток.

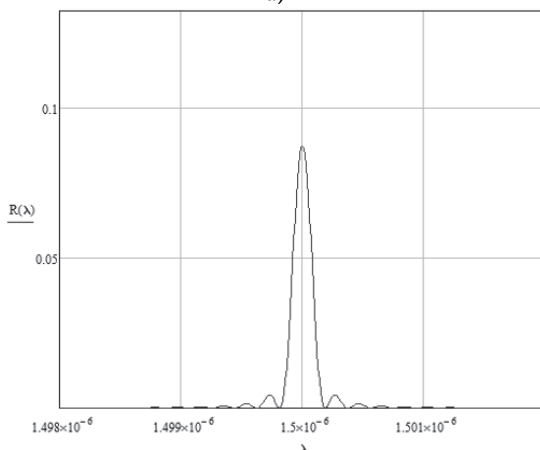
Результаты моделирования. Для демонстрации изменений спектра ВРБ представлена зависимость коэффициента отражения для различных длин (рис. 1 а-в). Эффективный индекс показателя преломления для фундаментальной моды принят за 1,5. Период решетки был выбран таким образом, чтобы центральная длина волны отражения ВРБ составляла 1500 нм. Первоначальная длина решетки $L = 5$ mm, $\kappa L = 0,38$. В ходе численного моделирования спектрального отклика ВРБ изменялась длина решетки. В результате получена зависимость коэффициента отражения и ширины спектра ВРБ от ее длины (рис. 1г). Моделирование проводилось в программном

пакете Mathcad. На основании полученных данных можно сделать вывод, что с уменьшением длины ВРБ происходит снижение коэффициента отражения и уширение профиля.

Для демонстрации изменений спектра длиннопериодной решетки, представлена зависимость коэффициента пропускания от длины решетки (рис. 2 а-в). Различие между коэффициентами преломления оболочки и сердцевины $\Delta n_{eff} = 0,02$. Длина решетки $L = 10$ mm, период - $\Lambda_{LPFG} = 122$ μm . Для изучения характеристик решетки было принято значение параметра $\kappa L = \pi/2$.



а)



б)

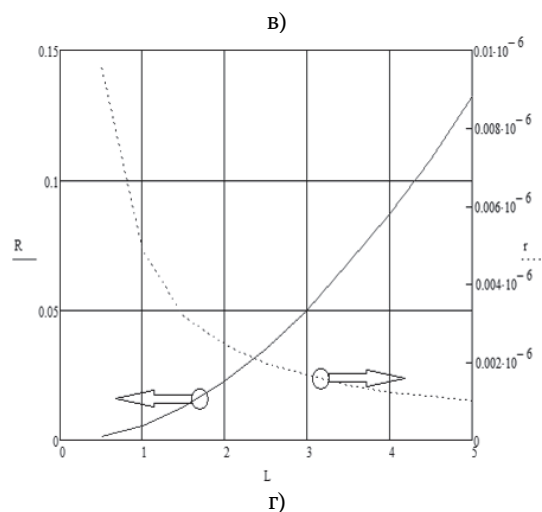
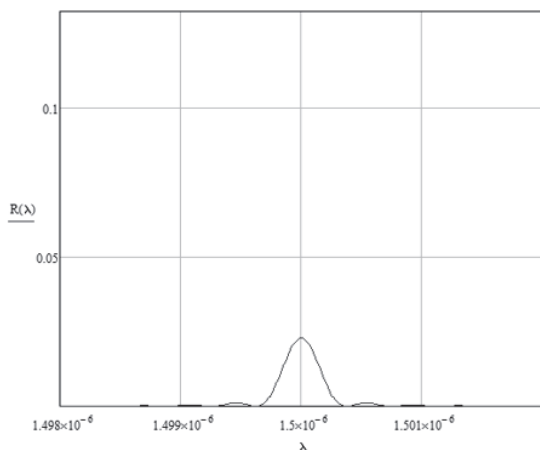
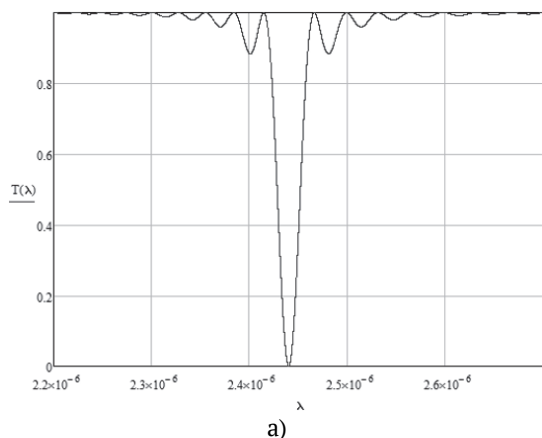


Рис. 1. Спектральные характеристики ВРБ:

а – профиль отражения ВРБ длиной 5 мм; б – профиль отражения ВРБ длиной 4 мм; в – профиль отражения ВРБ длиной 2 мм; г – коэффициент отражения R и полная ширина на полувысоте от максимума (FWHM) γ в зависимости от длины ВРБ L

В ходе численного моделирования спектрального отклика длиннопериодной решетки изменялась ее длина. В результате получена зависимость коэффициента отражения (не пропускания) и ширины спектра от длины структуры (рис. 2г), $R=I-T$. Полученная численная модель была апробирована в программном пакете Optisystem. В качестве широкополосного источника использовался компонент «White Light Source», также в эксперименте использовалась ВРБ «Bragg grating» и оптический анализатор спектра «Optical spectrum analyzer». Структура длиннопериодной решетки была предварительно смоделирована в программном пакете Optigrating. Полученные данные совпадают с результатами численного моделирования.

Практическая реализация датчика. Блок-схема измерительной системы представлена на рис. 3, внешний вид щетки электродвигателя со встроенным ВРБ-датчиком износа и температуры – на рис. 4.



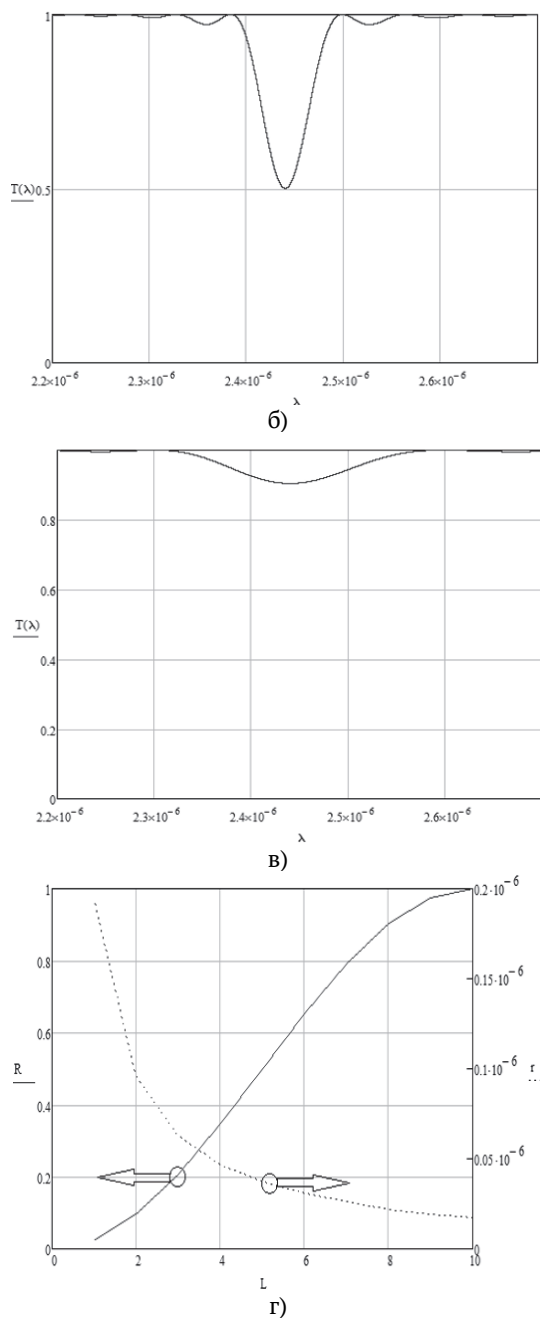


Рис. 2. Спектральные характеристики длиннопериодной волоконной решетки: а – профиль пропускания решетки длиной 10 мм; б – профиль пропускания решетки длиной 5 мм; в – профиль пропускания решетки длиной 2 мм; д – коэффициент отражения R и FWHM γ в зависимости от длины решетки L

Для измерения величины износа изделия источник 1 лазерного излучения генерирует непрерывное излучение, которое через светоделитель 2 поступает на измерительный волоконно-оптический световод 3 и через него на внутриволоконный оптический датчик 7, отклик которого через измерительный волоконно-оптический световод 3, первый и второй выход светоделителя 2, передающий волоконно-оптический световод 4 поступает на детектор 5, в котором

регистрируется амплитуда рефлектометрического отклика. Полученная информация поступает в контроллер 6, в котором по полученным значениям амплитуды определяется величина износа изделия при трении.

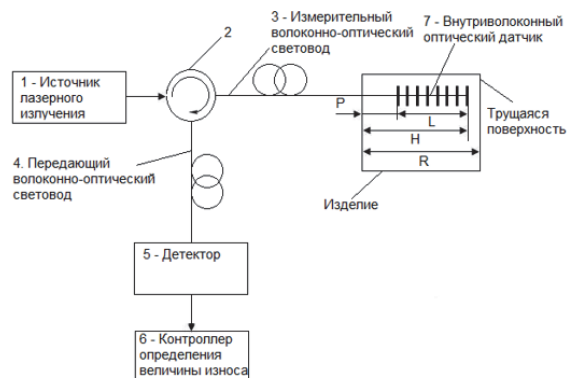


Рис. 3. Блок-схема измерительной системы

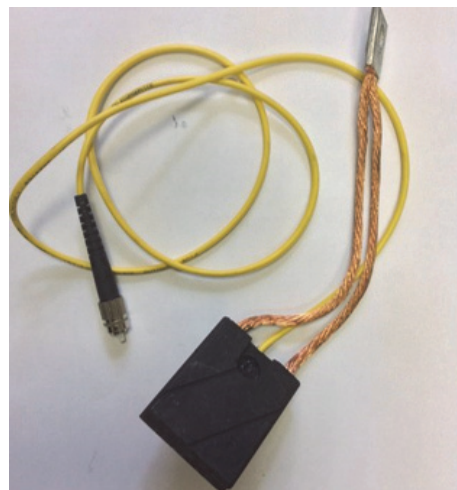


Рис. 4. Внешний вид датчика

Метод опроса датчика. Основными измеряемыми параметрами ВРБ и длиннопериодной решетки являются центральная длина волны (определение температуры), добротность и коэффициент отражения/пропускания (определение износа). Предлагаемый метод опроса датчика может быть основан на двухчастотном зондировании, подробно описанном в работах [8-9]. Следует отметить, что в том случае, если центральная частота двухчастотного сигнала совпадает с резонансной длиной волны датчика, огибающая выходного сигнала совпадает по фазе с двухчастотными колебаниями на входе датчика и коэффициент модуляции выходного двухчастотного сигнала принимает максимальное значение равное 1. Определяя центральную частоту двухчастотного сигнала, можно определить и добротность датчика. Для этого предложен метод вариации разностной частоты [10], основанный на соотношении:

$$Q_{1,2} = \frac{v_{FBG}}{f_1 - f_2} \sqrt{\frac{i_{out(v_{FBG})}}{i_{out1,2}} - 1}, \quad (5)$$

где $i_{out(v_{FBG})}$ и $i_{out1,2}$ – амплитуды центральной частоты и компонент двухчастотного сигнала на выходе фотоприемника, когда центральная частота и составляющие f_1 и f_2 настроены на центр спектральной характеристики. Значения $i_{out1,2}$ определяются по выходным сигналам фотоприемника, параметр $i_{out(v_{FBG})}$ не известен. Если произвести замену: $\Delta f = f_1 - f_2$ на некоторую величину $\Delta f'$, не меняя положение зондирующего сигнала на центре спектральной характеристики, получим новые значения частот $f_3 = f_1 - \Delta f'$ и $f_4 = f_2 + \Delta f'$. Для частот f_3 и f_4 перепишем выражение (5) как

$$Q_{3,4} = \frac{v_{FBG}}{f_3 - f_4} \sqrt{\frac{i_{v_{FBG}}}{i_{3,4}} - 1}. \quad (6)$$

Поскольку $Q_{1,2} = Q_{3,4}$, путем совместного решения уравнений (5) и (6) получим $i_{out(v_{FBG})}$ затем, подставляя это значение в любое из выражений получим значение добротности датчика и его параметр FWHM, на основании чего будет определена величина износа.

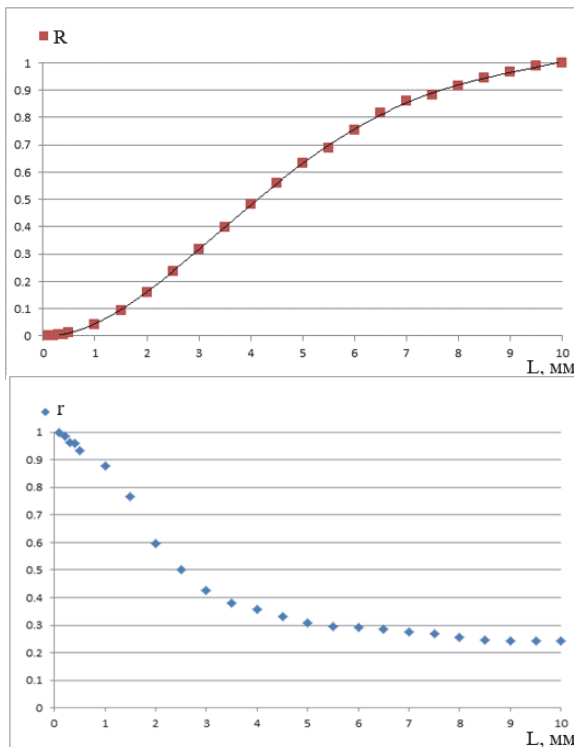


Рис. 5. Нормированные характеристики зависимости коэффициента отражения R и FWHM r от длины ВРБ L

Описанный метод был реализован экспериментально в лаборатории научно-образовательного центра «Волоконно-оптические технологии» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. Результаты эксперимента по истиранию щетки со встроенным волоконно-оптическим датчиком износа представлены на рис. 5.

Выводы: в работе описан волоконно-оптический датчик износа и температуры изделия при трении (на примере щетки электродвигателя), в основе которого – мультипликативный отклик ВРБ и длиннопериодной решетки, а также методы двухчастотного зондирования. Можно проводить измерения температуры щетки, скорости оборотов двигателя, осуществлять контроль плотности прилегания щетки к ротору электродвигателя (определять «отскок» щетки от ламелей). Впервые (с точки зрения коллектива авторов) представлена возможность измерения износа изделия путем определения длины встроенной в него ВРБ и использование мультипликативного характера отклика для измерения остальных параметров. Описанный метод имеет высокое разрешение и отношение сигнал/шум, простые алгоритмы определения центральной длины волны отражения датчика для измерения температуры; добротности (FWHM), максимального коэффициента отражения (пропускания) – для определения износа. Область применения данного датчика – элементы щеточно-коллекторного узла электродвигателя. Также он может быть использован для большинства трудных поверхностей, например, тормозных колодок автомобиля.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ на выполнение НИР в КНИТУ-КАИ на 2014-2016 годы (программа «Радиофотоника», 3.1962.2014/К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnston, R.T. Fiber optic sensor system for detecting surface wear. Патент США № 8571813, 2009.
2. Sabol, S.M. Wear monitoring system with embedded conductors / S.M. Sabol, R. Subramanian. Патент США №7270890, 2007.
3. Павлутский, Н.Н. Устройство для контроля износа щетки. Патент РФ № 1809481, 2003.
4. Satake, T. Wear sensor / T. Satake, Y. Imada. Патент США № 4884434, 1989.
5. Discenzo, F.M. System for monitoring bearing wear. Патент США № 7551288, 2009.
6. Vasil'ev, S.A. Fibre gratings and their applications / S.A. Vasil'ev et al. // Quantum Electronics. 2005. V. 35(12). P. 1085-1103.
7. Srimannarayana, K. Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurements

- and discrimination of strain and temperature effects // *K. Srimannarayana et al. // Optica Applicata XXXVIII. 2008. P. 601-609.*
8. *Morozov, O.G. Synthesis of Two-Frequency Symmetrical Radiation and Its Application in Fiber Optical Structures Monitoring, [Fiber Optic Sensors] / O.G. Morozov et al. - InTech, Rijeka, 2012. P. 137-164.*
 9. *Morozov, O.G. Poly-harmonic Analysis of Raman and Mandelstam-Brillouin Scatterings and Bragg Reflection Spectra [Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications] / O.G. Morozov et al. – InTech Europe, Rijeka. 2015. P. 55-97.*
 10. *Morozov, O.G. Characterization of stimulated Mandelstam-Brillouin scattering spectrum using a double-frequency probing radiation / O.G. Morozov et al. // Proc. of SPIE 8787, 878709-6.2012.*

PRODUCT WEAR AND TEMPERATURE SENSOR ON THE BASIS OF FIBER OPTICAL SENSITIVE ELEMENT

© 2015 A.A. Kuznetsov, O.G. Morozov, I.I. Nureev, L.M. Faskhutdinov, V.I. Artemyev

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

In work the fiber optical sensor of wear and temperature of a product at friction is described. The method of determination the wear of electric motor brushes with use of the fiber optical technologies based on multiplication the response of Bragg's fiber lattice (BFL) and long-period lattice was offered. Besides the wear it is possible to take measurements of temperature of a brush, speed of turns of the engine, to exercise control of density of adhering a brush to electric motor rotor (to define brush "rebound" from lamels). The sensitive element is built directly in a controlled product. Information on sensor length change is used for wear measurement, and the provision of the central wavelength – temperature. In work results of modeling and experimental data are presented.

Key words: brush, sensor, wear, Bragg's fiber lattice, engine turns, brake shoes.

Artem Kuznetsov, Post-Graduate Student.

E-mail: serius_91@mail.ru

*Oleg Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department. E-mail: microoil@mail.ru*

*Ilnur Nureev, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor. E-mail: n2i2@mail.ru*

Lenar Faskhutdinov, Post-Graduate Student.

E-mail: fatum.fl@gmail.com

Vadim Artemyev, Student