

УДК 621.372.8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИЗГИБОВ И ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ НА ОПТОВОЛОКОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

Конойко А.И., Рябцев В.Н.

Разработан лабораторный макет волоконно-оптического интерферометрического датчика на основе двух интерферометров Майкельсона с использованием излучения на двух длинах волн, позволяющего измерять как величину, так и направление в плоскости смещения изгибов и деформаций контролируемых объектов, проведены его экспериментальные исследования. Результаты исследований показали соответствие положения боковых пиков выходной интерференционной картины величине и направлению реального смещения измерительного волокна.

*Ключевые слова:* волоконно-оптические датчики, векторный датчик изгибов, волоконно-оптический интерферометр Майкельсона, смещение интерференционной картины, изгибы и напряжения, величина и направление деформации.

(Поступила в редакцию 29 декабря 2017 г.)

**Введение.** Для обеспечения безопасного функционирования зданий, мостов, туннелей, дамб и других сооружений необходимо осуществлять постоянный контроль их технического состояния, т. е. измерять напряжения, нагрузки, вибрации конструкций и материалов, изменение их температуры и т. д. В последнее время для этих целей активно используются волоконно-оптические датчики [1, 2].

Волоконно-оптические датчики физических величин имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными электронными устройствами благодаря использованию оптических волокон в качестве чувствительных элементов. Тем самым достигаются: отсутствие влияния на результат измерения электромагнитных полей; отсутствие побочных электромагнитных излучений; отсутствие перекрестных помех каналов; отсутствие проблем, связанных с контурами заземления и с напряжениями смещения в местах соединения разнородных проводников; существенно меньшая электрическая опасность и отсутствие проблемы дугообразования и искрения; высокая стойкость к вредным воздействиям среды; малые габариты и вес; высокая механическая прочность; стойкость к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды; высокая скорость передачи данных. Кроме того, волоконно-оптические датчики могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду абсолютной взрывобезопасности. Они химически инертны и имеют простую конструкцию и высокую надежность.

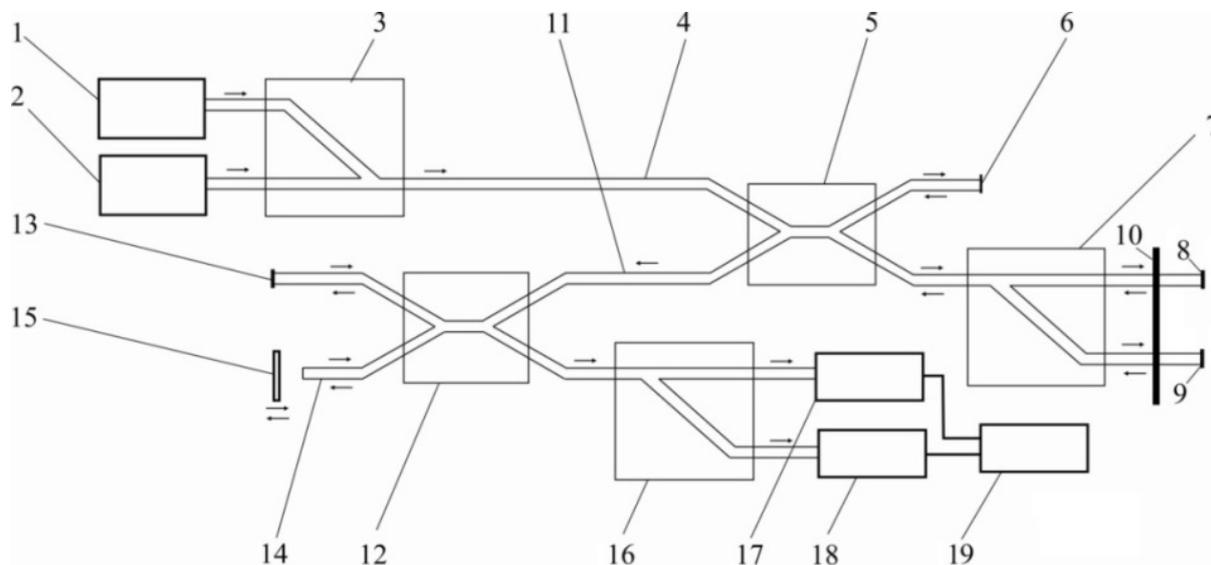
При измерении напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий и сооружений помимо величины изгибов и деформаций существует необходимость измерять также и их направление. Определение направления изгиба играет важную роль, например, при использовании датчиков для мониторинга состояния ветровых турбин, расположенных вдали от мест обитания человека, особенно на затапливаемых приливами участках морского побережья, строительных кранов, мостов, путепроводов. Решить данную задачу позволяет разработка векторных датчиков [3,4].

Волоконно-оптические интерферометрические датчики обладают наибольшей чувствительностью к изгибам и деформациям по сравнению с датчиками других типов. Они позволяют фиксировать изгибы и смещения субмикронных размеров [5]. Однако существующие датчики на основе волоконно-оптических интерферометров не позволяют определять направление деформаций.

В данной работе рассматривается конструкция и лабораторный макет оптического датчика на основе двух волоконных интерферометров Майкельсона для определения величины изгибов и деформаций контролируемых объектов.

**Принципы работы датчика.** Структурная схема датчика представлена на рисунке 1. Основу датчика составляют два волоконных интерферометра Майкельсона. Волоконно-оптический интерферометр Майкельсона представляет собой два оптических волокна, соединенные волоконно-оптическим разветвителем с коэффициентом разветвления 50 : 50. Вход первого интерферометра соединен с источником оптического излучения. Оптический сигнал делится в разветвителе и поступает на два отрезка волокна. Эти волокна служат плечами интерферометра. Одно плечо интерферометра далее

разделяется на два волокна. Эти волокна (измерительные волокна) жестко связаны с контролируемым объектом и следуют всем его деформациям. Второе плечо представляет собой опорное волокно, которое расположено свободно и не подвергается деформациям. Для усиления отражения на торцы волокон нанесено отражающее покрытие. Отраженные от торцов оптические сигналы поступают на разветвитель, где интерферируют. Интерференционный сигнал на выходе интерферометра зависит от разности оптических длин плеч интерферометра.



1, 2 – источник излучения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ; 3 – Y-образный волоконно-оптический разветвитель; 4, 11 – подводящее оптическое волокно; 5, 12 – X-образный волоконно-оптический разветвитель; 6 – опорное оптическое волокно; 7, 16 – Y-образный волоконно-оптический разветвитель с разделением по длинам волн; 8, 9 – измерительное оптическое волокно; 10 – соединительный стержень; 13, 14 – эталонное оптическое волокно; 15 – регулируемая линия задержки; 17, 18 – фотодетектор; 19 – блок обработки сигналов

**Рисунок 1. – Структурная схема волоконно-оптического векторного датчика изгибов**

Деформация объекта и связанного с ним измерительного волокна приводит к изменению разности плеч интерферометра и, соответственно, к смещению интерференционной картины. Однако это смещение является относительным, и для отслеживания деформации волокна необходимо производить измерения непрерывно, что не всегда является возможным и удобным. Для измерения абсолютной деформации используется второй интерферометр, на вход которого поступает суммарный сигнал с выхода первого интерферометра.

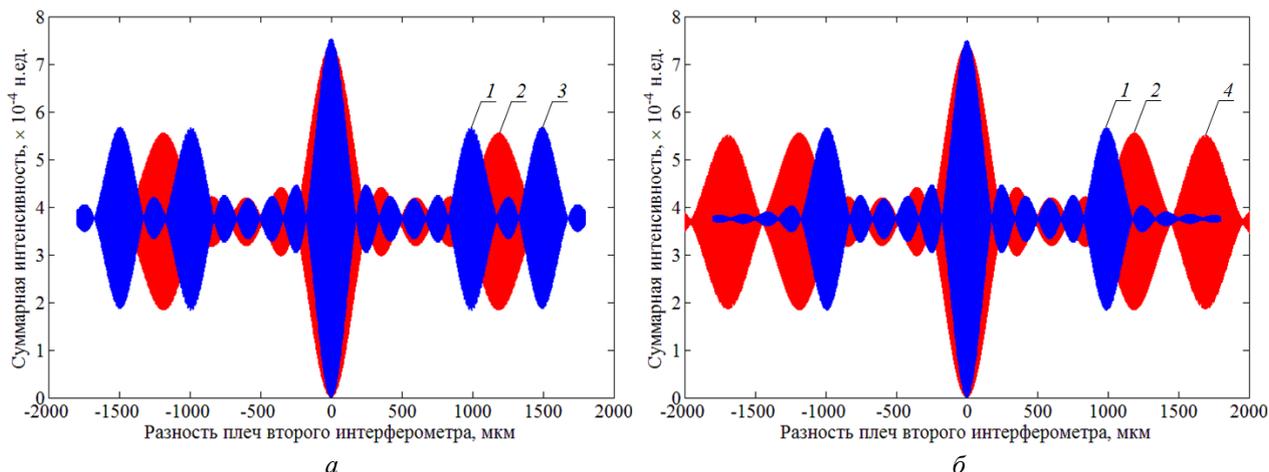
Разность оптических длин плеч второго интерферометра можно регулировать с помощью линии задержки. Огибающая интерференционной картины на выходе второго интерферометра представляет собой три пика когерентности (рисунок 2). Центральный пик образуется при равновесии двух плеч второго интерферометра Майкельсона, т. е. при отсутствии разности оптического пути. Боковые пики возникают при соответствии разности оптических длин плеч второго интерферометра оптической разности хода в первом интерферометре. Таким образом, разность между положением центрального и одним из боковых пиков соответствует разности плеч первого интерферометра.

Поскольку разность плеч первого интерферометра зависит от деформации контролируемого объекта, разность положений бокового и центрального пиков позволяет однозначно определить величину деформации.

Для определения направления деформации используется второе измерительное волокно, на которое подается оптический сигнал на другой длине волны. Одни концы обоих измерительных волокон закреплены неподвижно, другие – в поворотном устройстве. Деформация контролируемого объекта передается на измерительные волокна при помощи жесткого стержня через поворотное устройство (рисунок 3).

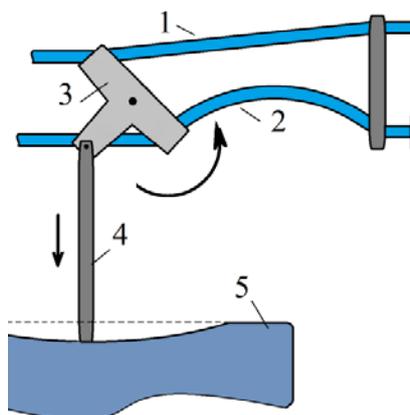
Деформация контролируемого объекта приводит к повороту закрепляющего устройства. В результате одно из измерительных волокон изгибается (волокно 2 на рисунке 3), но при этом его длина сохраняется. Второе измерительное волокно (волокно 1) растягивается, что вызывает дополнительный набег фазы оптического сигнала,

проходящего по этому волокну. При этом набег фазы в этом измерительном волокне по сравнению с опорным волокном зависит от величины деформации контролируемого объекта, соотношения плеч поворотного устройства и длины волны оптического излучения в волокне. Как уже говорилось, набег фазы определяет величину смещения боковых пиков интерференционной картины. Поскольку в обоих измерительных волокнах распространяется оптическое излучение на разных длинах волн, а набег фазы отличается между собой, интерференционные картины на разных длинах волн будут смещены относительно друг друга. На выходе второго интерферометра сигналы на разных длинах волн разделяются с помощью волоконно-оптического разветвителя с разделением по длинам волн, и полученные интерференционные картины фиксируются отдельными фотоприемниками. Отметим, что волны с разными длинами не интерферируют между собой, поэтому интерференционные картины не будут влиять друг на друга.



**Рисунок 2.** – Интерференционная картина на выходе второго интерферометра на длинах волн 1,31 (кривые 1, 3) и 1,55 (кривые 2, 4) мкм при выпуклой (а) и вогнутой (б) деформации контролируемого объекта. Кривые 1 и 2 описывают интерференционную картину в исходном состоянии интерферометра, 3 и 4 – при деформации контролируемого объекта.

Полуширина линии излучения лазера равна 10 мкм



1, 2 – измерительные волокна; 3 – закрепляющее поворотное устройство;  
4 – соединительный стержень; 5 – контролируемый объект

**Рисунок 3.** – Схема устройства соединения измерительных волокон с контролируемым объектом

Поскольку практически невозможно подобрать два волокна одинаковой длины, длины плеч первого интерферометра в исходном состоянии отличаются друг от друга. В результате существуют начальные разности фаз сигналов в измерительных волокнах по сравнению с опорным волокном. Поэтому интерференционная картина с центральным и боковыми пиками наблюдается и для интерферометра в исходном состоянии (кривые 1, 2 на рисунке 2). Воздействие на одно из измерительных волокон приводит к дополнительному набегу фаз оптического сигнала в этом волокне. В случае, когда длины измерительных волокон в исходном состоянии несколько превышают длину опорного

волокна, дополнительное растяжение измерительного волокна приводит к смещению боковых пиков в сторону от центрального пика (кривые 3,4 на рисунке 2). При этом положение пиков на другой длине волны не изменяется. Смещение пика прямо пропорционально величине воздействия на измерительное волокно. Таким образом, величину деформации контролируемого объекта можно определить по смещению боковых пиков относительно их положения в исходном состоянии.

При выпуклой деформации объекта дополнительный набег фазы по отношению к опорному волокну испытывает сигнал, проходящий по волокну, расположенному ближе к объекту. Следовательно, боковые пики интерференционной картины на длине волны, соответствующей измерительному волокну 2, будут расположены дальше от центрального пика (рисунок 2а). При обратной (вогнутой) деформации объекта больший радиус изгиба будет у волокна, расположенного дальше от измеряемого объекта, поэтому наблюдается смещение бокового пика на длине волны, соответствующей измерительному волокну 1 (рисунок 2б).

Следовательно, сравнивая относительное смещение боковых пиков на разных длинах волн по отношению к исходному состоянию, можно определить направление деформации контролируемого объекта в плоскости его изгиба.

**Лабораторный макет датчика.** Общий вид лабораторного макета интерферометрического датчика, позволяющего с высокой точностью измерять величину и направление в плоскости смещения изгибов и деформаций контролируемых объектов, представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. – Блок измерений (регулируемая линия задержки) лабораторного макета датчика

Для генерации стабилизированного излучения в одномодовых оптических волокнах использовался источник оптического излучения ОТ-2-7/ИИ на базе высокостабильных лазерных светодиодов, излучающих на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм (нестабильность уровня мощности излучения за 15 минут не более  $\pm 0,03$  дБ). Полуширина спектра излучения светодиодов составляла 10 нм. Излучение с длиной волны 1,31 мкм поступало на измерительное волокно, расположенное ближе к контролируемому объекту (волокно 2 на рисунке 3). На дальнейшее волокно (волокно 1 на рисунке 3) подавалось излучение на длине волны 1,55 мкм.

Параметры подводящих оптических волокон подобраны под соответствующий диапазон длин волн источника излучения. Х-образные волоконно-оптические разветвители представляют собой две пары отрезков одномодовых оптических волокон, сердцевин которых сплавлены на некотором участке. Длина сплавленного участка подобрана так, чтобы оптическое излучение, подаваемое на входные волокна, распределялось между его выходными волокнами с коэффициентом разветвления 50 : 50. Волоконно-оптические разветвители с разделением по длине волны обеспечивают разделение входного излучения на разных длинах волн по отдельным выходным волоконным каналам.

Выходные торцы измерительных и эталонного оптических волокон покрыты зеркальным диэлектрическим покрытием, что позволяет исключить фазовые искажения интерферирующих световых волн.

Регулируемая линия задержки представляет собой подвижное зеркало на механическом приводе и смонтирована на воздушной подушке, для того чтобы исключить влияние вибрационных помех на результаты измерений и нарушения юстировки. Зеркало представляет собой многослойную диэлектрическую структуру из периодических слоев с большими и меньшими показателями преломления. Толщина слоев подобрана таким образом, чтобы получить максимум коэффициента отражения для соответствующей длины волны.

Для регистрации выходных сигналов с высокой точностью использовались измерители оптической мощности ОТ-2-7/ИМ (на основе фотодиода InGaAs с размером фоточувствительной площадки 1 мм, погрешность измерения оптической мощности  $\pm 0,22$  дБ). Для обработки и визуализации сигналов использовался персональный компьютер.

Измерение деформаций измерительных волокон проводилось с помощью микрометра с ценой деления 10 мкм. Для имитации деформации контролируемого объекта использовалось устройство в виде оптического столика с микровинтом. Размеры плеч поворотного устройства сделаны равными друг другу. В зависимости от хода винта растягивалось волокно 1 или 2 (рисунок 3), что приводило к набегу фазы оптического сигнала в соответствующем волокне и смещению бокового пика интерференционной картины на выходе второго интерферометра. Зеркало линии задержки второго интерферометра смещалось при помощи микрометра с точностью позиционирования 10 мкм. Шаг перемещения зеркала линии задержки составлял 50 мкм при переходе между пиками и 10 мкм – внутри пика для более точного определения положения его максимума. Цифровые значения измеряемых сигналов сохранялись в файле данных, который в дальнейшем использовался для построения интерференционной картины в графическом редакторе.

Первоначальные измерения проводились при отсутствии воздействия на измерительные волокна. Далее имитировалась деформация контролируемого объекта на различную величину с шагом 50 мкм. Смещение или деформация контролируемого объекта определялись по величине сдвига бокового пика относительно его положения в исходном состоянии. На рисунке 5 представлено измеренное суммарное распределение сигналов на двух длинах волн на выходе второго интерферометра. Кривые 1 и 2 описывают экспериментальные значения интерференционного сигнала на длинах волн соответственно 1,31 и 1,55 мкм при отсутствии воздействия на измерительные волокна, кривая 3 описывает интерференционный сигнал при выпуклой деформации контролируемого объекта, т. е. при растяжении ближнего к объекту измерительного волокна, в котором распространяется сигнал на длине волны 1,31 мкм, на 0,5 мм.

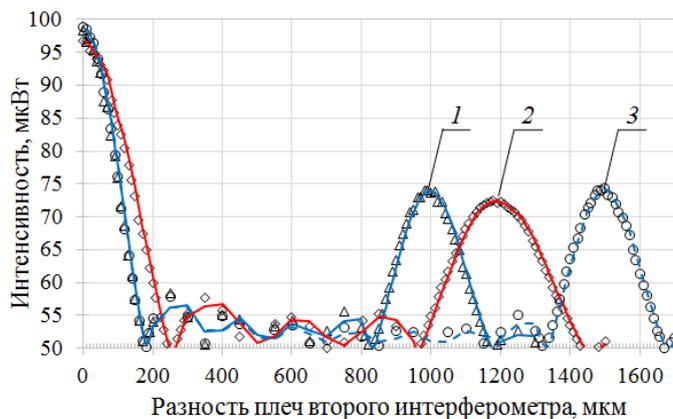


Рисунок 5. – Экспериментальная кривая огибающей интерференционной картины на выходе второго интерферометра

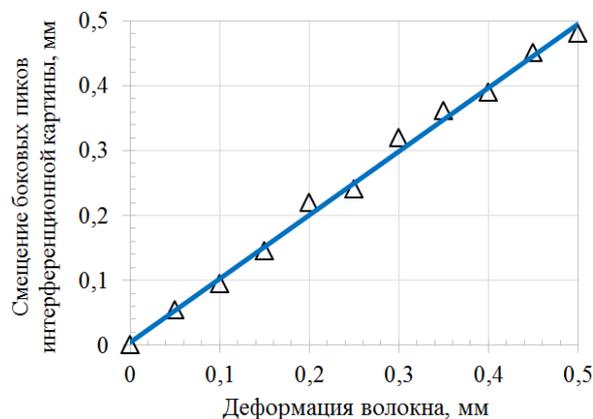


Рисунок 6. – Зависимость смещения боковых пиков интерференционной картины от растяжения волокна

Как видно на рисунке 6, смещение пика интерференционной картины на выходе второго интерферометра прямопропорционально величине воздействия на измерительное волокно. Точность определения максимума (величины деформации) обуславливается ошибкой позиционирования сканирующего зеркала (линии задержки). Поскольку шаг смещения зеркала при перемещении внутри пика равен 10 мкм, ошибку позиционирования можно считать равной 5 мкм.

При выпуклой деформации контролируемого объекта растяжению подвергается волокно, расположенное ближе к контролируемому объекту, что выражается в смещении боковых пиков интерференционной картины на длине волны 1,31 мкм. При вогнутой деформации смещается интерференционная картина для излучения на длине волны 1,55 мкм, распространяющегося по дальнему измерительному волокну. Таким образом, сравнение взаимного положения боковых пиков интерференционной картины в исходном и

деформированном состоянии на разных длинах волн позволяет определить, какое из измерительных волокон подвергается растяжению, т.е. определить направление деформации контролируемого объекта в плоскости его изгиба.

**Заключение.** Представлена конструкция и принципы функционирования векторного датчика на основе волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, позволяющего с высокой точностью измерять величину и направление в плоскости смещения изгибов и деформаций контролируемых объектов. Результаты экспериментальных исследований лабораторного образца датчика показали соответствие положения боковых пиков интерференционной картины на выходе из второго интерферометра величине и направлению реального смещения измерительного волокна. Результаты неоднократных измерений хорошо коррелируют друг с другом.

Ошибка определения положения максимума интерференционной картины зависит от шага позиционирования сканирующего зеркала линии задержки. Таким образом, для повышения точности измерения деформации контролируемого объекта необходимо уменьшать шаг перемещения зеркала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш [и др.] // Фотон-экспресс, 2005. – № 6. – С. 128–140.
2. Гончаренко, И.А. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – №1(17). – С. 118–132.
3. Inaudi, D. Coherence multiplexing of in-line displacement and temperature sensors / D. Inaudi // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34, № 7. – Pp. 1912–1915.
4. Inaudi, D. Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures / D. Inaudi [et al.] // Sensors and Actuators A. –1994. – Vol. 44, Issue 2. – Pp. 125–130.
5. Гончаренко, И.А. Волоконно-оптический векторный датчик изгибов и напряжений на основе интерферометров Майкельсона / И.А. Гончаренко [и др.] / Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2015. – № 2 (38). – С. 45–56.

## DETERMINATION OF THE VALUES AND DIRECTION OF BENDS AND DEFORMATIONS USING SENSORS ON FIBER-OPTIC INTERFEROMETERS

**Alexey Konoiko**, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor  
Photoelectric Converters Laboratory of the State Scientific and Production Association  
«Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Belarus

### **Vitaly Reabtsev**

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

*Purpose.* The purpose of the paper is to demonstrate the design and operation principles of the vector sensor on the base of Michelson fiber-optic interferometer, which allows measuring the values and direction of bends and deformations in the plane of displacement of controlled objects with high accuracy.

*Findings.* The results of experimental studies of the laboratory sample of the sensor showed the correspondence of the position of the side peaks of the interference pattern at the output from the second interferometer to the values and direction of the real displacement of the measuring fiber.

*Application field of research.* The developed structure and operating principle of the fiber-optic vector sensor of bends and stresses can serve as a basis for creating fiber-optic bending, pressure and displacement sensors.

*Conclusions.* The presented research showed the possibility of the accurate estimating the value and direction of the controlled object deformation with the help of the optical fiber sensor on the base of two interferometers with the use of radiation on two wavelengths.

*Key words:* fiber optic sensors, vector bend sensor, Michelson fiber optic interferometer, interference pattern shift, bends and stresses, deformation value and direction.

(The date of submitting: December 29, 2017)

### REFERENCES

1. Garmash V.B., Egorov F.A., Kolomiets L.N., Neugodnikov A.P., Pospelov V.I. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii [Possibilities, tasks and perspectives of fiber-optic measuring systems in modern instrument engineering]. *Foton-ekspress*, 2005. No. 6. Pp. 128–140. (rus)
2. Goncharenko I.A., Ryabtsev V.N. Datchiki kontrolya sostoyaniya inzhenernykh i stroitel'nykh konstruksiy na osnove opticheskikh volnovodnykh struktur [Sensors for conditional monitoring of engineering and building structures on the basis of optical waveguide structures]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2013. No. 1 (17). Pp. 118–132. (rus)
3. Inaudi D. Coherence multiplexing of in-line displacement and temperature sensors. *Optical Engineering*. 1995. Vol. 34, № 7. Pp. 1912–1915.
4. Inaudi D., Elamari A., Pflug L., Gisin N., Breguet J., Vurpillot S. Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures. *Sensors and Actuators A*. 1994. Vol.44, Issue 2. Pp. 125-130.
5. Goncharenko I.A., Konoyko A.I., Ryabtsev V.N., Il'yushonok A.V. Volokonno-opticheskiy vektorny datchik izgibov i napryazheniy na osnove interferometrov Maykel'sona [Fiber-optic vector sensor of bends and stresses based on Michelson interferometers]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. 2015. No. 2 (38). Pp. 45–56. (rus)