

МНОВОЛНОВЫЙ МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМ ДАТЧИКЕ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО

© 2015 г. А. А. Ветров; Р. А. Власов; Д. А. Данилов; С. С. Комиссаров;
Т. Д. Коцюбинский; А. Н. Сергушичев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
Санкт-Петербург

E-mail: a_vetrov@mail.ru

Приводятся результаты теоретического рассмотрения метода, основанного на применении многоволновой схемы волоконного интерферометра Фабри–Перо и позволяющего значительно увеличить диапазон регистрируемых перемещений по сравнению с одноволновым интерферометром. Экспериментально продемонстрирована регистрация колебаний чувствительного элемента виброакустического датчика, амплитуда которых в несколько раз превышает максимально возможную для одноволнового интерферометра.

Ключевые слова: волоконная оптика, волоконный интерферометр Фабри–Перо, виброакустический датчик, динамический диапазон.

Коды OCIS: 090.0090

Поступила в редакцию 04.03.2015

Введение

Принцип работы виброакустических датчиков заключается в измерении перемещения чувствительного элемента (ЧЭ) под воздействием акустического сигнала или вибрации. Интерференционный метод получения информации о перемещении ЧЭ, основанный на использовании волоконного интерферометра Фабри–Перо, образованного торцом оптического волокна и отражающей поверхностью ЧЭ, является перспективным, поскольку отличается простой оптической схемой и позволяет создавать высокочувствительные первичные преобразователи микроминиатюрного размера [1, 2]. Однако, поскольку характеристика преобразования такого датчика имеет синусоидальный вид, максимальный диапазон регистрируемых перемещений ограничен четвертью длины волны излучения лазера λ , что составляет примерно 370 нм при $\lambda = 1550$ нм. На практике этот диапазон оказывается еще меньше из-за проблемы ухода рабочей точки интерферометра, что вынуждает применять специальные методы ее стабилизации [3]. Эти проблемы вызывают необходимость разработки новых методов регистрации

и обработки сигналов в интерферометрических датчиках, обеспечивающих возможность восстановления сигнала колебаний ЧЭ с большой амплитудой и вне зависимости от положения рабочей точки интерферометра.

Одноволновый волоконный интерферометр Фабри–Перо

Схема датчика на основе одноволнового волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо приведена на рис. 1.

В таком датчике интенсивность излучения, регистрируемая фотоприемником (ФП)

$$I(l, \lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l\right), \quad (1)$$

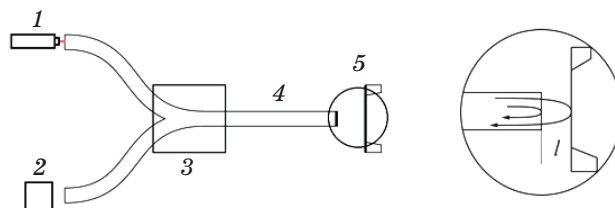


Рис. 1. Волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо. 1 – лазер, 2 – ФП, 3 – разветвитель, 4 – оптоволокно, 5 – ЧЭ.

где l – расстояние от торца оптоволокна до ЧЭ, I_1 и I_2 – интенсивности интерферирующих составляющих, отраженных от торца оптоволокна и ЧЭ соответственно. При условии $I_1 = I_2$ и после нормирования выражение (1) примет вид

$$I_{\text{норм}}(l, \lambda) = 1 + \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}l\right). \quad (2)$$

График этой зависимости, которую будем называть характеристикой преобразования интерферометрического датчика, приведен на рис. 2.

Продифференцировав выражение (2) и приравняв производную к нулю, нетрудно показать, что максимальная чувствительность и максимальный диапазон измеряемых перемещений датчика достигаются при некотором оптимальном положении рабочей точки интерферометра – на середине квазилинейного участка характеристики преобразования [3]

$$l_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{8}(2n + 1), \quad (3)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots, N$ – целое число.

Известно, что при воздействии изменяющихся условий внешней окружающей среды (температуры, давления и др.) рабочая точка интерферометра может отклоняться от оптимального положения, что из-за появления дополнительных искажений приводит к уменьшению диапазона регистрируемых перемещений [4–6] (рис 3а). Для ее стабилизации в оптимальном положении может быть использована зависимость длины волны излучения одночастотного полупроводникового лазера с распределенной обратной связью от температуры [3]. Однако даже в этом случае

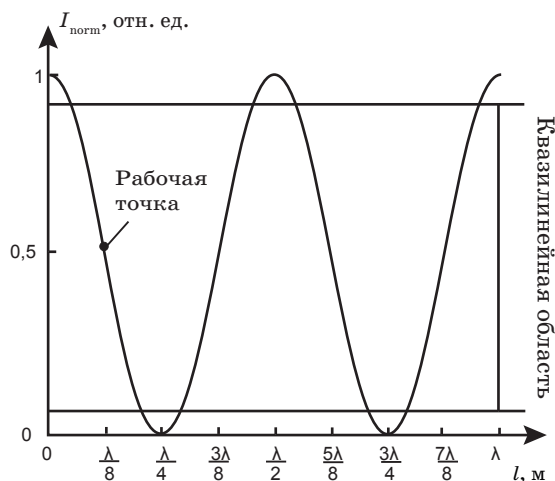


Рис. 2. Характеристика преобразования интерферометра.

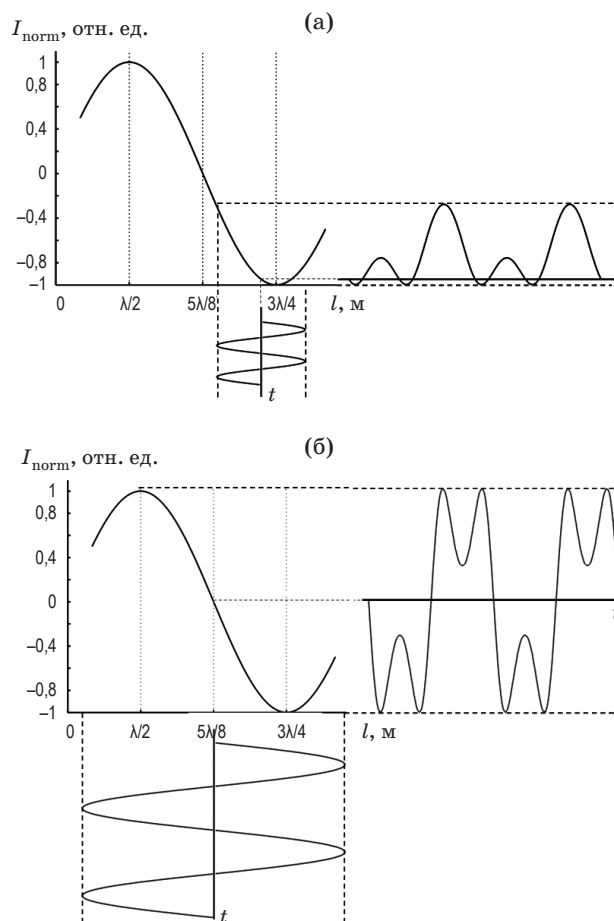


Рис. 3. Искажения выходного сигнала при уходе рабочей точки из оптимального положения (а) и значительном перемещении ЧЭ (б).

диапазон регистрируемых перемещений датчика ограничен квазилинейной рабочей областью характеристики преобразования интерферометра и составляет менее $\lambda/4$ лазерного излучения. Дальнейшее увеличение амплитуды перемещений ЧЭ приводит к еще более значительным искажениям исходного сигнала (рис. 3б).

Для устранения необходимости стабилизации положения рабочей точки и увеличения диапазона регистрируемых сигналов в виброакустическом датчике на основе волоконного интерферометра Фабри–Перо необходимо применять новые методы регистрации и обработки сигналов.

Многоволновый волоконный интерферометр Фабри–Перо

Среди известных вариантов увеличения диапазона измеряемых перемещений в датчиках на основе волоконного интерферометра Фабри–Перо можно выделить способ, основанный на использовании сканирования по длине волны [7].

Однако при его реализации сложно обеспечить быстродействие, достаточное для применения в виброакустических датчиках. Также существует способ, основанный на подсчете интерференционных полос [7], что позволяет восстановить информацию о фазе сигнала в случаях перемещения ЧЭ, превышающего $\lambda/4$. Такие системы позволяют существенно расширить диапазон измеряемого перемещения (до 19 мм [8]), однако они также сложно реализуемы для регистрации быстропеременных входных воздействий.

Авторами настоящей статьи предложен вариант увеличения диапазона измеряемых перемещений на основе многоволнового волоконного интерферометра Фабри–Перо (рис. 4). Для этого в одноканальный интерферометр вводятся дополнительные измерительные каналы, работающие на различных длинах волн λ_k , что позволяет с помощью математической обработки сигналов получить информацию о перемещениях ЧЭ, больших $\lambda/4$, и вне зависимости от положения рабочей точки в каждом канале.

Нормированный сигнал с каждого k -го ФП, работающего в линейном режиме с точностью до постоянного коэффициента, описывается уравнением (2). Решением такого уравнения относительно l для каждого k -го канала является следующее выражение:

$$l = \pm \frac{\lambda_k}{4\pi} \arccos(I_{\text{norm } k}) + \frac{\lambda_k}{2} n_k. \quad (4)$$

В частности, в случае двухволнового интерферометра с длинами волн излучения λ_1 и λ_2 получим систему независимых уравнений с тремя неизвестными – l , n_1 и n_2

$$\begin{cases} l = \pm \frac{\lambda_1}{4\pi} \arccos(I_{\text{norm1}}) + \frac{\lambda_1}{2} n_1 \\ l = \pm \frac{\lambda_2}{4\pi} \arccos(I_{\text{norm2}}) + \frac{\lambda_2}{2} n_2 \end{cases}. \quad (5)$$

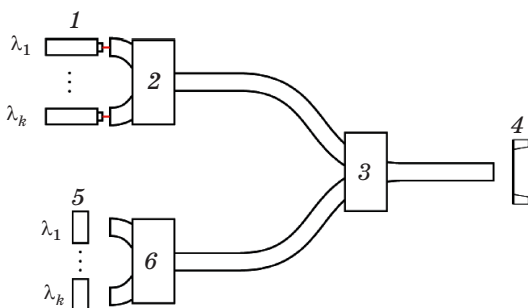


Рис. 4. Структурная схема многоволнового интерферометра. 1 – лазеры, 2 – мультиплексор, 3 – разветвитель, 4 – ЧЭ, 5 – ФП, 6 – демultipлексор.

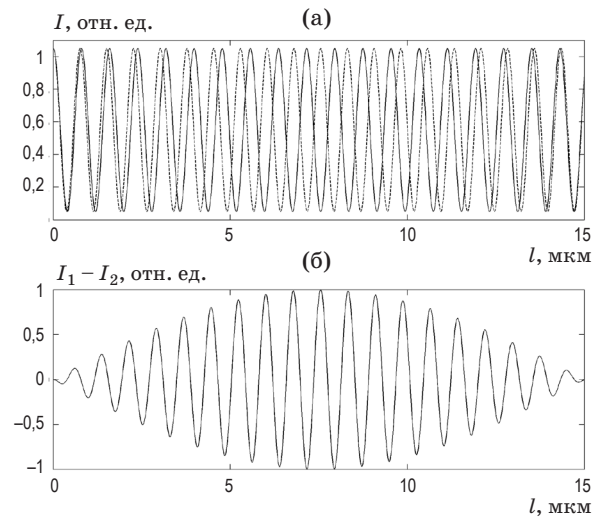


Рис. 5. Сигналы I_1 (пунктир) и I_2 (сплошная линия) на ФП каждого канала (а) и их “биения” (б) в пределах диапазона восстанавливаемых перемещений на длинах волн 1510 и 1590 нм.

Очевидно, что из-за цикличности изменения фазы разностной длины волны $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ система уравнений (5) будет иметь однозначное решение только в ограниченном диапазоне изменения расстояний l . Назовем его диапазоном восстановления перемещений L ЧЭ, который зависит от используемых длин волн и может быть определен следующим образом. Разность фаз сигналов, определяемых выражением (2), в каналах с длинами волн λ_1 и λ_2 при увеличении расстояния от 0 до L изменяется от 0 до 2π (рис. 5а), а амплитуда “биений” сигналов I_1 и I_2 изменяется от 0 до 2 и обратно (рис. 5б). Тогда

$$(4\pi/\lambda_1)L - (4\pi/\lambda_2)L = 2\pi, \quad (6)$$

отсюда получим

$$L = \lambda_1\lambda_2/2\Delta\lambda. \quad (7)$$

Учитывая, что для увеличения L разностная длина волны должна быть существенно меньше λ_1 и λ_2 , из выражения (7) получим оценку диапазона восстанавливаемых перемещений

$$L \approx \lambda^2/2\Delta\lambda, \quad (8)$$

где $\lambda_1 \approx \lambda_2 = \lambda$ обозначены как λ . Графики этой зависимости для наиболее характерных спектральных областей работы волоконно-оптических датчиков представлены на рис. 6.

Как нетрудно видеть из рис. 6, в диапазоне расстояний $l \leq L$ в системе уравнений (5) разность $(n_2 - n_1)$ может принимать значения либо 0, либо 1. С учетом этого выражение (5) превращается в восемь систем из двух уравнений,

каждая из которых имеет свое решение, не всегда совпадающее с другими решениями. Таким образом, чтобы восстановить искомое значение перемещения l в каждый момент времени, необходимо из всего набора решений выбирать только те, которые удовлетворяют ряду критериев, таких как положительность и постоянство разности $(n_2 - n_1)$ при выборе одного решения. При восстановлении временной зависимости $l(t)$ необходимо также отбирать решения с учетом критерия наибольшей гладкости восстановленного сигнала.

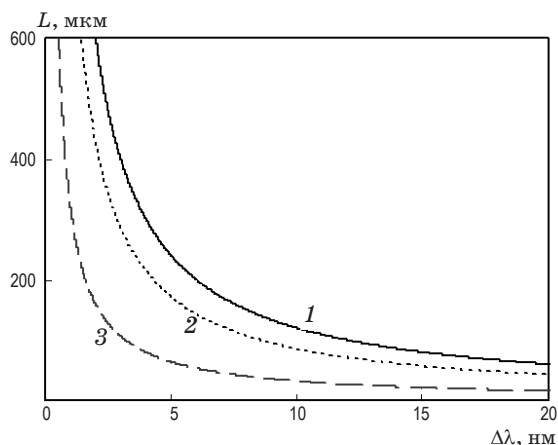
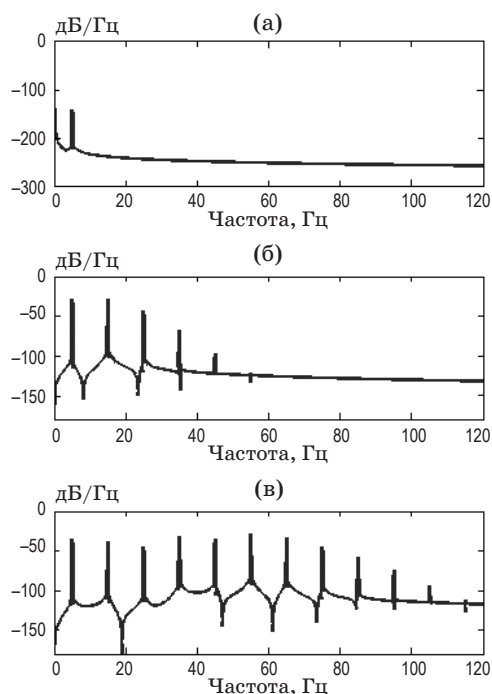


Рис. 6. Зависимость диапазона восстанавливаемых перемещений от разностной длины волны ($1 - \lambda = 1,55$ мкм, $2 - \lambda = 1,31$ мкм, $3 - \lambda = 0,8$ мкм).



Основным достоинством предлагаемого метода на основе многоволнового волоконного интерферометра Фабри–Перо является возможность восстановления в реальном времени быстропеременных перемещений ЧЭ с амплитудой, превышающей $\lambda/4$ лазерного излучения, и вне зависимости от положения рабочей точки интерферометра.

Аппаратная реализация метода

Для технической реализации предложенного метода была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 7. Макет состоит из источника акустического

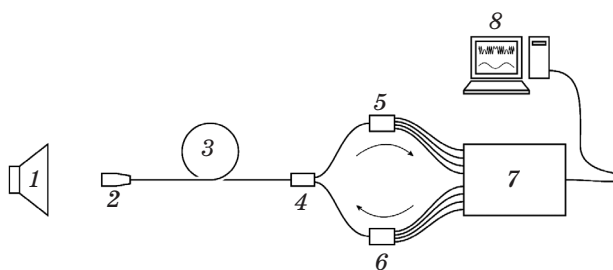


Рис. 7. Схема экспериментальной установки. 1 – источник сигнала, 2 – первичный преобразователь, 3 – оптоволокно, 4 – разветвитель, 5 – демультиплексор, 6 – мультиплексор, 7 – плата управления и сбора данных, 8 – ПК.

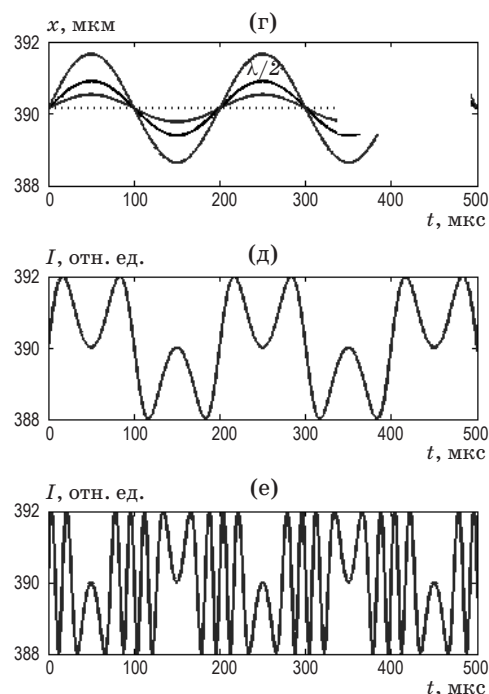


Рис. 8. Изменение спектра сигнала с ФП в зависимости от амплитуды перемещений ЧЭ (спектры выходных сигналов при перемещении ЧЭ амплитудой $\lambda/4$ (а), $\lambda/2$ (б) и λ (в), перемещения ЧЭ (г), нормированный выходной сигнал с интерферометра при перемещении ЧЭ амплитудой $\lambda/2$ (д), λ (е)).

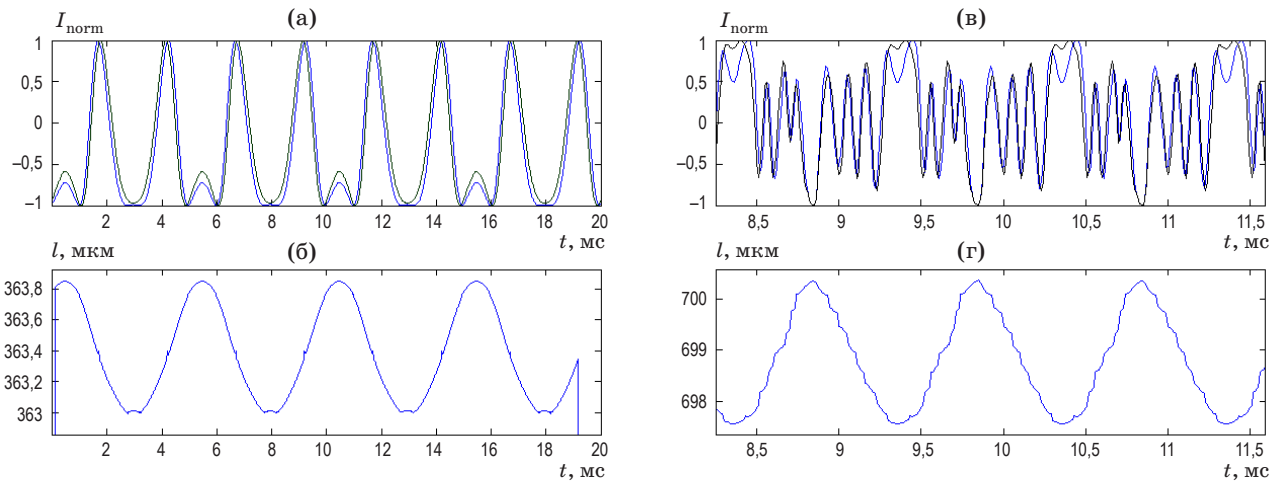


Рис. 9. Нормированные сигналы с ФП (а, в) и результат восстановления входных сигналов (б, г) на частотах 200 (а, б), 1000 (в, г) Гц.

сигнала, первичного акустического преобразователя, волоконно-оптического тракта, включающего оптоволоконно, разветвитель, а также мультиплексор и демultipлексор. На плате управления и сбора данных присутствуют четыре измерительных канала на основе одночастотных полупроводниковых DFB-лазеров с длинами волн 1510, 1530, 1550 и 1590 нм и соответствующих ФП на основе *p-i-n* диодов, применяемых в волоконно-оптических системах передачи информации. Четыре канала были предусмотрены, чтобы была возможность использовать их различные варианты для изменения $\Delta\lambda$ при проведении экспериментов. Выходные электрические сигналы с ФП преобразовывались в цифровую форму и передавались на персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки по Ethernet-каналу.

При преобразовании сигналов ФП в цифровую форму выбор частоты дискретизации аналого-цифровым преобразователем необходимо проводить с учетом не только максимальной частоты в спектре входного сигнала, но и появляющихся в спектре выходного сигнала ее более высоких гармоник из-за нелинейной характеристики преобразования интерферометра. При этом, как видно из рис. 8, увеличение амплитуды входного сигнала A приводит к расширению спектра выходного сигнала ФП.

На экспериментальной установке были записаны сигналы с ФП при подаче на первичный

преобразователь акустического синусоидального сигнала на частотах 200 и 1000 Гц. Акустические сигналы вызывали перемещения ЧЭ с амплитудой порядка $(0,7-1,4)\lambda$, что приводило к существенным искажениям выходных сигналов с двух различных ФП (рис. 9а, в). Результаты восстановления входных воздействий (перемещений ЧЭ) приведены на рис. 9б, г. В эксперименте использовались каналы с длинами волн 1550 и 1590 нм.

Заключение

Предложенный метод, основанный на применении многоволновой схемы волоконного интерферометра Фабри-Перо с последующей обработкой сигналов, показал возможность восстановления колебательных перемещений ЧЭ в виброакустических датчиках вне зависимости от положения рабочей точки интерферометра и амплитуды колебаний ЧЭ.

На экспериментальной установке, реализующей предложенный двухволновый метод, продемонстрирована возможность восстановления колебательных перемещений ЧЭ на частотах 200 и 1000 Гц с амплитудой до 2800 нм, что примерно в 8 раз больше по сравнению с максимально возможной рабочей амплитудой колебаний ЧЭ одноволнового интерферометра, которая составляет 350 нм.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н.* Волоконно-оптический торцевой интерферометр – универсальный элемент построения датчиков смещения // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 1. С. 3–6.
2. *Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н., Туркин М.В., Ширшов А.А.* Анализ и оптимизация параметров интерференционного волоконно-оптического микрофона // *Оптический журнал*. 2011. Т. 78. № 6. С. 31–38.
3. *Ветров А.А., Коцюбинский Т.Д., Сергушичев А.Н.* Адаптивная система управления интерференционным волоконно-оптическим датчиком перемещения // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 1. С. 29–37.
4. *Jackson D.A., Priest R., Dandridge A., Tveten A.B.* Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber // *Appl. Opt.* 1980. V. 19. № 17. P. 2926–2929.
5. *Hughes R., Priest R.* Thermally induced optical phase effects in fiber optic sensors // *Appl. Opt.* 1980. V. 19. № 9. P. 1477–1483.
6. *Hocker G.B.* Fiber-optic sensing of pressure and temperature // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. № 9. P. 1445–1448.
7. *Yang H.J., Riles K.* High-precision absolute distance measurement using dual-laser frequency scanned interferometry under realistic conditions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2007. A 575. P. 395–401.
8. *Murphy K.* Novel phase-modulated optical fiber sensors // *Doctoral Dissertation*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA. 1992.